



Drukujemy jutro w 3D

przewodnik po przyszłości
technologii druku 3D



Co-funded by
the European Union





Autorzy:

Agnieszka Podkowa

Krakowski Park Technologiczny

Dawid Zięba

Krakowski Park Technologiczny

Maria Szmyd

Krakowski Park Technologiczny

Dr hab. inż. Joanna Ortyl, Prof. PK

Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki, Wydział Inżynierii Technologii i Chemicznej,
Laboratorium Fotochemii Stosowanej & Photo4Chem sp. z o.o.

Małgorzata Noworyta

Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki, Wydział Inżynierii Technologii i Chemicznej,
Laboratorium Fotochemii Stosowanej & Photo4Chem sp. z o.o.

Paweł Fiedor

Photo4Chem sp. z o.o.

Paweł Niezgoda

Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki, Wydział Inżynierii Technologii i Chemicznej
Laboratorium Fotochemii Stosowanej & Photo4Chem sp. z o.o.

Treść niniejszego raportu odzwierciedla wyłącznie poglądy autorai jego/jej wyłączną odpowiedzialność; nie może być uznawana za odzwierciedlającą stanowisko Komisji Europejskiej i/lub Agencji EISMEA ani jakiegokolwiek innego organu Unii Europejskiej. Komisja Europejska ani Agencja nie ponoszą odpowiedzialności za wykorzystanie informacji zawartychw niniejszym dokumencie.



Spis treści

Wstęp od autorów	4
Wstęp do rozdziału: główne obszary zainteresowania i wnioski	6
Zastosowanie druku 3D w elastycznej elektronice	7
Zrównoważony rozwój i ekologia w kontekście druku 3D	9
Nowe materiały i nanotechnologia	10
Automatyzacja procesów produkcyjnych i integracja z przemysłem 4.0	11
Potencjalne przyszłe zastosowania	12
Wnioski i rekomendacje: kluczowe kierunki rozwoju	13
Case studies i przykłady aplikacji	14
Druk 3D w Polsce i Małopolsce	20
Druk 3D w Europie - kluczowe wyniki ankiety	21
Przegląd barier i wyzwań	26
Rekomendacje dla przemysłu i zielone perspektywy	28
Czy technologia druku 3D i elektroniki drukowanej może zmienić przyszłość przemysłu?	32
Literatura	34



Wstęp od autorów

Drogi czytelniku!

Z radością przekazujemy Ci raport „Drukujemy jutro w 3D” – przewodnik po przyszłości technologii druku 3D i ich wpływie na rozwój elektroniki drukowanej. Ten dokument to coś więcej niż zestawienie danych – to inspiracja i źródło wiedzy, które pokazuje, jak innowacyjne technologie mogą kształtować naszą rzeczywistość. Przygotowaliśmy go z myślą o Tobie – niezależnie od tego, czy działasz w branży, szukasz nowych pomysłów, czy dopiero odkrywasz potencjał druku 3D.

Dlaczego warto przeczytać ten raport?

Przemysł 3D to dynamiczny, rosnący sektor, który już teraz wpływa na takie dziedziny jak: medycyna, motoryzacja, elektronika użytkowa i wiele innych. W tym raporcie znajdziesz najnowsze informacje o trendach, wyzwaniach i możliwościach, które kształtują przyszłość. Przedstawiamy konkretne dane, studia przypadków i rekomendacje, które mogą pomóc Twojej firmie, instytucji czy organizacji w odkryciu nowych ścieżek rozwoju.

Krakowski Park Technologiczny (KPT) to miejsce, gdzie innowacje spotykają się z przedsiębiorczością. Naszą misją jest wspieranie firm w szybkim i skutecznym rozwoju, niezależnie od etapu, na którym się znajdują. Łączymy startupy, firmy technologiczne i instytucje badawcze, tworząc przestrzeń dla współpracy, wymiany wiedzy i wdrażania nowatorskich rozwiązań. Działamy na rzecz zrównoważonego rozwoju, pomagając firmom nie tylko rozwijać się ekonomicznie, ale także działać odpowiedzialnie wobec środowiska. Organizujemy konferencje, tworzymy raporty, wspieramy innowacyjne projekty i budujemy mosty między nauką a biznesem. Jesteśmy tu po to, by firmy mogły sięgać po więcej i zmieniać przyszłość na lepsze.

Photo4Chem - firma utworzona przy Politechnice Krakowskiej na Wydziale Inżynierii Technologii Chemicznej, założona przez dr hab inż. Joannę Ortyl, prof. PK, dostarcza wiedzy rozwiązań dziedzinie zaawansowanych materiałów do druku 3D i elektroniki drukowanej. Firma koncentruje się na tworzeniu nowych technologii z zakresu fotochemii i nanomateriałów, które mają praktyczne zastosowanie w takich obszarach jak biotechnologia, optyka czy nowoczesna elektronika.



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki



Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii
i Technologii Chemicznej

Po co stworzyliśmy ten raport?

Zależało nam na tym, aby zgromadzić w jednym miejscu nie tylko wiedzę naukową, ale również praktyczne dane. To publikacja, która podkreśla realne możliwości i potencjał druku 3D, ale także wskazuje wyzwania i trendy, które musimy wspólnie rozwijać. Naszym celem jest inspirowanie, dostarczanie konkretnych wniosków i budowanie pomostu między światem technologii, a codziennym życiem.

Co znajdziesz w środku?

- Kluczowe wnioski z przeglądu literatury i analizy danych.
- Praktyczne przykłady zastosowań druku 3D w różnych branżach.
- Rekomendacje dla firm i liderów branży, którzy chcą kształtować przyszłość technologii.



Zapraszamy do lektury i współpracy.
Niech ten raport stanie się dla Ciebie inspiracją
i przewodnikiem po świecie druku 3D, który
kształtuje nasze jutro. Krakowski Park
Technologiczny i Photo4Chem z dumą wspierają
innowacje, wierząc, że wspólnie możemy drukować
przyszłość pełną nowych możliwości.

Życzymy dobrej lektury,
zespół Krakowskiego Parku Technologicznego i Photo4Chem



Wstęp do rozdziału: główne obszary zainteresowania i wnioski

Czy wiesz, że druk 3D i elektronika drukowana mogą zrewolucjonizować sposób, w jaki produkujemy, projektujemy i korzystamy z technologii? Te innowacje to coś więcej niż tylko futurystyczne pomysły – to realne rozwiązania, które już dziś zmieniają świat medycyny, motoryzacji i wielu innych branż?

Właśnie te technologie są sercem raportu „Drukujemy jutro w 3D”.

Ten raport to owoc pracy w ramach międzynarodowego projektu „Optymalizacja produkcji poprzez druk 3D” (3DoP), finansowanego z nowatorskiego instrumentu Interregional Innovation Investments (I3). Konsorcjum 33 partnerów – w tym Krakowski Park Technologiczny i Photo-4Chem jako reprezentanci Polski – współpracuje, by zgłębić możliwości druku 3D, stworzyć mapę drogową dla jego rozwoju i promować wiedzę o korzyściach płynących z jego wdrażania. Raport jest nie tylko podsumowaniem tych działań, ale też przewodnikiem dla firm i instytucji, które chcą odkrywać potencjał tej technologii.

Co znajdziesz w tej sekcji?

- Rozwój materiałów przewodzących: jak innowacyjne materiały, takie jak tusze przewodzące, mogą ulepszyć elastyczne obwody drukowane i inne aplikacje?
- Elastyczna elektronika: jak druk 3D może tworzyć komponenty, które dopasowują się do ludzkiego ciała czy nieregularnych powierzchni w samochodach?
- Biomedyczne zastosowania druku 3D: jak personalizowane implanty i czujniki mogą zmieniać opiekę zdrowotną?
- Zrównoważony rozwój: dlaczego druk 3D jest kluczowym elementem ekologicznej transformacji przemysłu?



Czy wiesz, że?

Ponad 70% przedsiębiorstw w branży druku 3D deklaruje potrzebę nowych, przewodzących materiałów, by sprostać wymaganiom przyszłości.

Druk 3D pozwala na redukcję odpadów produkcyjnych nawet o 50% w porównaniu z tradycyjnymi metodami.

Biokompatybilne materiały używane w medycynie mogą nie tylko monitorować stan zdrowia pacjenta, ale też wspierać go w procesie regeneracji.

Dlaczego warto się zagłębić?

Technologie te to przyszłość, która dzieje się już dziś. Elastyczne obwody, biodegradowalne materiały, czy lokalna produkcja na żądanie to tylko część rozwiązań, które mogą uczynić świat bardziej zrównoważonym i efektywnym. Zrównoważony rozwój nie jest już tylko modnym hasłem – stał się wyzwaniem i priorytetem, a druk 3D oferuje konkretne narzędzia, by mu sprostać.

Co dalej?

W kolejnych sekcjach przyjrzymy się bliżej technologiom, które stoją za tymi rewolucyjnymi zmianami oraz wyzwaniom, które musimy pokonać, aby w pełni wykorzystać ich potencjał. Ten raport to Twoja szansa na poznanie przyszłości druku 3D i elektroniki drukowanej.

Are you ready?



Zastosowanie druku 3D w elastycznej elektronice

Druk 3D staje się kluczową technologią w tworzeniu elastycznych elementów elektronicznych, które znajdują zastosowanie w wielu nowoczesnych branżach. Dzięki tej technologii można tworzyć komponenty dopasowane do różnorodnych materiałów i kształtów – od tekstyliów po nieregularne powierzchnie, takie jak skóra czy elementy o nietypowej geometrii. To rozwiązanie pozwala na projektowanie urządzeń nie tylko funkcjonalnych, ale także komfortowych w użytkowaniu.

Przykłady zastosowań:

- **Elektronika noszona:** inteligentne opaski, ubrania monitorujące zdrowie czy urządzenia śledzące aktywność fizyczną.
- **Medycyna:** elastyczne czujniki i implanty umożliwiające monitorowanie parametrów zdrowotnych w czasie rzeczywistym, bezinwazyjnie i wygodnie.
- **Motoryzacja:** obwody drukowane w technologii 3D pozwalają na oszczędność miejsca i większą funkcjonalność w pojazdach dzięki integracji w trudno dostępnych miejscach.

Wnioski:

Elastyczna elektronika oferuje szeroki wachlarz zastosowań, jednak nadal istnieją wyzwania związane z brakiem odpowiednich materiałów łączących elastyczność z trwałością i przewodnictwem. Dalsze badania nad takimi rozwiązaniami oraz ich ekonomicznością są kluczowe, aby technologia ta mogła stać się dostępna na większą skalę.

Podsumowując, zastosowanie druku 3D w tej dziedzinie ma potencjał, by zrewolucjonizować sposób, w jaki projektujemy urządzenia elektroniczne, oferując nowe możliwości zarówno w projektowaniu, jak i w funkcjonalności.

Biomedyczne zastosowania druku 3D

Druk 3D zdobywa coraz większe uznanie w medycynie, otwierając nowe możliwości dla spersonalizowanej opieki zdrowotnej. Dzięki tej technologii możliwe jest tworzenie implantów dostosowanych do indywidualnej anatomii pacjenta, co przekłada się na wyższy komfort użytkowania i lepsze efekty terapeutyczne.

W zastosowaniach chirurgicznych druk 3D pozwala na produkcję narzędzi idealnie dopasowanych do specyfiki procedury, co podnosi precyzję zabiegów.

Innowacyjne kierunki rozwoju:

■ Drukowanie struktur tkankowych.

Technologia ta otwiera perspektywę tworzenia sztucznych organów. Obecnie, choć zastosowania te są w fazie eksperymentalnej, badania nad biokompatybilnymi materiałami i integracją komórek wskazują, że druk 3D może zrewolucjonizować transplantologię w przyszłości.

■ Integracja elektroniki drukowanej z urządzeniami medycznymi.

Przykładem są elastyczne czujniki drukowane w technologii 3D, które mogą być zintegrowane z implantami lub opaskami monitorującymi zdrowie pacjenta. Takie rozwiązania umożliwiają zdalne kontrolowanie parametrów zdrowotnych, co zmniejsza konieczność hospitalizacji i poprawia jakość opieki.

Korzyści dla medycyny:

- **Personalizacja opieki zdrowotnej:** indywidualnie dostosowane rozwiązania, takie jak implanty czy narzędzia chirurgiczne, mogą poprawić wyniki leczenia i komfort pacjentów.
- **Nowoczesne narzędzia diagnostyczne:** czujniki i urządzenia monitorujące zdrowie pacjentów w czasie rzeczywistym pomagają w szybkim reagowaniu na zmiany w stanie zdrowia.

Wyzwania do pokonania:

- **Regulacje prawne:** medycyna jest jedną z najbardziej regulowanych branż, co oznacza, że technologie muszą przechodzić długotrwałe badania kliniczne i procesy certyfikacji, zanim zostaną dopuszczone do użytku.
- **Biokompatybilność i bezpieczeństwo:** konieczne są dalsze badania nad materiałami, które spełnią rygorystyczne wymagania w zakresie trwałości i zgodności biologicznej.

Biomedyczne zastosowania druku 3D oferują ogromne możliwości poprawy jakości opieki zdrowotnej i personalizacji terapii. Niemniej, aby w pełni wykorzystać potencjał tej technologii, kluczowe będzie pokonanie barier regulacyjnych oraz opracowanie bardziej zaawansowanych i bezpiecznych materiałów. To obszar, który może zmienić przyszłość medycyny, wprowadzając innowacyjne rozwiązania zarówno dla pacjentów, jak i lekarzy.



Zrównoważony rozwój i ekologia w kontekście druku 3D

W literaturze coraz większy nacisk kładzie się na ekologiczne aspekty druku 3D, co ma szczególne znaczenie



Czy wiesz, że?

Druk 3D umożliwia precyzyjne formowanie obiektów, ograniczając ilość odpadów produkcyjnych w porównaniu z tradycyjnymi metodami wytwarzania? Dzięki temu technologia ta pozwala na bardziej **oszczędne wykorzystanie surowców**, zmniejszając ilość materiału potrzebnego do stworzenia gotowego produktu.

Firmy, które inwestują w zrównoważone technologie druku 3D, nie tylko obniżają koszty produkcji, ale również budują długoterminowe relacje z bardziej świadomymi ekologicznie klientami?

Materiały biodegradowalne i recykling

Dobrze wiedzieć!

Wykorzystanie materiałów biodegradowalnych i tych pochodzących z recyklingu otwiera nowe możliwości dla zrównoważonego rozwoju. Materiały te znajdują zastosowanie w różnych sektorach, od elektroniki po przemysł opakowaniowy, umożliwiając zmniejszenie zależności od tradycyjnych surowców szkodliwych dla środowiska. Co więcej, innowacyjne rozwiązania integrujące druk 3D z materiałami naturalnego pochodzenia pokazują, jak technologia ta może wspierać przemysł w budowaniu bardziej ekologicznej przyszłości.

Redukcja śladu węglowego

Pamiętaj o tym!

Rozwój technologii i metodologii zmniejszających ślad węglowy jest jednym z kluczowych obszarów badań nad drukiem 3D. Przykładowo, produkcja na żądanie eliminuje konieczność transportu dużych ilości gotowych produktów, co **ogranicza emisję CO₂** związaną z logistyką. Dodatkowo, technologie druku 3D umożliwiają **produkcję lokalną**, co skraca łańcuchy dostaw i zmniejsza zależność od globalnych systemów transportowych.

Perspektywy i korzyści dla przemysłu

Może Ci się przydać!

Wdrożenie zrównoważonych technologii drukowania 3D pomaga firmom spełniać standardy środowiskowe i budować ich wizerunek jako odpowiedzialnych graczy na rynku. Firmy, które decydują się na takie rozwiązania, zyskują przewagę konkurencyjną, przyczyniając się jednocześnie do transformacji przemysłu w kierunku bardziej ekologicznych praktyk.

Podsumowanie

Druk 3D oferuje szeroki wachlarz możliwości w zakresie zrównoważonego rozwoju i może stać się jednym z filarów **ekologicznej transformacji przemysłu**. Aby w pełni wykorzystać jego potencjał, konieczne są dalsze prace nad rozwijaniem materiałów przyjaznych środowisku oraz edukacja przedsiębiorstw na temat korzyści płynących z wdrożenia zrównoważonych technologii.

Nowe materiały i nanotechnologia

Rozwój nowych materiałów i nanotechnologii odgrywa kluczową rolę w przyszłości elektroniki drukowanej.

Dobrze wiedzieć!



Czy wiesz, że?

Materiały takie jak nanorurki węglowe, grafen czy nanocząstki srebra znacząco zwiększają przewodnictwo, wytrzymałość i elastyczność drukowanych elementów? Dzięki tym innowacyjnym materiałom możliwa jest miniaturyzacja oraz integracja bardziej zaawansowanych funkcji, co jest szczególnie istotne w aplikacjach wymagających elastyczności i kompaktowych rozmiarów.

Materiały hybrydowe, które łączą różne rodzaje surowców, oferują unikalne właściwości, takie jak lepsze przewodnictwo elektryczne, większa odporność mechaniczna czy zdolność do pracy w trudnych warunkach. Te materiały znajdują zastosowanie w wielu branżach, od motoryzacji po elektronikę noszoną, gdzie elastyczność i wytrzymałość są kluczowe dla funkcjonalności produktów.

Perspektywy na przyszłość:

Prognozy dotyczące rozwoju nanotechnologii wskazują, że jej wpływ na elektronikę drukowaną będzie coraz większy. W przyszłości nanotechnologia może umożliwić tworzenie bardziej zaawansowanych struktur, które zwiększą efektywność energetyczną urządzeń i pozwolą na integrację złożonych układów, takich jak elastyczne wyświetlacze, sensory medyczne czy bardziej wydajne panele fotowoltaiczne.

Podsumowując, nowe materiały i nanotechnologia mają potencjał, by zrewolucjonizować elektronikę drukowaną, tworząc bardziej zaawansowane i funkcjonalne produkty. Kluczowym wyzwaniem pozostaje jednak rozwój tych technologii i ich skuteczna integracja z procesami produkcyjnymi.



Automatyzacja procesów produkcyjnych i integracja z przemysłem 4.0

Automatyzacja procesów produkcyjnych jest kluczowym elementem przyszłości druku 3D, szczególnie w kontekście elektroniki drukowanej.

Zalety automatyzacji:

monitorowanie i analiza danych w czasie rzeczywistym pozwala śledzić każdy etap procesu druku 3D. Dzięki zaawansowanym algorytmom możliwe jest natychmiastowe wykrywanie i eliminowanie błędów, co minimalizuje straty materiałowe i koszty. Automatyczne linie produkcyjne wyposażone w roboty mogą pracować w sposób ciągły, co znacząco przyspiesza produkcję i zwiększa skalowalność procesów.



Czy wiesz, że?

Integracja z koncepcją przemysłu 4.0 umożliwia wykorzystanie Internetu Rzeczy (IoT), sztucznej inteligencji (AI) oraz robotyki w procesach produkcji, co zwiększa efektywność i jakość produktów?

Dobrze wiedzieć!

Połączenie automatyzacji z zaawansowaną analityką danych umożliwia optymalizację procesów pod kątem efektywności energetycznej i zużycia materiałów. W przyszłości monitorowanie i kontrola jakości w czasie rzeczywistym mogą stać się standardem, co przyczyni się do jeszcze większej precyzji i niezawodności produktów.

Podsumowując, automatyzacja procesów i integracja z przemysłem 4.0 to kluczowe kierunki rozwoju, które pozwolą na tworzenie bardziej zaawansowanych, precyzyjnych i opłacalnych produktów w sektorze elektroniki drukowanej.



Potencjalne przyszłe zastosowania

Technologie druku 3D i elektroniki drukowanej oferują szeroki potencjał zastosowania w różnych sektorach przemysłu, otwierając nowe możliwości zarówno dla producentów, jak i użytkowników końcowych.

Energooszczędna elektronika i sektor energii

Sektor energii oraz elektroniki energooszczędnej to kolejny obszar, w którym drukowana elektronika może odegrać kluczową rolę.

Dobrze wiedzieć!



Czy wiesz, że?

Drukowana elektronika może wprowadzać innowacje w urządzeniach codziennego użytku, takich jak smartfony, sensory czy urządzenia IoT? Producenci już teraz dostrzegają możliwości tworzenia bardziej zaawansowanych komponentów, które mogą zostać zintegrowane bezpośrednio z drukowaną elektroniką. Dzięki temu urządzenia stają się bardziej funkcjonalne i dostosowane do codziennych potrzeb użytkowników.

Druk 3D umożliwia tworzenie cienkowarstwowych baterii i ogniw fotowoltaicznych, które są bardziej efektywne energetycznie i łatwe do integracji z innymi urządzeniami. Wprowadzenie takich rozwiązań pozwala na zwiększenie efektywności energetycznej, co jest szczególnie ważne w kontekście rosnących wymagań dotyczących zrównoważonego rozwoju oraz redukcji kosztów eksploatacyjnych.

Inteligentne tekstylia i noszona elektronika

Druk 3D i elektronika drukowana mają również ogromny potencjał w rozwoju inteligentnych tekstyliów oraz noszonej elektroniki. Inteligentne ubrania wyposażone w drukowane sensory mogą monitorować parametry zdrowotne, takie jak tętno czy temperatura ciała, oraz przysyłać dane w czasie rzeczywistym do urządzeń mobilnych. To innowacyjne podejście znajduje zastosowanie nie tylko w medycynie, ale również w sporcie, gdzie informacje o stanie organizmu mogą wspierać lepsze zarządzanie treningiem oraz poprawę zdrowia użytkownika.

Przyszłe zastosowania technologii druku 3D i elektroniki drukowanej obiecuja znaczącą rewolucję w wielu sektorach przemysłu. Od urządzeń IoT i energooszczędnych rozwiązań, przez inteligentne tekstylia, aż po personalizowane urządzenia medyczne – rozwój tych technologii nie tylko ułatwi życie codzienne, ale także przyczyni się do tworzenia bardziej zrównoważonych i zaawansowanych produktów. To inspiracja dla branż, które chcą wykorzystać nowoczesne rozwiązania, by kształtować przyszłość.



Wnioski i rekomendacje: kluczowe kierunki rozwoju

Nowoczesne technologie druku 3D i elektroniki drukowanej oferują ogromny potencjał, ale ich rozwój wymaga skupienia na kilku strategicznych obszarach:

Nowoczesne materiały jako fundament innowacji

Rozwój materiałów przewodzących i hybrydowych umożliwia tworzenie bardziej wytrzymałych, elastycznych i niezawodnych komponentów. To kluczowy krok, który otwiera drzwi do zaawansowanych aplikacji w medycynie, energetyce czy elektronice użytkowej.

Automatyzacja w duchu przemysłu 4.0

Integracja druku 3D z inteligentnymi systemami produkcji, takimi jak IoT, AI czy robotyka, pozwala na bardziej efektywne zarządzanie procesami produkcyjnymi. Monitorowanie jakości w czasie rzeczywistym staje się standardem, który minimalizuje błędy i koszty.

Zrównoważony rozwój jako priorytet

Druk 3D znacząco zmniejsza ilość odpadów, a stosowanie materiałów biodegradowalnych czy pochodzących z recyklingu umożliwia bardziej ekologiczne praktyki. Firmy, które wdrożą zrównoważone technologie, będą lepiej przygotowane na przyszłe wymagania konsumentów i regulacje prawne.

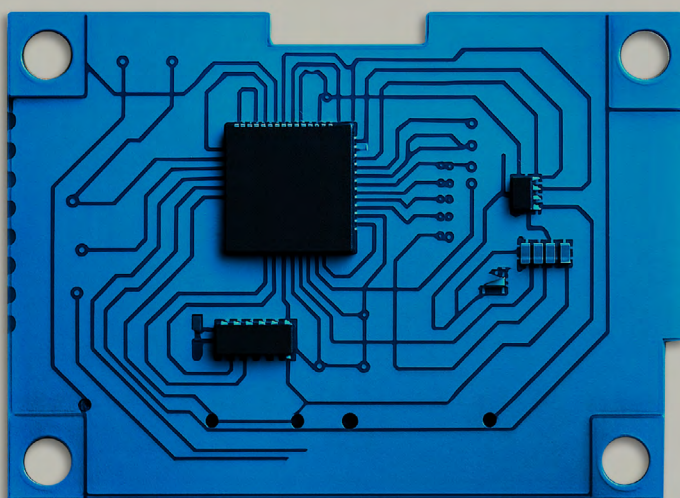
Podsumowując, rozwój elektroniki drukowanej i druku 3D to szansa na tworzenie bardziej zaawansowanych, efektywnych i przyjaznych środowisku produktów. Realizacja tych rekomendacji otworzy nowe możliwości dla branż, które już teraz korzystają z tych technologii, oraz przyspieszy ich wdrożenie w nowych sektorach. Przyszłość jest na wyciągnięcie ręki – czas zacząć drukować ją już dziś.

Case studies i przykłady aplikacji

Elastyczne PCB (Printed Circuit Boards)

Elastyczne płytki PCB to jedno z najbardziej innowacyjnych zastosowań technologii druku 3D w elektronice drukowanej. Dzięki możliwości adaptacji do różnych kształtów i powierzchni, elastyczne PCB są idealne do stosowania w kompaktowej elektronice konsumenckiej. Ich wszechstronność sprawia, że są coraz częściej wykorzystywane w produktach takich jak smartwatche czy opaski fitness, gdzie wymagana jest elastyczność i miniaturyzacja.

- **Potencjalne korzyści:** zwiększenie wytrzymałości, możliwość montażu na nieregularnych powierzchniach.

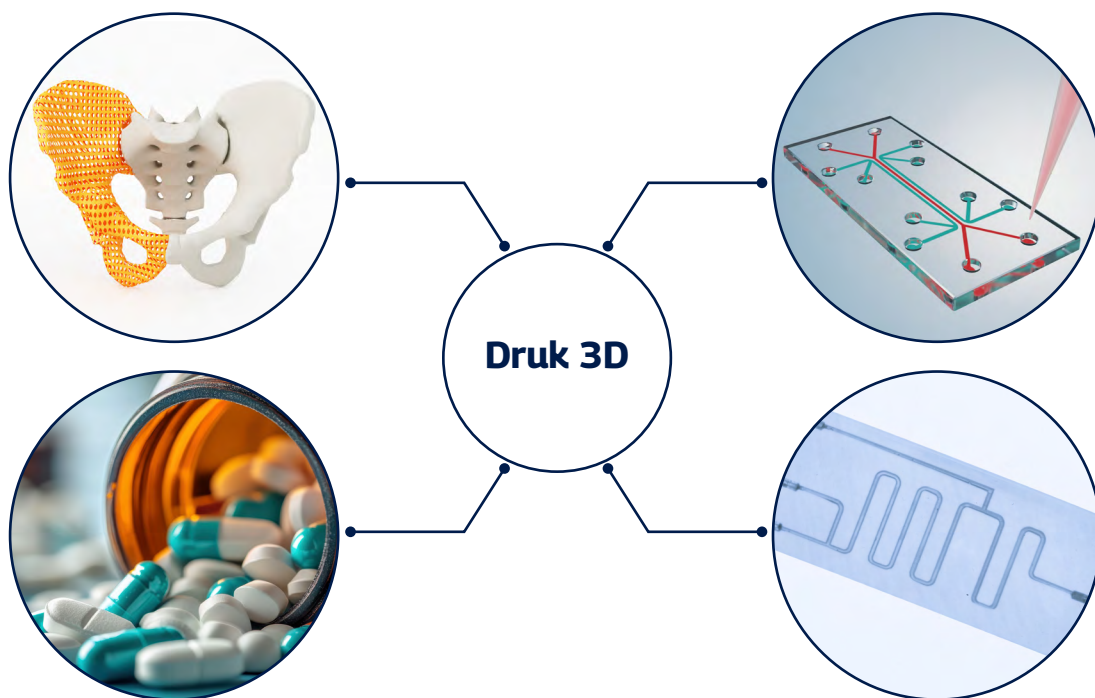


Produkt wykonany przy użyciu technologii druku 3D.

Aplikacje medyczne

Druk 3D w sektorze medycznym zyskuje na popularności, szczególnie w obszarach takich jak tworzenie implantów, narzędzi chirurgicznych oraz prototypów urządzeń medycznych. W elektronice drukowanej, druk 3D umożliwia integrację sensorów biometrycznych bezpośrednio w strukturach takich jak opatrunki czy bandaże, co ułatwia monitorowanie parametrów życiowych pacjenta w czasie rzeczywistym.

- **Przykład zastosowania:** inteligentne opatrunki wyposażone w czujniki monitorujące temperaturę i wilgotność skóry, co pozwala na dokładne monitorowanie procesu gojenia.
- **Potencjalne korzyści:** precyzyjne monitorowanie zdrowia pacjenta, redukcja czasu leczenia dzięki lepszej kontroli.



Zastosowanie druku 3D w medycynie spersonalizowanej.

Zastosowania w motoryzacji

Przemysł motoryzacyjny coraz częściej korzysta z elektroniki drukowanej i technologii druku 3D, szczególnie w zakresie tworzenia lekkich, niestandardowych komponentów elektronicznych, które można łatwo integrować w samochodach przyszłości. Przykłady obejmują drukowanie sensorów, które monitorują różne parametry pojazdu, jak również tworzenie niestandardowych paneli sterowania o nietypowych kształtach.

- **Przykład zastosowania:** inteligentne panele kontrolne, które umożliwiają dostosowywanie funkcji pojazdu do potrzeb użytkownika, zintegrowane z drukowanymi sensorami.
- **Potencjalne korzyści:** redukcja wagi pojazdu, optymalizacja przestrzeni, możliwość personalizacji.



Produkt wykonany przy użyciu technologii druku 3D.

Zastosowania w architekturze i budownictwie

Technologia druku 3D staje się coraz bardziej popularna w architekturze i budownictwie, rewolucjonizując sposób projektowania i wznoszenia obiektów. Dzięki tej innowacyjnej metodzie architekci i inżynierowie mogą tworzyć bardziej złożone, precyzyjne i opłacalne rozwiązania, które wcześniej były trudne do osiągnięcia przy użyciu tradycyjnych technik budowlanych.

- **Przykład zastosowania:** drukowanie niestandardowych, złożonych elementów konstrukcyjnych i paneli o nietypowych kształtach w architekturze, np. fasady budynków lub elementów dekoracyjnych.
- **Potencjalne korzyści:** personalizacja projektów bez dużych kosztów, redukcja odpadów dzięki precyzyjnemu użyciu materiałów, szybszy proces budowy z prefabrykowanymi elementami, zrównoważony rozwój dzięki lokalnym i recyklingowym surowcom.



Produkt drukowany w 3D.

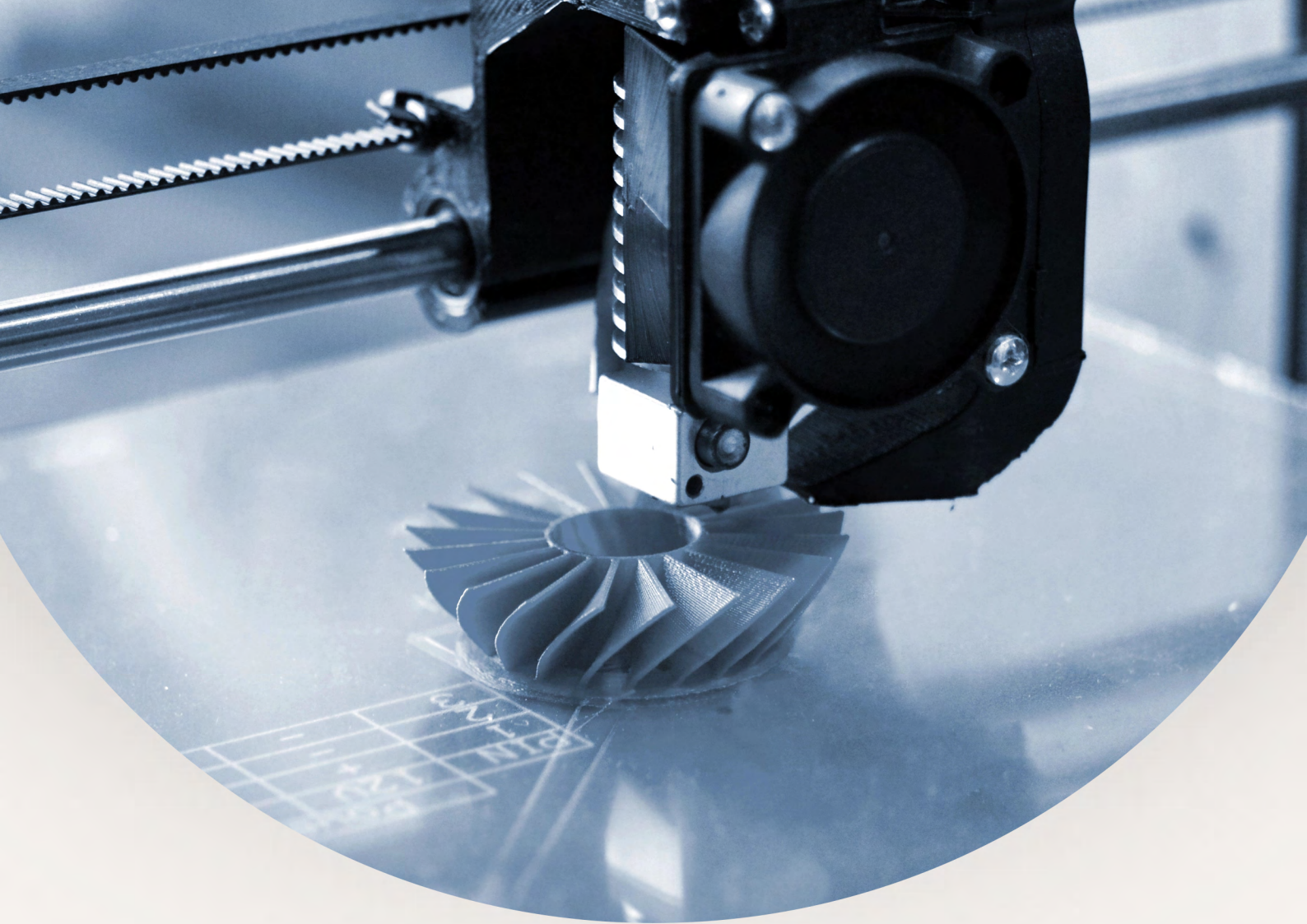
Zastosowania w modzie i sztuce

Technologia druku 3D staje się coraz bardziej popularna w architekturze i budownictwie, rewolucjonizując sposób projektowania i wznoszenia obiektów. Dzięki tej innowacyjnej metodzie architekci i inżynierowie mogą tworzyć bardziej złożone, precyzyjne i opłacalne rozwiązania, które wcześniej były trudne do osiągnięcia przy użyciu tradycyjnych technik budowlanych.

- **Przykład zastosowania:** tworzenie spersonalizowanych ubrań lub akcesoriów modowych, takich jak biżuteria czy buty, oraz skomplikowanych rzeźb artystycznych przy użyciu technologii druku 3D.
- **Potencjalne korzyści:** projekty dostosowane do indywidualnych potrzeb i preferencji, redukcja odpadów poprzez drukowanie tylko niezbędnych elementów, możliwość tworzenia złożonych, eksperymentalnych form szybciej niż przy tradycyjnych metodach.



Elementy ubrania wydrukowane w 3D.



Podsumowanie sekcji

Przedstawione przykłady pokazują, jak technologia druku 3D w elektronice drukowanej może być stosowana w różnych sektorach przemysłu. Od elastycznych PCB, przez aplikacje medyczne, po zaawansowane rozwiązania motoryzacyjne, drukowana elektronika wykazuje ogromny potencjał rozwojowy. Każde z tych zastosowań przynosi korzyści w postaci większej elastyczności, personalizacji oraz integracji zaawansowanych technologii w produkty codziennego użytku i przemysłowe. Druk 3D pozwala także tworzyć niestandardowe fasady i elementy konstrukcyjne, redukując odpady i wspierając zrównoważony rozwój dzięki ekologicznym materiałom. Umożliwia personalizację ubrań i akcesoriów, tworzenie złożonych wzorów oraz minimalizację odpadów, rewolucjonizując podejście do projektowania. Z kolei artyści wykorzystują druk 3D do realizacji szczegółowych, innowacyjnych rzeźb, łącząc kreatywność z technologią i przyspieszając proces tworzenia.

Druk 3D zmienia sposób działania i rozwój wszystkich tych branż, łącząc innowację, personalizację i ekologię.



Druk 3D w Polsce i Małopolsce

Polska branża druku 3D ulega dynamicznemu rozwojowi i zdobywa coraz większe znaczenie na rynku międzynarodowym. Jest to sektor obejmujący zarówno producentów drukarek 3D, jak i dostawców materiałów eksploatacyjnych oraz firm świadczących usługi druku i wdrażających technologie addytywne w przemyśle. Wśród producentów drukarek 3D wyróżniają się: Zortrax, który produkuje drukarki działające w technologiach FDM i SLA, 3DGence, dostarczający przemysłowe drukarki 3D, oraz krakowska firma Sinterit, specjalizująca się w kompaktowych drukarkach SLS. Sektor obejmuje również dostawców materiałów eksploatacyjnych, takich jak filamenty i żywice światłoutwardzalne. Do kluczowych firm należą: Fiberlogy, Devil Design, Royal Resin, a także małopolski start-up Photo4Chem, specjalizujący się w produkcji światłoczułych żywic. Istotną rolę odgrywają także firmy świadczące usługi druku 3D i wdrażające technologie addytywne w różnych branżach. Wśród nich znajdują się: CADXPRT, Simulat3D (firma współpracująca z branżą lotniczą, mająca siedzibę w Krakowie), OMNI3D oraz Cubic Inch. Polski rynek druku 3D rośnie w szybkim tempie. Świadczy o tym powstawanie wielu nowych start-upów zajmujących się produkcją addytywną. Kilka z tych firm zostało wyróżnionych w zbiorze RAD4R – Radar Innowacji Przemysłu 4.0 z 2024 r. autorstwa Krakowskiego Parku Technologicznego, który prezentuje katalog młodych firm, które dostarczają nowoczesne rozwiązania dla produkcji (<https://hub4industry.pl/radar/>). Wśród wyróżnionych firm znalazła się wspomniana wcześniej Photo4Chem, a także: INVIZION, specjalizująca się w skanowaniu 3D, Rocketprint.net, zajmująca się oprogramowaniem SaaS, Spes3D, produkująca obiekty z polimerów oraz metali w technologii L-PBF (Laser Powder Bed Fusion).

Podsumowując, druk 3D w Małopolsce, jak i w całej Polsce, rozwija się dynamicznie, oferując obiecujące perspektywy zarówno dla przemysłu, jak i konsumentów. Technologia ta znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach, w tym w przemyśle, medycynie, edukacji, czy projektowaniu artystycznym, co czyni ją atrakcyjną opcją dla wielu przedsiębiorców i twórców z regionu. W Krakowie i okolicach coraz więcej firm i startupów korzysta z druku 3D, co jest wynikiem kilku czynników. Po pierwsze, region ten charakteryzuje się dobrze rozwiniętą infrastrukturą edukacyjną. Uniwersytety i politechniki w Krakowie oferują programy edukacyjne związane z nowoczesnymi technologiami, co skutkuje napływem młodych, wykształconych specjalistów do lokalnego rynku pracy. Uczelnie te często współpracują z przedsiębiorstwami, co pozwala na praktyczne zastosowanie teorii w rzeczywistych projektach. Kolejnym czynnikiem jest dostępność dofinansowań i grantów, które wspierają rozwój innowacyjnych projektów technologicznych w regionie. Wsparcie finansowe, zarówno ze strony Unii Europejskiej jak i lokalnych instytucji, pozwala na realizację ambitnych projektów, które mogą konkurować na światowym rynku. Małopolska ma także dobrze rozwinięty sektor przemysłowy, który z każdym rokiem chętniej integruje rozwiązania bazujące na druku 3D. Firmy z branży lotniczej, automotive i meblarskiej włączają tę technologię do swoich procesów produkcyjnych, co pozwala na optymalizację kosztów i zwiększenie precyzji wytwarzania. Nie można nie wspomnieć o sektorze medycznym, gdzie druk 3D zyskuje na znaczeniu. Produkcja modeli anatomicznych i prototypów medycznych zwiększa możliwości diagnostyczne i terapeutyczne. Wyzwania dla rynku druku 3D w Małopolsce obejmują jednak konieczność ciągłej edukacji i adaptacji nowych technologii oraz rozwój infrastruktury technicznej. Niemniej jednak, perspektywy są optymistyczne, a ciągły rozwój technologii i innowacji w regionie napawa nadzieją na jeszcze szybszy rozwój tej dynamicznej branży.



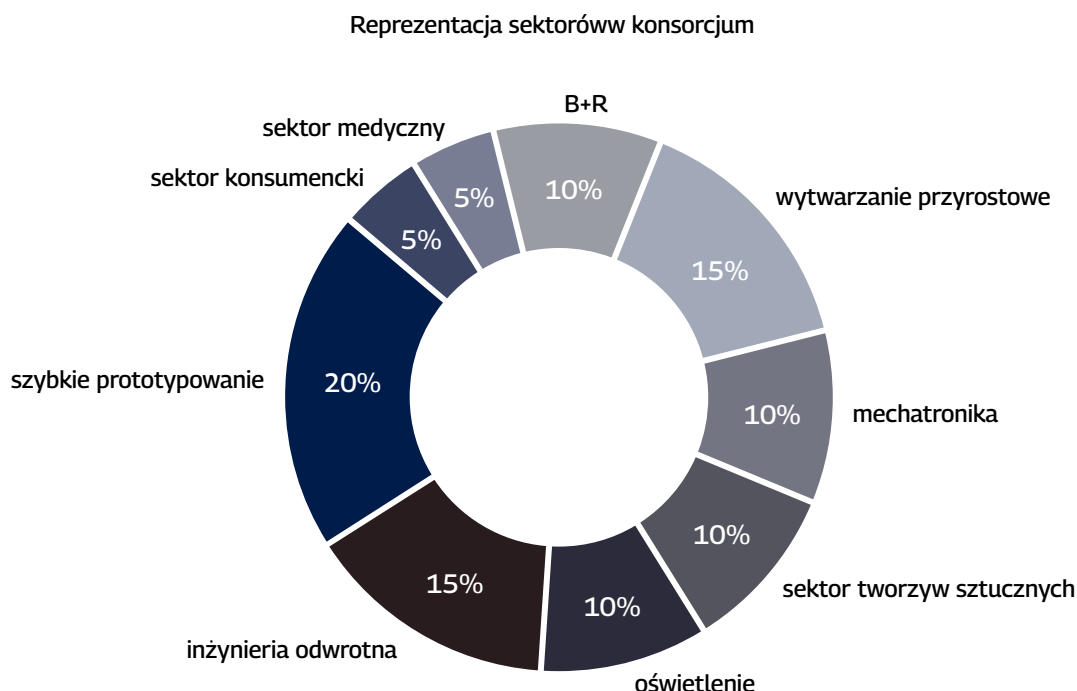
Druk 3D w Europie - kluczowe wyniki ankiety

W ramach realizacji projektu 3DoP przeprowadziliśmy ankietę wśród partnerów. Celem ankiety było zidentyfikowanie kluczowych trendów, wyzwań i możliwości związanych z technologiami druku 3D oraz drukowanej elektroniki. Zebrane dane dostarczają cennych informacji na temat aktualnego stanu technologii, ich zastosowań oraz przyszłych kierunków rozwoju, które mogą wpłynąć na realizację projektu i jego dalszą wartość dla branży.

Procentowy udział respondentów reprezentujących różne sektory przemysłu

Czego dotyczy:

Pokazuje procentowy udział respondentów reprezentujących różne sektory przemysłu, np. medycyna, elektronika konsumencka.



Wykres kołowy ilustruje różnorodność sektorów reprezentowanych w konsorcjum, co podkreśla interdyscyplinarność współpracy. Największy udział (20%) przypada na sektor szybkiego prototypowania, co wskazuje na jego kluczowe znaczenie w wykorzystaniu nowoczesnych technologii, takich jak druk 3D. Inżynieria odwrotna (15%) oraz produkcja przyrostowa (15%) również odgrywają istotną rolę, wspierając innowacje i rozwój produktów.

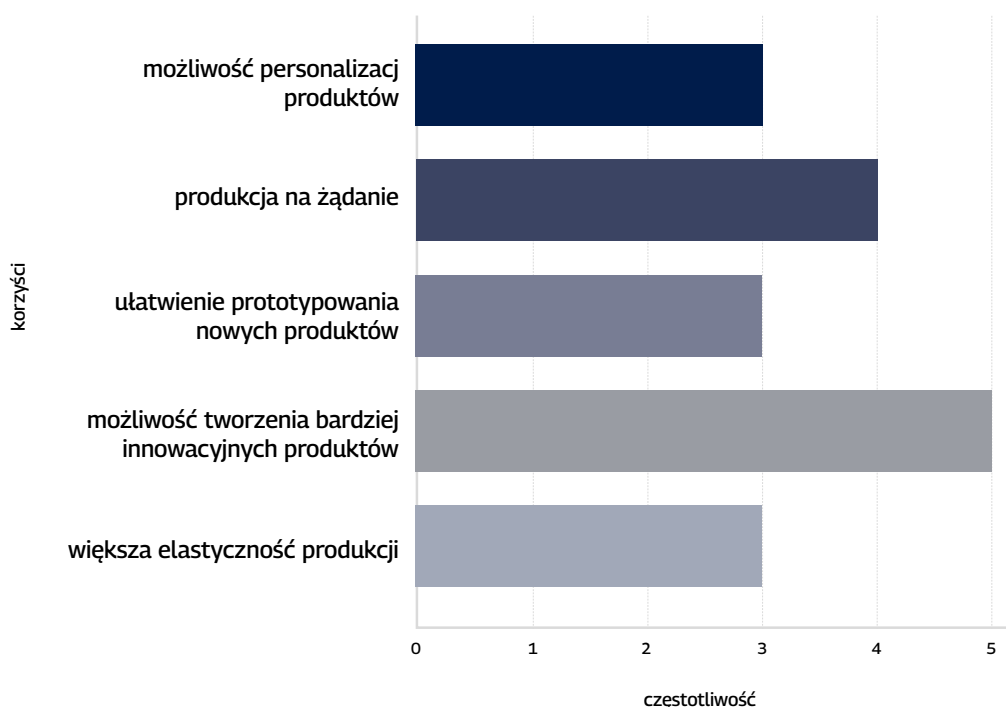
Sektory takie jak B+R, mechatronika, oświetlenie oraz tworzywa sztuczne, z udziałami na poziomie 10%, pokazują znaczenie badań i technologii w różnych gałęziach przemysłu. Z kolei mniejszy udział sektora medycznego i konsumenckiego (po 5%) wskazuje na ich bardziej wyspecjalizowaną, ale nadal ważną rolę w kontekście całego konsorcjum.

Podsumowując, różnorodność sektorów pokazuje potencjał technologii 3D i elektroniki drukowanej w szerokim zakresie zastosowań, a interdyscyplinarna współpraca sprzyja transferowi wiedzy i innowacjom.

Największe korzyści wynikające z zastosowania druku 3D w elektronice

Czego dotyczy:

Ilustruje kluczowe korzyści zgłaszane przez respondentów, takie jak oszczędność materiałów, elastyczność projektowa, czy szybkość prototypowania.



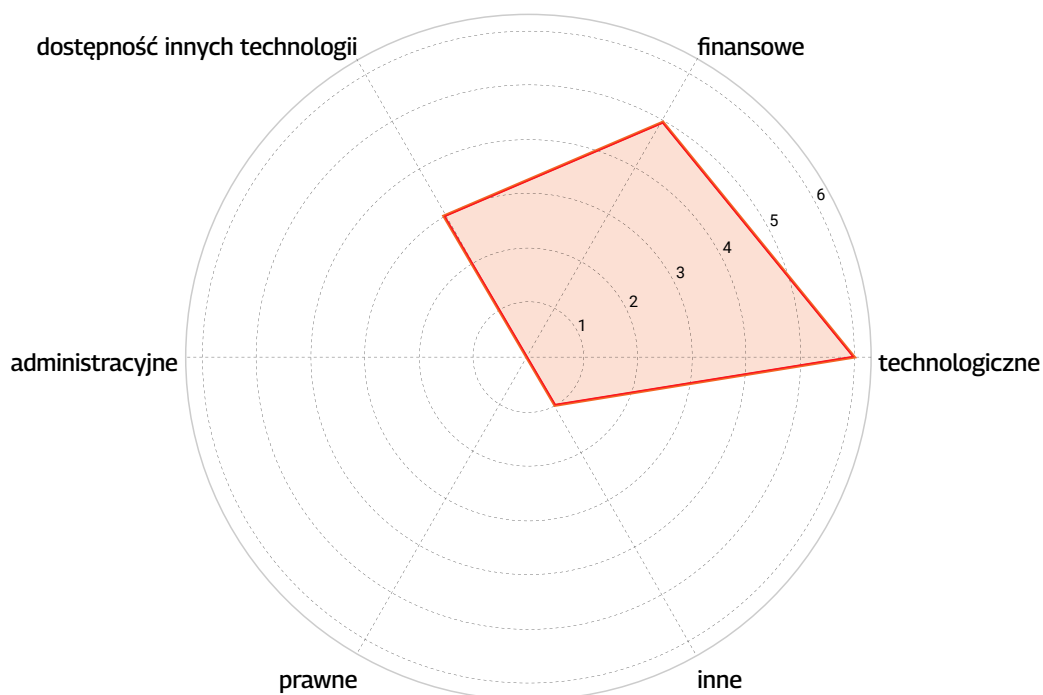
Najczęściej wymienianą korzyścią jest możliwość tworzenia bardziej innowacyjnych produktów (5 wskazań), co podkreśla potencjał tej technologii w rozwijaniu nowatorskich rozwiązań. Produkcja na żądanie (4 wskazania) oraz ułatwienie prototypowania nowych produktów (3 wskazania) także wskazują na elastyczność i przyspieszenie procesów projektowych. Dodatkowo, personalizacja produktów oraz elastyczność produkcji (po 3 wskazania) odzwierciedlają znaczenie technologii w dostosowywaniu się do dynamicznych potrzeb rynku.

Druk 3D w elektronice przyczynia się do większej innowacyjności, skrócenia czasu wprowadzania produktów na rynek i zwiększenia możliwości dostosowywania ich do indywidualnych potrzeb. Te cechy wskazują na strategiczne znaczenie tej technologii dla firm dążących do poprawy konkurencyjności i efektywności produkcji.

Największe bariery wdrożeniowe technologii 3D w elektronice

Czego dotyczy:

Identyfikuje główne wyzwania, takie jak koszty początkowe, ograniczenia materiałowe i potrzeba automatyzacji.



Największymi barierami we wdrażaniu technologii druku 3D w elektronice są przeszkody technologiczne (6 wskazań) oraz finansowe (5 wskazań). Problemy technologiczne obejmują niski poziom gotowości technologicznej, ograniczoną niezawodność oraz trudności w druku wielomateriałowym. Bariery finansowe wynikają głównie z wysokich kosztów sprzętu i implementacji, co znacząco utrudnia adopcję tej technologii. Dodatkowo, dostępność innych technologii (3 wskazania) wskazuje na konkurencyjność bardziej tradycyjnych rozwiązań.

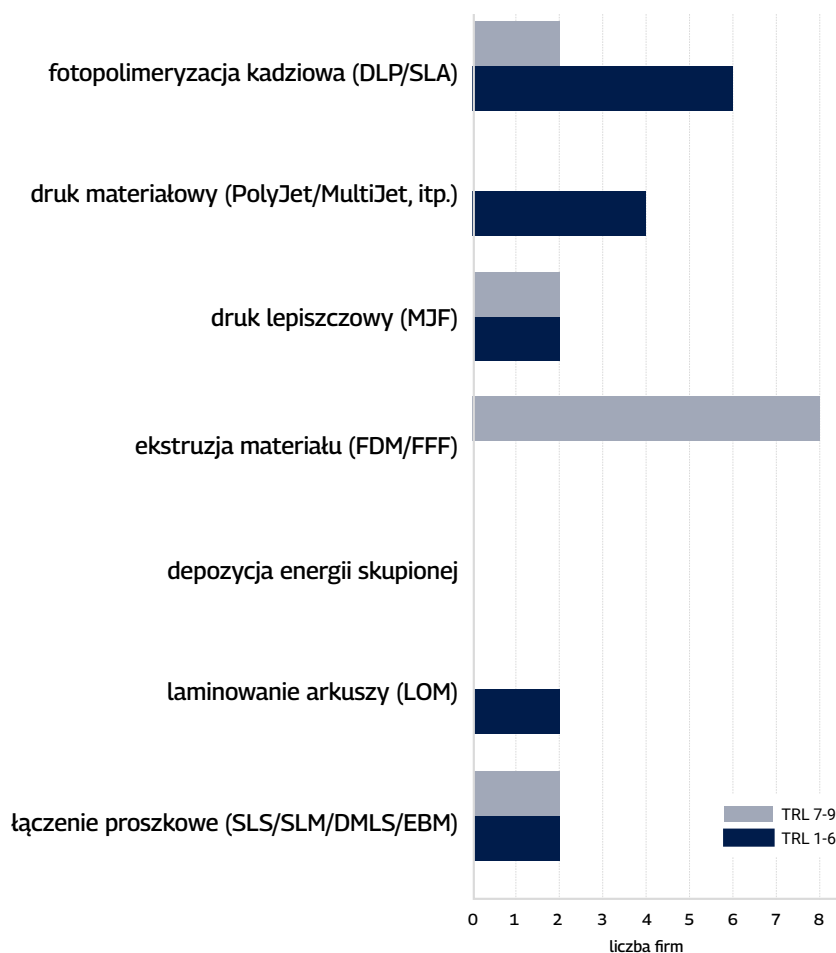
Kluczowe dla pokonania tych barier będą dalsze inwestycje w badania i rozwój, redukcja kosztów materiałów oraz sprzętu, a także edukacja rynku na temat korzyści z zastosowania druku 3D. Warto również skupić się na rozwijaniu niszowych rynków, takich jak produkty luksusowe, które mogą lepiej absorbować innowacyjne technologie.

Poziom gotowości technologicznej TRL wśród technologii wykorzystywanych przez respondentów

Czego dotyczy:

Przedstawia poziom zaawansowania technologicznego (TRL) używanych technologii, od TRL 1-6 (wczesne etapy) do TRL 7-9 (gotowe do wdrożenia).

Poziomy gotowości technologicznej (TRL) dla technologii druku 3D



Wykres pokazuje, że najwyższy poziom gotowości technologicznej (TRL 7-9) osiąga technologia ekstruzji materiału (FDM/FFF), co wskazuje na jej zaawansowanie i gotowość do zastosowań przemysłowych. Technologie takie jak fotopolimeryzacja kadziowa (DLP/SLA) oraz druk lepiszczowy (MJF) również osiągają TRL 7-9, ale w mniejszym stopniu. Druk materiałowy oraz technologie proszkowe dominują w niższych poziomach TRL (1-6), co sugeruje konieczność dalszego rozwoju tych technologii.

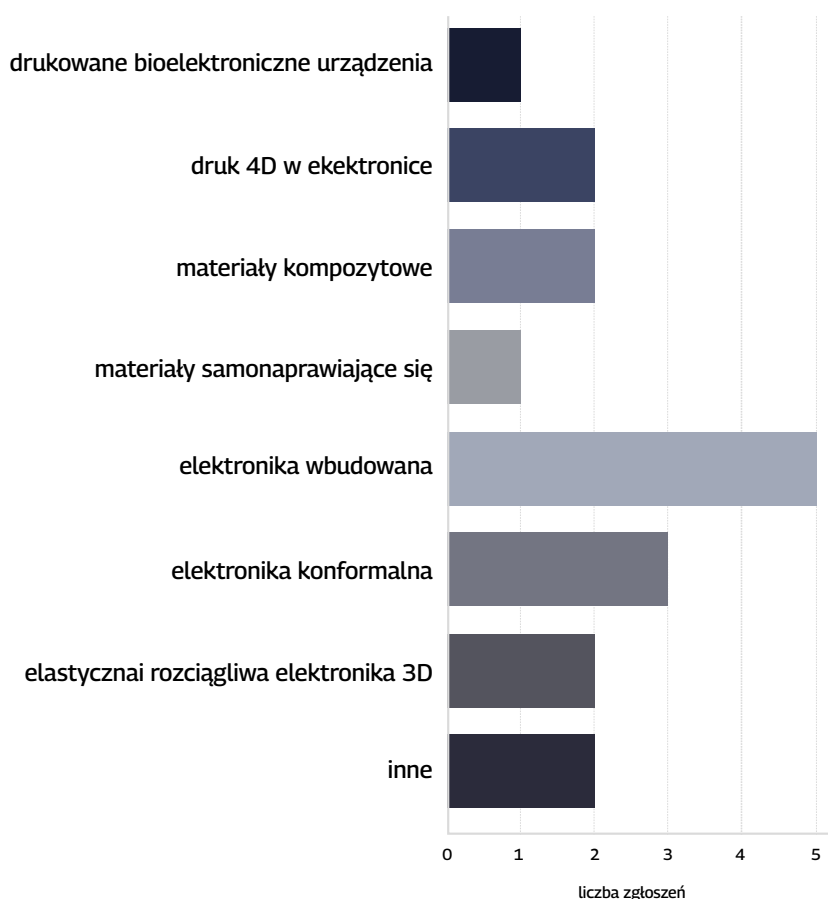
Ekstruzja materiału (FDM/FFF) jest najbardziej rozwiniętą technologią i nadaje się do szerokiego zastosowania przemysłowego. Inne technologie, zwłaszcza o niższym TRL, wymagają dalszych inwestycji w badania i rozwój, aby zwiększyć ich dojrzałość i konkurencyjność. Warto skoncentrować się na wspieraniu innowacji w mniej zaawansowanych technologiach, aby umożliwić ich szersze zastosowanie.

Zastosowanie technologii druku 3D w różnych sektorach

Czego dotyczy:

Prezentuje sektory, w których technologia druku 3D znajduje zastosowanie, takie jak medycyna, motoryzacja czy elektronika konsumencka.

Zastosowanie druku 3D w różnych sektorach



Najczęściej wymienianym zastosowaniem jest elektronika wbudowana (5 zgłoszeń), co wskazuje na jej istotną rolę w tworzeniu wielofunkcyjnych urządzeń elektronicznych. Elektronika konformalna (3 zgłoszenia) oraz elastyczna i rozciągliwa elektronika 3D (2 zgłoszenia) również zyskują na znaczeniu, szczególnie w kontekście innowacyjnych projektów w dziedzinie urządzeń noszonych czy medycyny.

Druk 3D w elektronice skupia się głównie na poprawie funkcjonalności istniejących produktów, takich jak czujniki czy urządzenia do przechowywania energii, a także na elastyczności projektowej w aplikacjach mobilnych i medycznych. Dane te potwierdzają, że technologia ta znajduje zastosowanie przede wszystkim w rozwijających się sektorach, które wymagają lekkich, elastycznych i zintegrowanych rozwiązań technologicznych. Ważnym kierunkiem rozwoju będzie dalsze wsparcie dla wbudowanych i konformalnych rozwiązań oraz rozwój materiałów samonaprawiających się.



Przegląd barier i wyzwań

Wprowadzenie

Implementacja technologii druku 3D w elektronice drukowanej napotyka na wiele wyzwań, które mogą hamować rozwój i wdrażanie nowych rozwiązań. W tej sekcji przedstawione zostaną kluczowe bariery technologiczne, ekonomiczne i organizacyjne, które zostały zidentyfikowane w ramach ankiety oraz analizy literatury. Podkreślimy również możliwe kierunki działań, które mogą pomóc w przezwyciężeniu tych trudności.

Główne bariery

■ Wysoki koszt sprzętu i procesów produkcyjnych

- ☐ Respondenci wskazali, że sprzęt do elektroniki drukowanej, szczególnie drukarki 3D i materiały specjalistyczne, są bardzo kosztowne.
- ☐ Koszty początkowe są znaczącą barierą, szczególnie dla małych i średnich przedsiębiorstw.
- ☐ Wysokie koszty wdrożenia technologii ograniczają skalę eksperymentowania i innowacji w tej dziedzinie.

■ Ograniczenia materiałowe

- ☐ Obecne materiały przewodzące, takie jak tusze czy pasty, nadal nie osiągają oczekiwanej wydajności i przewodnictwa.
- ☐ Wymagana jest większa różnorodność materiałów kompatybilnych z technologiami druku 3D, które jednocześnie spełniają wymagania techniczne i ekologiczne.

■ Potrzeba automatyzacji procesów

- ☐ Procesy produkcyjne związane z drukiem 3D w elektronice drukowanej są często czasochłonne i wymagają znacznej ingerencji manualnej.
- ☐ Brak automatyzacji w kluczowych etapach ogranicza skalowalność oraz efektywność operacyjną.

■ Problemy technologiczne

- ☐ Niska niezawodność i trwałość drukowanych komponentów w niektórych aplikacjach.
- ☐ Wyzwania związane z integracją elektroniki w złożonych strukturach 3D.
Niska dostępność gotowych rozwiązań wielomateriałowych, które pozwoliłyby na integrację elementów elektronicznych z drukiem 3D.

Proponowane rozwiązania

■ Inwestycje w rozwój materiałów przewodzących

- ☐ Stworzenie bardziej wydajnych i trwałych materiałów, które poprawią właściwości przewodzące i kompatybilność z technologiami druku 3D.
- ☐ Promowanie badań nad materiałami biodegradowalnymi, które mogą spełniać wymagania ekologiczne.

■ Wsparcie finansowe dla firm wdrażających technologie

- ☐ Dofinansowania w postaci grantów i subsydiów dla firm inwestujących w druk 3D i elektronikę drukowaną.
- ☐ Tworzenie programów wsparcia dla startupów i MŚP, które chcą rozpocząć działalność w tej branży.

■ Automatyzacja procesów

- ☐ Rozwój zautomatyzowanych systemów produkcji, które umożliwią integrację druku 3D i elektroniki w skali przemysłowej.
- ☐ Wdrożenie systemów monitorowania w czasie rzeczywistym, które poprawią kontrolę jakości i efektywność procesów.

■ Współpraca między przemysłem a środowiskiem akademickim

- ☐ Stworzenie platform współpracy umożliwiających wymianę wiedzy między firmami, uczelniami i jednostkami badawczymi.
- ☐ Realizacja wspólnych projektów badawczych, które przyczynią się do rozwoju nowych technologii i ich wdrożenia.

Podsumowanie

Przedstawione bariery i wyzwania są kluczowe dla zrozumienia, dlaczego tempo wdrażania technologii druku 3D w elektronice drukowanej może być ograniczone. Jednak zidentyfikowane rozwiązania wskazują, że istnieją realne możliwości poprawy sytuacji. Wspólne wysiłki branży, środowisk akademickich oraz instytucji finansujących mogą przyczynić się do przezwyciężenia tych barier, umożliwiając pełne wykorzystanie potencjału tych technologii.

Rekomendacje dla przemysłu i zielone perspektywy

W szybko rozwijającym się świecie technologii druku 3D i elektroniki drukowanej jednym z największych wyzwań pozostaje skuteczne wdrażanie nowych rozwiązań technologicznych na skalę przemysłową. W tej sekcji prezentujemy rekomendacje opracowane na podstawie analizy literatury, badań oraz wyników ankiety przeprowadzonej wśród partnerów projektu 3DoP. Naszym celem jest wskazanie kluczowych kierunków rozwoju, które pomogą branży sprostać takim wyzwaniom, jak automatyzacja procesów, redukcja kosztów produkcji czy wdrażanie zrównoważonych rozwiązań.

Technologie druku 3D i elektroniki drukowanej oferują ogromne możliwości, jednak pełne ich wykorzystanie wymaga dalszych inwestycji w innowacje oraz odpowiedzi na rosnące wyzwania związane z ekologią. W tej części raportu znajdziesz konkretne rekomendacje dotyczące rozwoju zaawansowanych materiałów, automatyzacji produkcji oraz integracji z zasadami zrównoważonego rozwoju, które mają coraz większe znaczenie w globalnym przemyśle.

Rekomendacje te zostały przygotowane z myślą o liderach branży i innowatorach technologicznych, aby inspirować ich do podejmowania działań, które przyspieszą rozwój sektora druku 3D i elektroniki drukowanej, jednocześnie promując odpowiedzialne i ekologiczne podejście do produkcji.

Kluczowe rekomendacje dla rozwoju przemysłu

Technologie druku 3D i elektroniki drukowanej oferują ogromny potencjał, ale wymagają przemysłowych działań i strategii, aby sprostać wyzwaniom i w pełni wykorzystać możliwości. Na podstawie analizy literatury oraz wyników ankiety przeprowadzonej wśród partnerów projektu 3DoP zidentyfikowano pięć kluczowych kierunków rozwoju:

1 Inwestycje w technologie o niższym poziomie gotowości technologicznej (TRL)

Technologie takie jak Material Jetting czy druk wielomateriałowy, choć wciąż we wczesnych fazach rozwoju, posiadają ogromny potencjał. Badania wykazują, że ich ograniczenia – m.in. niska niezawodność i brak optymalizacji – stanowią barierę w ich szerszym zastosowaniu. Zwiększenie nakładów na badania i rozwój tych technologii może umożliwić ich implementację w przemyśle, otwierając drzwi do bardziej złożonych zastosowań, takich jak drukowane obwody czy elementy sensoryczne.

2

Rozwój zaawansowanych materiałów przewodzących

Obecne tusze i pasty przewodzące często nie spełniają wymagań w zakresie przewodności i kompatybilności z technologiami druku 3D. Literatura oraz dane z ankiety wskazują na konieczność opracowania materiałów o lepszych parametrach, które umożliwią tworzenie trwałych i zaawansowanych struktur elektronicznych. Przykładowo, bardziej efektywne materiały mogłyby zrewolucjonizować produkcję elastycznych PCB i komponentów stosowanych w motoryzacji czy elektronice użytkowej.

3

Automatyzacja procesów produkcyjnych

Branża druku 3D zmagą się z potrzebą ręcznego montażu elementów elektronicznych, co wydłuża procesy i zwiększa koszty. Automatyzacja produkcji w duchu Przemysłu 4.0 mogłaby rozwiązać ten problem, oferując dodatkowo integrację inteligentnych systemów monitorowania i kontroli jakości w czasie rzeczywistym. Dzięki temu firmy mogłyby szybciej wprowadzać swoje produkty na rynek, minimalizując jednocześnie błędy produkcyjne i straty materiałowe.

4

Zrównoważony rozwój jako priorytet

Druk 3D może odegrać istotną rolę w ekologicznej transformacji przemysłu. Zastosowanie biodegradowalnych materiałów, recykling odpadów oraz optymalizacja procesów pod kątem zużycia energii to kluczowe kierunki, które pozwolą na redukcję śladu węglowego. Badania wskazują, że takie podejście ma szczególne znaczenie w sektorach medycznym i motoryzacyjnym, gdzie zrównoważone praktyki mogą zyskać dodatkową wartość.

5

Współpraca i wymiana wiedzy

Wyniki ankiety pokazują, że współpraca między firmami, instytucjami badawczymi i uniwersytetami jest kluczowa dla przyspieszenia innowacji. Inicjatywy wspierane przez fundusze unijne i krajowe mogą nie tylko ułatwić wdrażanie nowych rozwiązań, ale także promować zrównoważone podejście do produkcji. Budowanie sieci współpracy to również okazja do wymiany najlepszych praktyk i wspólnego tworzenia technologii przyszłości.

Podsumowując, druk 3D i elektronika drukowana mają potencjał do zrewolucjonizowania przemysłu, ale ich rozwój wymaga skoncentrowanych inwestycji w technologie, materiały i automatyzację. Branża, która skutecznie zareaguje na te wyzwania, nie tylko wyprzedzi konkurencję, ale również stanie się liderem innowacji na globalnym rynku.

Zrównoważony rozwój i ekologiczne perspektywy

■ Ograniczenie odpadów i recykling

Druk 3D pozwala ograniczyć ilość odpadów dzięki precyzyjnemu zużyciu materiałów. Wdrożenie zamkniętych obiegów materiałowych (closed-loop manufacturing) może stać się standardem w branży.

■ Ekologiczne materiały

Biodegradowalne polimery i ekologiczne tusze zawierające domieszki nowoczesnych materiałów takich jak grafen coraz bardziej zyskują na znaczeniu. Ich zastosowanie obejmuje jednorazowe sensory środowiskowe czy opatrunki medyczne, które łączą funkcjonalność z troską o środowisko.

■ Energooszczędne procesy produkcyjne

Rozwój maszyn o niskim zużyciu energii oraz optymalizacja procesów, takich jak druk w niskich temperaturach, mogą znacząco zmniejszyć ślad węglowy.

■ Zielona energia

Elektronika drukowana wspiera technologie zielonej energii, np. drukowane ogniwa fotowoltaiczne czy komponenty baterii o niższym wpływie na środowisko.

■ Perspektywy i wyzwania

Wysokie koszty ekologicznych technologii pozostają barierą, ale współpraca producentów, instytucji badawczych i rządów może przyspieszyć ich wdrażanie.

Trendy w druku 3D, czego nie możesz przegapić?

Druk 3D i elektronika drukowana będą coraz częściej stosowane w inteligentnych miastach (smart cities) oraz projektach promujących ekologiczne produkty.

Ekologiczne podejście to nie tylko trend, ale konieczność, która pozwoli branży druku 3D stać się bardziej konkurencyjną i przyczynić się do budowy zrównoważonej przyszłości.

Współpraca i wsparcie dla ekosystemu innowacji

Współpraca pomiędzy firmami, instytucjami badawczymi, startupami i organizacjami wspierającymi innowacje jest niezbędnym elementem rozwoju technologii druku 3D i elektroniki drukowanej. Dzięki wymianie wiedzy, zasobów i doświadczeń możliwe jest szybsze wdrażanie nowych rozwiązań oraz skuteczniejsze pokonywanie wyzwań stojących przed branżą.

Projekty takie jak 3DoP pokazują, jak skuteczne może być współdziałanie partnerów na arenie międzynarodowej w celu eksplorowania nowych możliwości technologicznych. Partnerstwa z uczelniami i ośrodkami badawczymi pozwalają na przeprowadzanie testów nowych rozwiązań w kontrolowanych warunkach, zanim zostaną one wdrożone na rynek, co zwiększa ich efektywność i bezpieczeństwo.

Wsparcie ekosystemu innowacji to także maksymalne wykorzystanie dostępnych funduszy krajowych i unijnych, które umożliwiają realizację zaawansowanych projektów badawczo-rozwojowych przy jednoczesnym ograniczaniu ryzyka finansowego. Dzięki takim środkom firmy mogą inwestować w przełomowe technologie i rozwijać nowatorskie pomysły, które bez odpowiedniego finansowania byłyby trudne do zrealizowania.

Budowanie sieci kontaktów i partnerstw biznesowych odgrywa kluczową rolę w lepszym zrozumieniu potrzeb rynku. Wspólne działania pozwalają na tworzenie rozwiązań, które nie tylko odpowiadają na realne wyzwania przemysłu, ale także budują fundamenty dla bardziej zrównoważonego i innowacyjnego przyszłościowego przemysłu.

Podsumowując, współpraca w ramach ekosystemu innowacji to siła napędowa zmian technologicznych. To dzięki niej branża może rozwijać się szybciej, skuteczniej i bardziej odpowiedzialnie, dostarczając rozwiązania, które mają rzeczywisty wpływ na rozwój gospodarczy i społeczny.





Czy technologia druku 3D i elektroniki drukowanej może zmienić przyszłość przemysłu?

Wyniki raportu pokazują, że te dynamicznie rozwijające się technologie nie tylko oferują nowe możliwości, ale stają się katalizatorem transformacji w wielu sektorach – od medycyny, przez motoryzację, aż po elektronikę użytkową.

Najważniejsze wnioski:

Druk 3D to technologia z przyszłości, która działa już dziś.

Precyzja, personalizacja i redukcja odpadów to tylko kilka z zalet, które sprawiają, że tradycyjne metody produkcji muszą ustąpić miejsca innowacjom. Drukowane implanty w medycynie, elastyczne komponenty w motoryzacji czy inteligentne ubrania to przykłady zastosowań, które jeszcze niedawno były jedynie marzeniem.

Materiały to klucz do dalszego rozwoju.

Inwestycje w nowe tusze przewodzące, nanomateriały czy biodegradowalne polimery przyspieszają rozwój tych technologii. Materiały te nie tylko zwiększają funkcjonalność, ale również wspierają zrównoważony rozwój, co staje się priorytetem na globalnym rynku.

Zrównoważony rozwój to nie moda – to konieczność.

Redukcja śladu węglowego, minimalizacja odpadów i wykorzystanie odnawialnych źródeł energii to nie tylko wyzwania, ale także szanse na budowanie przewagi konkurencyjnej. W 2025 roku firmy, które postawią na ekologię, zyskają nie tylko klientów, ale i stabilną pozycję w zmieniającym się krajobrazie przemysłowym.

Automatyzacja to przyszłość produkcji.

Wdrożenie idei Przemysłu 4.0 pozwoli na bardziej efektywną, skalowalną i opłacalną produkcję. Systemy oparte na IoT i sztucznej inteligencji umożliwią monitorowanie jakości i korektę błędów w czasie rzeczywistym, a co za tym idzie redukcję ilości odpadów oraz obniżenie kosztów.

Kluczem do sukcesu jest współpraca.

Efektywny transfer technologii z laboratoriów do przemysłu wymaga współdziałania firm, instytucji badawczych i uczelni. Konsorcja, takie jak 3DoP, pokazują, że razem można więcej – szybciej wdrażać innowacje, eliminować bariery i wspierać transformację w kierunku bardziej zrównoważonej gospodarki.

Perspektywy na przyszłość

Druk 3D stanie się nową normą. Zastosowanie technologii druku w elektronice elastycznej, opatrunkach medycznych czy ogniwach fotowoltaicznych to tylko początek. W nadchodzących latach drukowane komponenty znajdą się w każdym domu, samochodzie i biurze, redefiniując sposób, w jaki myślimy o produkcji.

Ekologia i ekonomia w jednym. Zrównoważone technologie nie tylko poprawią wizerunek firm, ale również przyniosą wymierne oszczędności. Recykling materiałów, druk na żądanie i lokalna produkcja to kroki w kierunku gospodarki cyrkularnej.

Inteligentne rozwiązania będą standardem. W 2030 roku drukowana elektronika stanie się integralną częścią inteligentnych miast. Od sensorów monitorujących jakość powietrza po elastyczne ekrany wbudowane w infrastrukturę – druk 3D stworzy nowe możliwości, których nie jesteśmy jeszcze w stanie w pełni przewidzieć.

Ten raport to przewodnik po możliwościach, które już dziś mogą wpłynąć na przyszłość Twojej firmy. Inwestuj w nowe technologie, rozwijaj współpracę z partnerami i bądź częścią rewolucji, która zmienia zasady gry. Druk 3D to nie przyszłość – to teraźniejszość, która buduje lepsze jutro.



Literatura

1. Lee, J.; Kim, H.C.; Choi, J.W.; Lee, I.H. A Review on 3D Printed Smart Devices for 4D Printing. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.* 2017, 4, 373–383, doi:10.1007/s40684-017-0042-x.
2. Fiedor, P.; Ortyl, J. A New Approach to Micromachining: High-Precision and Innovative Additive Manufacturing Solutions Based on Photopolymerization Technology. *Materials* (Basel). 2020, 13, 1–25, doi:10.3390/ma13132951.
3. Ntounoglou, K.; Stavropoulos, P.; Mourtzis, D. 4D Printing Prospects for the Aerospace Industry: A Critical Review. *Procedia Manuf.* 2018, 18, 120–129, doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.11.016.
4. Fu, X.; Lin, Y.; Yue, X.-J.; XunMa, H.; Yue, X.-Z. A Review of Additive Manufacturing (3D Printing) in Aerospace: Technology, Materials, Applications, and Challenges. *Mobile Wireless Middleware, Operating Systems and Applications*; Tang, D., Zhong, J., Zhou, D., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2022; pp. 73–98.
5. Xiao, Y.-Q.; Kan, C.-W. Review on Development and Application of 3D-Printing Technology in Textile and Fashion Design. *Coatings* 2022, 12.
6. Dewan, P.; Singh, M.; Mittal, M.; Kaur, H.; Gandhi, N. From Fiction to Miracles: An Analysis of 3D Printed Organs. In *Proceedings of the 2024 11th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*; 2024; pp. 517–523.
7. Whitaker, M. The History of 3D Printing in Healthcare. *Bull. R. Coll. Surg. Engl.* 2014, 96, 228–229, doi:10.1308/147363514X13990346756481.
8. Horvath, J. A Brief History of 3D Printing. In *Mastering 3D Printing*; Horvath, J., Ed.; Apress: Berkeley, CA, 2014; pp. 3–10 ISBN 978-1-4842-0025-4.
9. Lengua, C.A.G. History of Rapid Prototyping. In *Rapid Prototyping in Cardiac Disease: 3D Printing the Heart*; Farooqi, K.M., Ed.; Springer International Publishing: Cham, 2017; pp. 3–7 ISBN 978-3-319-53523-4.
10. Brooks, M. The Day the World Became 3D. *New Sci.* 2016, 232, 40–41, doi:https://doi.org/10.1016/S0262-4079(16)31941-8.
11. Schmid, M. Selektives Lasersintern (SLS) BT - Additive Fertigung Mit Selektivem Lasersintern (SLS): Prozess- Und Werkstoffüberblick. In *Schmid, M., Ed.; Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, 2015; pp. 9–28 ISBN 978-3-658-12289-8.*
12. Matias, E.; Rao, B. 3D Printing: On Its Historical Evolution and the Implications for Business. In *Proceedings of the 2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*; 2015; pp. 551–558.
13. Nulty, A.B. 3D Printing Part 1 - A History and Literature Review Of 3D Printing in Dentistry. *Preprints* 2021.
14. Robles Martinez, P.; Basit, A.W.; Gaisford, S. The History, Developments and Opportunities of Stereolithography. In *3D Printing of Pharmaceuticals*; Basit, A.W., Gaisford, S., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2018; pp. 55–79 ISBN 978-3-319-90755-0.
15. Shahrudin, N.; Lee, T.C.; Ramlan, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manuf.* 2019, 35, 1286–1296, doi:10.1016/j.promfg.2019.06.089.
16. Jandyal, A.; Chaturvedi, I.; Wazir, I.; Raina, A.; Ul Haq, M.I. 3D Printing - A Review of Processes, Materials and Applications in Industry 4.0. *Sustain. Oper. Comput.* 2022, 3, 33–42, doi:https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004.
17. Zayed, A.H.H.; Itum, M.J.; Zahin, N.M.; Rashid, M. Bin; Hoque, M.E. Direct Metal Laser Sintering of Aeroengine Materials. In *Advances in Manufacturing for Aerospace Alloys*; Gürgen, S., Ed.; Springer Nature Switzerland: Cham, 2024; pp. 163–179 ISBN 978-3-031-64455-9.
18. Shuaib, M.; Haleem, A.; Kumar, S.; Javaid, M. Impact of 3D Printing on the Environment: A Literature-Based Study. *Sustain. Oper. Comput.* 2021, 2, 57–63, doi:https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.04.001.
19. Shahrudin, N.; Lee, T.C.; Ramlan, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manuf.* 2019, 35, 1286–1296, doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089.
20. Bahati, D.; Bricha, M.; El Mabrouk, K. Vat Photopolymerization Additive Manufacturing Technology for Bone Tissue Engineering Applications. *Adv. Eng. Mater.* 2023, 25, 1–13, doi:10.1002/adem.202200859.
21. Chekkaramkodi, D.; Jacob, L.; C, M.S.; Umer, R.; Butt, H. Review of Vat Photopolymerization 3D Printing of Photonic Devices. *Addit. Manuf.* 2024, 86, 104189, doi:10.1016/j.addma.2024.104189.
22. Topa, M.; Ortyl, J. Moving towards a Finer Way of Light-Cured Resin-Based Restorative Dental Materials: Recent Advances in Photoinitiating Systems Based on Iodonium Salts. *Materials* (Basel). 2020, 13, doi:10.3390/ma13184093.
23. Orzeł, B.; Stecula, K. Comparison of 3D Printout Quality from FDM and MSLA Technology in Unit Production. *Symmetry* (Basel). 2022, 14.
24. Taormina, G.; Sciancalepore, C.; Messori, M.; Bondioli, F. 3D Printing Processes for Photocurable Polymeric Materials: Technologies, Materials, and Future Trends. *J. Appl. Biomater. Funct. Mater.* 2018, 16, 151–160, doi:10.1177/2280800018764770.
25. Yap, Y.L.; Yeong, W.Y. Additive Manufacture of Fashion and Jewellery Products: A Mini Review. *Virtual Phys. Prototyp.* 2014, 9, 195–201, doi:10.1080/17452759.2014.938993.
26. Haidiezul, A.H.M.; Aiman, A.F.; Bakar, B. Surface Finish Effects Using Coating Method on 3D Printing (FDM) Parts. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, 318, 12065, doi:10.1088/1757-899X/318/1/012065.
27. Rodríguez-Reyna, S.L.; Mata, C.; Díaz-Aguilera, J.H.; Acevedo-Parra, H.R.; Tapia, F. Mechanical Properties Optimization for PLA, ABS and Nylon + CF Manufactured by 3D FDM Printing. *Mater. Today Commun.* 2022, 33, 104774, doi:https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104774.
28. Alarifi, I.M. A Performance Evaluation Study of 3D Printed Nylon/Glass Fiber and Nylon/Carbon Fiber Composite Materials. *J. Mater. Res. Technol.* 2022, 21, 884–892, doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.085.
29. Shakiba, M.; Rezvani Ghomi, E.; Khosravi, F.; Jouybar, S.; Bigham, A.; Zare, M.; Abdouss, M.; Moaref, R.; Ramakrishna, S. Nylon—A Material Introduction and Overview for Biomedical Applications. *Polym. Adv. Technol.* 2021, 32, 3368–3383, doi:10.1002/pat.5372.
30. Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. "3D Printing." *Encyclopedia Britannica*, October 15, 2024. <https://www.Britannica.com/Technology/3D-Printing>.
31. Wang, X.; Jiang, M.; Zhou, Z.; Gou, J.; Hui, D. 3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective. *Compos. Part B Eng.* 2017, 110, 442–458, doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
32. Kushwaha, A.K.; Rahman, M.H.; Slater, E.; Patel, R.; Evangelista, C.; Austin, E.; Tompkins, E.; McCarroll, A.; Rajak, D.K.; Menezes, P.L. 1 - Powder Bed Fusion-Based Additive Manufacturing: SLS, SLM, SHS, and DMLS. In *Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering*; Kumar, P., Misra, M., Menezes, P.L.B.T.-T. of A.M.M., Eds.; Elsevier, 2022; pp. 1–37 ISBN 978-0-12-821328-5.

33. Wawryniuk, Z.; Brancewicz-Steinmetz, E.; Sawicki, J. Revolutionizing Transportation: An Overview of 3D Printing in Aviation, Automotive, and Space Industries. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2024, 134, 3083–3105, doi:10.1007/s00170-024-14226-y.
34. Mooraj, S.; Qi, Z.; Zhu, C.; Ren, J.; Peng, S.; Liu, L.; Zhang, S.; Feng, S.; Kong, F.; Liu, Y.; et al. 3D Printing of Metal-Based Materials for Renewable Energy Applications. *Nano Res.* 2021, 14, 2105–2132, doi:10.1007/s12274-020-3230-x.
35. Stolt, R.; Elgh, F. Introducing Design for Selective Laser Melting in Aerospace Industry. *J. Comput. Des. Eng.* 2020, 7, 489–497, doi:10.1093/jcde/qwaa042.
36. Chin, S.Y.; Dikshit, V.; Meera Priyadarshini, B.; Zhang, Y. Powder-Based 3D Printing for the Fabrication of Device with Micro and Mesoscale Features. *Micromachines* 2020, 11.
37. Li, M.; Du, W.; Elwany, A.; Pei, Z.; Ma, C. Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2020, 142, doi:10.1115/1.4047430.
38. Ziaee, M.; Crane, N.B. Binder Jetting: A Review of Process, Materials, and Methods. *Addit. Manuf.* 2019, 28, 781–801, doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031.
39. Du, W.; Ren, X.; Pei, Z.; Ma, C. Ceramic Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review on Density. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2020, 142, doi:10.1115/1.4046248.
40. Gokuldoss, P.K.; Kolla, S.; Eckert, J. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials (Basel)*. 2017, 10.
41. Miyanaji, H.; Orth, M.; Akbar, J.M.; Yang, L. Process Development for Green Part Printing Using Binder Jetting Additive Manufacturing. *Front. Mech. Eng.* 2018, 13, 504–512, doi:10.1007/s11465-018-0508-8.
42. Nachum, S.; Vogt, J.; Raether, F. Additive Manufacturing of Ceramics: Stereolithography versus Binder Jetting. *CFI Ceram. Forum Int.* 2016, 93, E27–E33.
43. MacDonald, E.; Salas, R.; Espalin, D.; Perez, M.; Aguilera, E.; Muse, D.; Wicker, R.B. 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics. *IEEE Access* 2014, 2, 234–242, doi:10.1109/ACCESS.2014.2311810.
44. Karkun, M.S.; Dharmalingam, S. 3D Printing Technology in Aerospace Industry – A Review. *Int. J. Aviat. Aeronaut. Aerosp.* 2022, 9, doi:10.15394/ijaaa.2022.1708.
45. Mishra, S. Application of 3D Printing in Medicine. *Indian Heart J.* 2016, 68, 108–109, doi:10.1016/j.ihj.2016.01.009.
46. Pugliese, R.; Beltrami, B.; Regondi, S.; Lunetta, C. Polymeric Biomaterials for 3D Printing in Medicine: An Overview. *Ann. 3D Print. Med.* 2021, 2, 100011, doi:https://doi.org/10.1016/j.stlm.2021.100011.
47. Balavigneswaran, C.K.; Selvaraj, S.; Vasudha, T.K.; Iniyan, S.; Muthuvijayan, V. Tissue Engineered Skin Substitutes: A Comprehensive Review of Basic Design, Fabrication Using 3D Printing, Recent Advances and Challenges. *Biomater. Adv.* 2023, 153, 213570, doi:https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213570.
48. Okolie, O.; Stachurek, I.; Kandasubramanian, B.; Njuguna, J. 3D Printing for Hip Implant Applications: A Review. *Polymers (Basel)*. 2020, 12.
49. Serrano, D.R.; Kara, A.; Yuste, I.; Luciano, F.C.; Ongoren, B.; Anaya, B.J.; Molina, G.; Diez, L.; Ramirez, B.I.; Ramirez, I.O.; et al. 3D Printing Technologies in Personalized Medicine, Nanomedicines, and Biopharmaceuticals. *Pharmaceutics* 2023, 15.
50. Joshi, S.C.; Sheikh, A.A. 3D Printing in Aerospace and Its Long-Term Sustainability. *Virtual Phys. Prototyp.* 2015, 10, 175–185, doi:10.1080/17452759.2015.1111519.
51. Martinez, D.W.; Espino, M.T.; Cascolan, H.M.; Crisostomo, J.L.; Dizon, J.R.C. A Comprehensive Review on the Application of 3D Printing in the Aerospace Industry. *Key Eng. Mater.* 2022, 913, 27–34, doi:10.4028/p-94a9zb.
52. Tuazon, B.J.; Custodio, N.A. V.; Basuel, R.B.; Delos Reyes, L.A.; Dizon, J.R.C. 3D Printing Technology and Materials for Automotive Application: A Mini-Review. *Key Eng. Mater.* 2022, 913, 3–16, doi:10.4028/p-26o076.
53. Kalender, M.; Kılıç, S.E.; Ersoy, S.; Bozkurt, Y.; Salman, S. Additive Manufacturing and 3D Printer Technology in Aerospace Industry. In *Proceedings of the 2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*; 2019; pp. 689–694.
54. Saleh, A.A.E. 3D Printing in Architecture, Engineering and Construction. *Ahmed Saleh /Engineering Res. J.* 2019, 162, 1–18.
55. BAÑÓN, C.; RASPALL, F. Additive Manufacturing Technologies for Architecture BT - 3D Printing Architecture: Workflows, Applications, and Trends. In: BAÑÓN, C., RASPALL, F., Eds.; Springer Singapore: Singapore, 2021; pp. 13–20 ISBN 978-981-15-8388-9.
56. Zhao, W.; Wang, Z.; Zhang, J.; Wang, X.; Xu, Y.; Ding, N.; Peng, Z. Vat Photopolymerization 3D Printing of Advanced Soft Sensors and Actuators: From Architecture to Function. *Adv. Mater. Technol.* 2021, 6, 1–31, doi:10.1002/admt.202001218.
57. Pan, Y.; Zhang, Y.; Zhang, D.; Song, Y. 3D Printing in Construction: State of the Art and Applications. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021, 115, 1329–1348, doi:10.1007/s00170-021-07213-0.
58. Han, Y.; Yang, Z.; Ding, T.; Xiao, J. Environmental and Economic Assessment on 3D Printed Buildings with Recycled Concrete. *J. Clean. Prod.* 2021, 278, 123884, doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123884.
59. Sakin, M.; Kiroglu, Y.C. 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia* 2017, 134, 702–711, doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562.
60. Tabassum, T.; Ahmad Mir, A.A. Review of 3D Printing Technology-the Future of Sustainable Construction. *Mater. Today Proc.* 2023, 93, 408–414, doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.013.
61. <https://www.archdaily.com/890494/interior-design-and-3d-printing-giving-unique-forms-to-functional-spaces> (20.10.2024).
62. Arvanitidi, E.; Drosos, C.; Theocharis, E.; Papoutsidakis, M. 3D Printing and Education. *Int. J. Comput. Appl.* 2019, 177, 55–59, doi:10.5120/ijca2019919711.
63. Assante, D.; Cennamo, G.M.; Placidi, L. 3D Printing in Education: An European Perspective. In *Proceedings of the 2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*; 2020; pp. 1133–1138.
64. Zhang, T.; Cummings, M.; Dulay, M.T. An Outreach/Learning Activity for STEAM Education via the Design and 3D Printing of an Accessible Periodic Table. *J. Chem. Educ.* 2022, 99, 3355–3359, doi:10.1021/acs.jchemed.2c00186.
65. Boy, G.A. From STEM to STEAM: Towards Human-Centred Education, Creativity & Learning Thinking. In *Proceedings of the Proceedings of the 31st European Conference on Cognitive Ergonomics*; Association for Computing Machinery: New York, NY, USA, 2013.
66. Khyzhynskiy, V.; Lampeka, M.; Strilets, V. The History of the Development of 3D Printing Technologies and Their Use in World Artistic Ceramics; 2024; Vol. 14; ISBN 0000000284509.
67. <https://www.superpixelsinc.com/post/miss-universe-singapore-s-journey-to-a-3d-printed-orchid-dress> (20.10.2024).
68. Chen, T.; Lin, Y.C. Feasibility Evaluation and Optimization of a Smart Manufacturing System Based on 3D Printing: A Review. *Int. J. Intell. Syst.* 2017, 32, 394–413, doi:10.1002/int.21866.
69. Santander, P.; Cruz Sanchez, F.A.; Boudaoud, H.; Camargo, M. Closed Loop Supply Chain Network for Local and Distributed Plastic Recycling for 3D Printing: A MILP-Based Optimization Approach. *Resour. Conserv. Recycl.* 2020, 154, 104531, doi:https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104531.

70. Shahpasand, R.; Talebian, A.; Mishra, S. (Sabya) Investigating Environmental and Economic Impacts of the 3D Printing Technology on Supply Chains: The Case of Tire Production. *J. Clean. Prod.* 2023, 390, 135917, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135917>.
71. Thakkar, C.M.; Parkhe, S.S.; Jain, A.; Phasinam, K.; Murugesan, G.; Ventayen, R.J.M. 3d Printing: Basic Principles and Applications. *Mater. Today Proc.* 2022, 51, 842–849, doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.272>.
72. Espera, A.H.; Dizon, J.R.C.; Chen, Q.; Advincula, R.C. 3D-Printing and Advanced Manufacturing for Electronics. *Prog. Addit. Manuf.* 2019, 4, 245–267, doi:[10.1007/s40964-019-00077-7](https://doi.org/10.1007/s40964-019-00077-7).
73. Sachs, E.; Cima, M.; Williams, P.; Brancazio, D.; Cornie, J. Three Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from CAD Model. *J. Eng. Ind.* 1992, 114, 481–488, doi:[10.1115/1.2900701](https://doi.org/10.1115/1.2900701).
74. Tan, H.W.; An, J.; Chua, C.K.; Tran, T. Metallic Nanoparticle Inks for 3D Printing of Electronics. *Adv. Electron. Mater.* 2019, 5, doi:[10.1002/aelm.201800831](https://doi.org/10.1002/aelm.201800831).
75. Flowers, P.F.; Reyes, C.; Ye, S.; Kim, M.J.; Wiley, B.J. 3D Printing Electronic Components and Circuits with Conductive Thermoplastic Filament. *Addit. Manuf.* 2017, 18, 156–163, doi:[10.1016/j.addma.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.002).
76. Goh, G.L.; Zhang, H.; Chong, T.H.; Yeong, W.Y. 3D Printing of Multilayered and Multimaterial Electronics: A Review. *Adv. Electron. Mater.* 2021, 7, 1–28, doi:[10.1002/aelm.202100445](https://doi.org/10.1002/aelm.202100445).
77. Ahmadloo, M.; Mousavi, P. Application of Novel Integrated Dielectric and Conductive Ink 3D Printing Technique for Fabrication of Conical Spiral Antennas. In *Proceedings of the 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*; 2013; pp. 780–781.
78. Espalin, D.; Muse, D.W.; MacDonald, E.; Wicker, R.B. 3D Printing Multifunctionality: Structures with Electronics. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014, 72, 963–978, doi:[10.1007/s00170-014-5717-7](https://doi.org/10.1007/s00170-014-5717-7).
79. Alhassoon, K.; Malallah, Y.; Daryoush, A.S. RF Characterization of 3-D-Printed Material for Antenna Applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2023, 71, 7073–7080, doi:[10.1109/TAP.2023.3291083](https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3291083).
80. Liu, S.; Shi, X.; Li, X.; Sun, Y.; Zhu, J.; Pei, Q.; Liang, J.; Chen, Y.A. General Gelation Strategy for 1D Nanowires: Dynamically Stable Functional Gels for 3D Printing Flexible Electronics. *Nanoscale* 2018, 10, 20096–20107, doi:[10.1039/c8nr06369a](https://doi.org/10.1039/c8nr06369a).
81. Yang, H.; Leow, W.R.; Chen, X. 3D Printing of Flexible Electronic Devices. *Small Methods* 2018, 2, 1–7, doi:[10.1002/smt.201700259](https://doi.org/10.1002/smt.201700259).
82. Dong, Y.; Min, X.; Kim, W.S. A 3-D-Printed Integrated PCB-Based Electrochemical Sensor System. *IEEE Sens. J.* 2018, 18, 2959–2966, doi:[10.1109/JSEN.2018.2801459](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2801459).
83. Lu, B.H.; Lan, H.B.; Liu, H.Z. Additive Manufacturing Frontier: 3D Printing Electronics. *Opto-Electronic Adv.* 2018, 1, 1–10, doi:[10.29026/oea.2018.170004](https://doi.org/10.29026/oea.2018.170004).
84. Nadagouda, M.N.; Rastogi, V.; Ginn, M.A. Review on 3D Printing Techniques for Medical Applications. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 2020, 28, 152–157, doi:<https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.05.007>.
85. Javadi, M.; Haleem, A.; Singh, R.P.; Suman, R. 3D Printing Applications for Healthcare Research and Development. *Glob. Heal. J.* 2022, 6, 217–226, doi:<https://doi.org/10.1016/j.glohj.2022.11.001>.
86. Tan, H.W.; Choong, Y.Y.C.; Kuo, C.N.; Low, H.Y.; Chua, C.K. 3D Printed Electronics: Processes, Materials and Future Trends. *Prog. Mater. Sci.* 2022, 127, 100945, doi:[10.1016/j.pmatsci.2022.100945](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100945).
87. Elder, B.; Neupane, R.; Tokita, E.; Ghosh, U.; Hales, S.; Kong, Y.L. Nanomaterial Patterning in 3D Printing. *Adv. Mater.* 2020, 32, 1–42, doi:[10.1002/adma.201907142](https://doi.org/10.1002/adma.201907142).
88. Rao, C.H.; Avinash, K.; Varaprasad, B.K.S.V.L.; Goel, S.A. Review on Printed Electronics with Digital 3D Printing: Fabrication Techniques, Materials, Challenges and Future Opportunities. *J. Electron. Mater.* 2022, 51, 2747–2765, doi:[10.1007/s11664-022-09579-7](https://doi.org/10.1007/s11664-022-09579-7).
89. Zhao, C.; Wang, J.; Lu, L. Preparation and Application of Water-Based Nano-Silver Conductive Ink in Paper-Based 3D Printing. *Rapid Prototyp. J.* 2022, 28, 747–755, doi:[10.1108/RPJ-05-2020-0112](https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2020-0112).
90. Gu, J.; Lee, J.; Kang, S. 3D Electronic Sensors for Bio-Interfaced Electronics and Soft Robotics. *Adv. Sens. Res.* 2023, 2, 1–31, doi:[10.1002/adsr.202300013](https://doi.org/10.1002/adsr.202300013).
91. Fekiri, C.; Kim, H.C.; Lee, I.H. 3D-Printable Carbon Nanotubes-Based Composite for Flexible Piezoresistive Sensors. *Materials (Basel)* 2020, 13.
92. Kalkal, A.; Kumar, S.; Kumar, P.; Pradhan, R.; Willander, M.; Packirisamy, G.; Kumar, S.; Malhotra, B.D. Recent Advances in 3D Printing Technologies for Wearable (Bio)Sensors. *Addit. Manuf.* 2021, 46, 102088, doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102088>.
93. Yi, Q.; Najafkoshnoo, S.; Das, P.; Noh, S.; Hoang, E.; Kim, T.; Esfandyarpour, R. All-3D-Printed, Flexible, and Hybrid Wearable Bioelectronic Tactile Sensors Using Biocompatible Nanocomposites for Health Monitoring. *Adv. Mater. Technol.* 2022, 7, 1–13, doi:[10.1002/admt.202101034](https://doi.org/10.1002/admt.202101034).
94. Kim, K.; Kim, B.; Lee, C.H. Printing Flexible and Hybrid Electronics for Human Skin and Eye-Interfaced Health Monitoring Systems. *Adv. Mater.* 2020, 32, 1–22, doi:[10.1002/adma.201902051](https://doi.org/10.1002/adma.201902051).
95. Criado-Gonzalez, M.; Dominguez-Alfaro, A.; Lopez-Larrea, N.; Alegret, N.; Mecerreyes, D. Additive Manufacturing of Conducting Polymers: Recent Advances, Challenges, and Opportunities. *ACS Appl. Polym. Mater.* 2021, 3, 2865–2883, doi:[10.1021/acscpm.1c00252](https://doi.org/10.1021/acscpm.1c00252).
96. Elhadad, A.A.; Rosa-Sainz, A.; Cañete, R.; Peralta, E.; Begines, B.; Balbuena, M.; Alcudia, A.; Torres, Y. Applications and Multidisciplinary Perspective on 3D Printing Techniques: Recent Developments and Future Trends. *Mater. Sci. Eng. R Reports* 2023, 156, 100760, doi:<https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100760>.
97. Zou, Z.; Chen, Y.; Yuan, S.; Luo, N.; Li, J.; He, Y. 3D Printing of Liquid Metals: Recent Advancements and Challenges. *Adv. Funct. Mater.* 2023, 33, 1–23, doi:[10.1002/adfm.202213312](https://doi.org/10.1002/adfm.202213312).
98. Raja, S.; Mustafa, W. A.; Ghadir, G. K.; Al-Tmimi, H. M.; Alani, Z. K.; Rusho, M. A.; Rajeswari, N. Unlocking the Potential of Polymer 3D Printed Electronics: Challenges and Solutions. *Applied Chem. Eng.* 2024, 7, doi:<https://doi.org/10.59429/ace.v7i2.3877>.
99. Bastola, A.; He, Y.; Im, J.; Rivers, G.; Wang, F.; Worsley, R.; Austin, J.S.; Nelson-Dummett, O.; Wildman, R.D.; Hague, R.; et al. Formulation of Functional Materials for Inkjet Printing: A Pathway towards Fully 3D Printed Electronics. *Mater. Today Electron.* 2023, 6, 100058, doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2023.100058>.
100. Wang, P.; Li, J.; Yang, J.; Wang, G.; He, L.; Zhang, H. Enabling 3D Multilayer Electronics through the Hybrid of Vat Photopolymerization and Laser-Activated Selective Metallization. *Addit. Manuf.* 2023, 74, 103717, doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103717>.
101. Rafael, R.; Chan, P.K.L. Copper Composites and Laser Sintering: Novel Hybridization Method for 3D Printed Electronics. *Adv. Mater. Technol.* 2023, 8, 1–10, doi:[10.1002/admt.202201900](https://doi.org/10.1002/admt.202201900).
102. Stoma, M. 3D Printed Electronics with Nanomaterials. *Nanoscale* 2023, 15, 5623–5648, doi:[10.1039/d2nr06771d](https://doi.org/10.1039/d2nr06771d).
103. Yamagishi, K.; Ching, T.; Chian, N.; Tan, M.; Zhou, W.; Huang, S.Y.; Hashimoto, M. Flexible and Stretchable Liquid-Metal Microfluidic Electronics Using Directly Printed 3D Microchannel Networks. *Adv. Funct. Mater.* 2024, 34, 1–11, doi:[10.1002/adfm.202311219](https://doi.org/10.1002/adfm.202311219).

104. Rane, N.; Choudhary, S.; Rane, J. Enhanced Product Design and Development Using Artificial Intelligence (AI), Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), 4D/5D/6D Printing, Internet of Things (IoT), and Blockchain: A Review. *SSRN Electron. J.* 2023, doi:10.2139/ssrn.4644059.
105. Lai, J.; Wang, X.; Zhao, Q.; Zhang, C.; Gong, T.; He, L.; Wang, Z.; Xia, H. 3D Printing Self-Healing and Self-Adhesive Elastomers for Wearable Electronics in Amphibious Environments. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2024, 16, 16880–16892, doi:10.1021/acsami.4c01568.
106. Luo, X.; Wan, R.; Zhang, Z.; Song, M.; Yan, L.; Xu, J.; Yang, H.; Lu, B. 3D-Printed Hydrogel-Based Flexible Electrochromic Device for Wearable Displays. *Adv. Sci.* 2024, 2404679, 1–10, doi:10.1002/advs.202404679.
107. Wu, Q.; Ma, D.; Tao, X.; Wu, F.; You, G.; Wang, B.; Sun, J.; Shi, S. 3D Printed Sensors for Wearable Electronics and Smart Gesture Recognition. *Adv. Mater. Technol.* 2024, 9, 1–11, doi:10.1002/admt.202302048.
108. Yang, H.; Fang, H.; Wang, C.; Wang, Y.; Qi, C.; Zhang, Y.; Zhou, Q.; Huang, M.; Wang, M.; Wu, M. 3D Printing of Customized Functional Devices for Smart Biomedical Systems. *SmartMat* 2023, doi:10.1002/smm2.1244.
109. BG, P.K.; Mehrotra, S.; Marques, S.M.; Kumar, L.; Verma, R. 3D Printing in Personalized Medicines: A Focus on Applications of the Technology. *Mater. Today Commun.* 2023, 35, 105875, doi:https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105875.
110. Jasiūnienė, E.; Raišutis, R.; Samaitis, V.; Jankauskas, A. Comparison of Different NDT Techniques for Evaluation of the Quality of PCBs Produced Using Traditional vs. Additive Manufacturing Technologies. *Sensors* 2024, 24.
111. Schmidt, K.; Polzinger, B.; Runtze, M.; Zimmermann, A. Embedding and Contacting of Electrical Components for Hybrid Additive Manufacturing. *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.* 2022, 12, 1401–1409, doi:10.1109/TCPMT.2022.3195967.
112. Khan, A.; Al, E. 3D Printed Micro-Electrochemical Energy Storage Devices. *Batteries&Supercaps* 2023, 6, doi:https://doi.org/10.1002/batt.202300190.
113. He, J.; Cao, L.; Cui, J.; Fu, G.; Jiang, R.; Xu, X.; Guan, C. Flexible Energy Storage Devices to Power the Future. *Adv. Mater.* 2024, 36, 1–21, doi:10.1002/adma.202306090.
114. Khan, S.A.; Rahman, M.A.; Khraisheh, M.; Hassan, I.G. Advances in 3D Printed Periodic Lattice Structures for Energy Research: Energy Storage, Transport and Conversion Applications. *Mater. Des.* 2024, 239, 112773, doi:10.1016/j.matdes.2024.112773.
115. Saeed, G.; Kang, T.; Byun, J.S.; Min, D.; Kim, J.S.; Sadavar, S.V.; Park, H.S. Two-Dimensional (2D) Materials for 3D Printed Micro-Supercapacitors and Micro-Batteries. *Energy Mater.* 2024, 4, doi:10.20517/energymater.2023.81.
116. Ma, J.; Zheng, S.; Fu, Y.; Wang, X.; Qin, J.; Wu, Z.S. The Status and Challenging Perspectives of 3D-Printed Micro-Batteries. *Chem. Sci.* 2024, 15, 5451–5481, doi:10.1039/d3sc06999k.
117. Mohammadi, S.; D'Alessandro, S.; Bini, F.; Marinuzzi, F.; Cidonio, G. Development of a Microfluidic-Assisted Open-Source 3D Bioprinting System (MOS3S) for the Engineering of Hierarchical Tissues. *HardwareX* 2024, 18, e00527, doi:https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00527.
118. Bas, J.; Dutta, T.; Llamas Garro, I.; Velázquez-González, J.S.; Dubey, R.; Mishra, S.K. Embedded Sensors with 3D Printing Technology: Review. *Sensors* 2024, 24.
119. Parupelli, S.K.; Desai, S. The 3D Printing of Nanocomposites for Wearable Biosensors: Recent Advances, Challenges, and Prospects. *Bioengineering* 2024, 11.
120. Lee, J.; Maji, S.; Lee, H. Fabrication and Integration of a Low-Cost 3D Printing-Based Glucose Biosensor for Bioprinted Liver-on-a-Chip. *Biotechnol. J.* 2023, 18, 1–11, doi:10.1002/biot.202300154.
121. Zhou, J.; Vijayavenkataraman, S. 3D-Printable Conductive Materials for Tissue Engineering and Biomedical Applications. *Bioprinting* 2021, 24, e00166, doi:https://doi.org/10.1016/j.bprint.2021.e00166.
122. Serafin, A.; Culebras, M.; Oliveira, J.M.; Koffler, J.; Collins, M.N. 3D Printable Electroconductive Gelatin-Hyaluronic Acid Materials Containing Polypyrrole Nanoparticles for Electroactive Tissue Engineering. *Adv. Compos. Hybrid Mater.* 2023, 6, 109, doi:10.1007/s42114-023-00665-w.
123. Chakraborty, R.; Anoop, A.G.; Thakur, A.; Mohanta, G.C.; Kumar, P. Strategies To Modify the Surface and Bulk Properties of 3D-Printed Solid Scaffolds for Tissue Engineering Applications. *ACS Omega* 2023, 8, 5139–5156, doi:10.1021/acsomega.2c05984.
124. Mudhar, R.; Mucolli, A.; Ford, J.; Lira, C.; Yazdani Nezhad, H. Electrical and Magnetic Properties of 3D Printed Integrated Conductive Biodegradable Polymer Nanocomposites for Sustainable Electronics Development. *J. Compos. Sci.* 2022, 6.
125. Chandrasekaran, S.; Jayakumar, A.; Velu, R.A. Comprehensive Review on Printed Electronics: A Technology Drift towards a Sustainable Future. *Nanomaterials* 2022, 12.
126. Muñoz, J.; Redondo, E.; Pumera, M. Functional Metal-Based 3D-Printed Electronics Engineering: Tunability and Bio-Recognition. *Appl. Mater. Today* 2022, 28, 101519, doi:https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101519.
127. Priavoulou, C.; Troullaki, K.; Tsiouris, N.; Giotitsas, C.; Kostakis, V. Tracing Sustainable Production from Degrowth and Localisation Perspective: A Case of 3D Printers. *J. Clean. Prod.* 2022, 376, 134291, doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134291.
128. Caldon, E.B.; Dizon, J.R.C.; Espera, A.H.J.; Advincula, R.C. On the Economic, Environmental, and Sustainability Aspects of 3D Printing towards a Cyclic Economy. In *Energy Transition: Climate Action and Circularity*; ACS Symposium Series; American Chemical Society, 2022; Vol. 1412, pp. 11–507 ISBN 9780841297968.
129. Bi, S.; Wang, R.; Han, X.; Wang, Y.; Tan, D.; Shi, B.; Jiang, C.; He, Z.; Asare-Yeboah, K. Recent Progress in Electrohydrodynamic Jet Printing for Printed Electronics: From 0D to 3D Materials. *Coatings* 2023, 13.
130. Jayakumar, O.D.; Tyagi, A.K. Inkjet Printing of Nanomaterials and Nanoinks BT - Handbook on Synthesis Strategies for Advanced Materials: Volume-II: Processing and Functionalization of Materials. In: Tyagi, A.K., Ningthoujam, R.S., Eds.; Springer Nature Singapore: Singapore, 2022; pp. 119–132 ISBN 978-981-16-1803-1.
131. Behera, D.; Cullinan, M. Current Challenges and Potential Directions towards Precision Microscale Additive Manufacturing - Part I: Direct Ink Writing/Jetting Processes. *Precis. Eng.* 2021, 68, 326–337, doi:https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.12.009.
132. den Hoed, F.M.; Carlotti, M.; Palagi, S.; Raffa, P.; Mattoli, V. Evolution of the Microrobots: Stimuli-Responsive Materials and Additive Manufacturing Technologies Turn Small Structures into Microscale Robots. *Micromachines* 2024, 15.
133. Ryan, K.R.; Down, M.P.; Banks, C.E. Future of Additive Manufacturing: Overview of 4D and 3D Printed Smart and Advanced Materials and Their Applications. *Chem. Eng. J.* 2021, 403, 126162, doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126162.

