

# Tendencje rozwojowe w technologii przetwórstwa tworzyw sztucznych

## Development trends in processing of plastics

MACIEJ HENECZKOWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.4.44>

W artykule omówiono aktualne tendencje w dziedzinie modyfikacji tworzyw polimerowych, w tym kompozytów, nowych technik przetwórczych i systemów sterowania procesami produkcyjnymi.

**SŁOWA KLUCZOWE:** materiały polimerowe, modyfikacja polimerów, przetwórstwo, sterowanie procesami produkcyjnymi

*In the manuscript current trends in the area of modification of polymer materials, including composites, new processing techniques and manufacturing managing and control systems have been described.*

**KEYWORDS:** polymer materials, modification of polymers, processing, manufacturing managing and control systems

Branża przetwórstwa tworzyw sztucznych jest silnie rozwijającą się gałęzią przemysłu, korzystającą z wielu dziedzin techniki: syntezy i modyfikacji polimerów, nowych technologii wytwarzania, budowy maszyn i narzędzi, systemów informatycznych do projektowania, symulacji i sterowania procesami wytwórczymi oraz symulacji użytkowania wyrobów, tj. poddawania ich naprężeniom mechanicznym i wpływowi otaczającej atmosfery (szokom termicznym, starzeniu pod wpływem promieniowania UV czy termooksydacji). Liczne zalety tworzyw sztucznych, wynikające z ich dobrych właściwości eksploatacyjnych i przetwórczych, sprawiają, że materiały te coraz częściej stają się zamiennikami tradycyjnych tworzyw. Z tych powodów w rozważaniach na temat tendencji rozwojowych tej branży skoncentrowano się na takich obszarach, jak:

- nowe materiały, w tym zwłaszcza kompozyty polimerowe;
- innowacyjne procesy przetwórcze przyjazne dla środowiska, w tym recykling;
- systemy do komputerowej symulacji i sterowania przetwórstwem (w sferze projektowania, przetwarzania i stosowania tworzyw sztucznych);
- nowe, technologicznie zaawansowane maszyny i narzędzia;
- technologie przyrostowe;
- systemy zapewniające elastyczne reagowanie na indywidualne potrzeby odbiorców i konsumentów.

### Nowe materiały polimerowe

Znaczący postęp w inżynierii materiałowej i technologii polimerów umożliwił opracowanie nowych tworzyw wielkocząsteczkowych o znacznie większej wytrzymałości

mechanicznej i cieplnej, a więc o szerszym zakresie zastosowania. Pod tym względem ważną rolę odgrywają kompozyty polimerowo-włókniste, a zwłaszcza tworzywa wzmocnione włóknami węglowymi, które wyraźnie poprawiają wytrzymałość mechaniczną i moduł sprężystości przy niewielkim zwiększeniu gęstości produktu. W ostatnich latach kompozyty polimerowo-węglowe (CFRP) na dużą skalę stosowano w budowie elementów konstrukcyjnych kadłubów samolotów pasażerskich, m.in. Boeinga 787 (Dreamlinera) czy Airbusa A350XWB. W tych modelach elementy kompozytowe stanowią 50% (Boeing), a nawet 53% (Airbus) masy samolotu. Dzięki zastosowaniu CFRP w tak dużej ilości Boeing 787 jest (według danych Japan Carbon Manufacturers Association [1]) o 20% lżejszy od samolotu o tradycyjnej konstrukcji, zawierającego ok. 3% kompozytów, a ponadto podczas rocznej eksploatacji emituje o 2700 t mniej CO<sub>2</sub>, co odpowiada zużyciu benzyny lotniczej zmniejszonemu o ok. 880 t i pozwala na zwiększenie zasięgu lotów. To przełożyło się na wyraźne ograniczenie zużycia lekkich stopów lotniczych z ok. 70% masy samolotu (w latach 90. ub.w.) do ok. 20%. W przypadku samochodów, których karoseria byłaby zbudowana z CFRP, ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> wyniosłoby 0,4 t/rok.

Poważną przeszkodą w upowszechnieniu CFRP jest wysoka cena włókna węglowego oraz kosztowny proces technologiczny kompozytów. Z tego względu CFRP są stosowane głównie do wytwarzania produktów, które muszą zapewnić dobre osiągi techniczne (wysoką wytrzymałość przy niewielkiej masie) – w tym przypadku cena odgrywa mniejszą rolę. Te kompozyty wykorzystuje się zatem w takich obszarach, jak: lotnictwo, sprzęt sportowy, elektrownie wiatrowe, specjalne konstrukcje budowlane czy samochody elektryczne.

Dotychczasowe tradycyjne techniki formowania kompozytów włóknistych – metoda kontaktowa i pultruzja – zastępuje się metodami wydajniejszymi i zapewniającymi bardziej powtarzalne właściwości wyrobów. Polegają one na stosowaniu prepregów, nawijaniu, wstępnym przesyłaniu włókien i natrysku żywicy.

Ważnym zagadnieniem eksploatacji elementów z CFRP (zwłaszcza odpowiedzialnych części, z których są wykonane środki transportu publicznego – np. samoloty) jest monitorowanie ich stanu technicznego. Do tego celu wykorzystuje się różne metody fizyczne:

- wprowadzenie do kompozytu włókien węglowych zasilanych prądem elektrycznym – w przypadku pęknięcia włókna następuje zanik przewodnictwa,
- metody ultradźwiękowe,
- zastosowanie czujników światłowodowych wbudowanych w kompozytowe elementy konstrukcyjne [2].

\* Dr hab. inż. Maciej Heneczowski, prof. PRz (mhen@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska, Zakład Kompozytów Polimerowych

Ostatnia z tych metod pozwala na ciągłe monitorowanie konstrukcji i diagnozowanie jej stanu, co ułatwia przewidywanie nawet nieznacznego pogorszenia struktury kompozytów.

Ważnym kierunkiem jest rozwijanie samonaprawialnych kompozytów (SHC – *self healing composites*). Do naprawy służą zawarte w tych kompozytach żywica i katalizator. Są one zamknięte w szklanych sferach i uwalniają się pod wpływem mechanicznego uszkodzenia kompozytu – wtedy dochodzi do reakcji i zalania pęknięcia, dzięki czemu element staje się znów gotowy do eksploatacji [3].

Rozszerzenie zastosowań polimerów następuje w konsekwencji stałego doskonalenia ich właściwości, zwłaszcza odporności cieplnej i własności przetwórczych. W tym przypadku, obok syntezy nowych rodzajów polimerów, ogromną rolę odgrywa inżynieria materiałowa, m.in. opracowywanie nowych tworzyw w wyniku komponowania ze sobą różnych polimerów lub innych materiałów, z uwzględnieniem występujących między nimi efektów synergicznych.

Warto też wspomnieć o intensywnym rozwoju nanokompozytów polimerowych, w których napelnicze (modyfikowane glinokrzemiany warstwowe, grafen, nanorurki węglowe) rozproszone są w osnowie polimerowej do rozmiarów nanometrycznych, co pozwala na uzyskanie znacznie większej wytrzymałości takich tworzyw [4, 5].

Podstawowe tendencje w obszarze modyfikacji znanych polimerów to również przygotowywanie nowych blend, które pozwalają na poszerzenie zakresu zastosowania tworzyw standardowych bądź inżynierskich mieszanek z polimerami należącymi do wyższej kategorii (tworzywa inżynierskich, specjalnych) oraz ułatwiają przetwórstwo niektórych materiałów wielkocząsteczkowych. Jest to możliwe dzięki opracowywaniu innowacyjnych metod skutecznie poprawiających wzajemną kompatybilność składników mieszanek. Klasycznymi przykładami są chociażby takie blendy, jak: PA/PP, PPE/PS, PPE/PP, PC/ABS, PA/PPA, PEI/PEEK.

Jednym z głównych kierunków rozwoju specjalnych tworzyw polimerowych jest ich zastosowanie w medycynie – na implanty, materiały opatrunkowe, akcesoria medyczne itp.

Na rys. 1 pokazano prototyp implantu stawu kolanowego, całkowicie wykonany z tworzyw polimerowych, który



Rys. 1. Prototyp implantu stawu kolanowego firmy Okani Medical Technology, wykonany całkowicie z tworzyw polimerowych. Głównymi elementami konstrukcyjnymi są kształtki z PEEK o nazwie handlowej Zeniva [6]

ma lepsze właściwości eksploatacyjne (m.in. mniejszą ścieralność) w porównaniu z jego odpowiednikami wytworzonymi ze stopów metali.

### Procesy przetwórcze przyjazne dla środowiska

Stały nacisk na rozwój technik produkcji niezagrażających środowisku naturalnemu i pozwalających na ograniczenie zużycia zasobów naturalnych dotyczy także przetwórstwa tworzyw sztucznych. Można tu wymienić takie tendencje, jak:

- maszyny i technologie energooszczędne,
- ograniczanie zużycia surowców z zachowaniem funkcjonalności wyrobów,
- skracanie czasu operacji technologicznych,
- opracowywanie różnorodnych form recyklingu.

Innowacyjne procesy gwarantujące mniejsze zużycie energii koncentrują się na: ograniczaniu poboru prądu podczas wykonywania operacji pomocniczych lub uruchamiania napędu, zmniejszaniu strat ciepła, skracaniu niektórych operacji technologicznych lub wymiany narzędzi. Dla form wtryskowych opracowano systemy elektromagnetycznego mocowania oraz zunifikowanego podłączenia mediów chłodzących bądź zasilania elektrycznego. W przypadku wtryskarek zmniejszenie zużycia energii jest realizowane przez zastosowanie maszyn elektrycznych bądź hybrydowych (hydrauliczno-elektrycznych) i wprowadzenie izolacji ogrzewania cylindrów. Sposobem na zwiększenie efektywności pracy wtryskarek hydraulicznych było wprowadzenie akumulatorów hydraulicznych i serwonapędu, co przyspieszyło wykonywanie operacji technologicznych i zapewniło oszczędności energii. W podobnym kierunku następuje także rozwój rozdmuchwarek.

Zmniejszenie zużycia tworzyw zapewnia technologia wtrysku wspomaganego gazem (GAIM) lub parą wodną (WAIM) oraz wtrysku wyprasek mikroporowatych (MuCell – wtrysk tworzywa wraz z gazem wprowadzanym w stanie nadkrytycznym do cylindra uplastyczniającego). Trzeba podkreślić, że ze względów ekonomicznych technologia GAIM rozwijana jest zdecydowanie bardziej niż WAIM. Wspomniane techniki pozwalają także na skrócenie czasu chłodzenia wyprasek oraz zmniejszenie ciśnienia wtrysku i siły zwarcia wtryskarki niezbędnej do przeprowadzenia procesu. Dzięki równoczesnemu zastosowaniu technologii MuCell oraz systemu szybkiego ogrzewania i chłodzenia gniazd formujących (RHCM) wyeliminowano podstawową pierwotną wadę tej technologii – gorszy połysk wyprasek w stosunku do kształtek wtryskiwanych tradycyjnie. Obecnie maszyny dostosowane do tej techniki oferują wszyscy znaczący producenci wtryskarek.

Firma MuCell Extrusion LLC proponuje linie wytłaczarskie do folii lub płyt, wykorzystujące mutację technologii MuCell. Inne warianty procesu wytłaczania folii bazują na rozwinięciu, które pozwala na zmniejszenie jej grubości dzięki zastosowaniu opracowanej przez firmę Alpha Marathon Film Extrusion Technologies Inc. głowicy z modularnymi dyskami, w której następuje podział strumienia stopu na wiele warstewek o niewielkiej grubości (nanowarstw) [7]. W ten sposób grubość folii można zmniejszyć o ok. 25% w stosunku do folii wytworzonej w typowej technologii. Wytłaczanie rur złożonych z kilku (dwóch lub trzech) warstw, z których wewnętrzna może być wykonana z tworzywa wzmocnionego włóknem szklanym, a pozostałe – z materiału niezbrojonego, poprawia właściwości eksploatacyjne produktu. Podobnie można wykonać płyty lub folie, w których wewnętrzną warstwę

stanowi recyklat. Takie produkty, w których recyklat jest odizolowany warstwą polimeru wyjściowego, mogą być stosowane w wyrobach stykających się z żywnością.

W ostatnich latach rozwinęło się również wiele bardziej przyjaznych dla środowiska technologii obróbki wyrobów gotowych, np. metalizacja za pomocą próżniowego pokrywania powierzchni detali tworzywowych (*sputter deposition*), która stanowi alternatywę dla dotychczas stosowanej metalizacji elektrochemicznej (w tej metodzie uzyskanie końcowej powłoki z metalicznego chromu wymagało zastosowania kąpeli z toksycznymi związkami tego pierwiastka na stopniu utlenienia IV). Z kolei w celu poprawy barierowości tworzyw opakowaniowych (PET) ich powierzchnię pokrywa się  $\text{SiO}_2$  w obecności niskotemperaturowej plazmy.

Największym wyzwaniem badawczym w obszarze recyklingu tworzyw sztucznych jest zagospodarowanie odpadów kompozytów polimerowo-włóknistych, w których osnowę stanowią usieciowane żywice. W literaturze naukowej ten temat pojawia się często, ponieważ jest ważny także z punktu widzenia ekonomicznego i ekologicznego.

Jednym z zagadnień jest recykling opon samochodowych. Zużyte opony często są przeznaczane do spalania w piecach do wypalania cementu, gdyż mają dużą wartość opałową. Podejmowane są jednak projekty, w których w wyniku pirolizy wywołanej za pomocą różnych czynników – przegrzanej pary wodnej, ultradźwięków czy promieniowania mikrofalowego – następuje pękanie wiązań wielosiarczkowych, odzyskanie łańcuchów kauczuku i przeznaczenie ich do ponownego przetworstwa. Taki produkt jest jednak zanieczyszczony pochodnymi siarki, co ogranicza jego zastosowanie, dlatego trwają prace nad usunięciem tej wady. W przypadku odpadów kompozytów konstrukcyjnych polimerowo-węglowych bardzo cennym surowcem jest zwłaszcza włókno węglowe. Na temat odzysku tych surowców w ostatnich latach pojawiło się kilkadziesiąt prac, w których opisano różne sposoby oddzielania utwardzonego polimeru od włókna węglowego, lecz na razie projekty te osiągnęły zaledwie skalę laboratoryjną.

W ostatnim czasie intensywnie rozwijają się tworzywa sztuczne na osnowie z polimerów – takich jak polilaktyd, poli(kwas glikolowy) czy modyfikowane polimery naturalne – ze wzmocnieniem z włókien konopnych, szałowych, lnianych itp. Są one otrzymywane lub pozyskiwane ze źródeł odnawialnych. Zaletą tych materiałów jest ich biodegradowalność, przez co nadają się one zwłaszcza na produkty o krótkim okresie użytkowania (np. na naczynia jednorazowego użytku, opakowania jednorazowe) i nie stanowią długotrwałego obciążenia dla środowiska jako odpady poużytkowe.

### Systemy komputerowego wspomaganie prac inżynierskich (CAE)

W dobie intensywnego rozwoju informatyki oraz sterowania procesami projektowymi i wytwórczymi narzędzia te wkroczyły bardzo silnie do przetworstwa tworzyw sztucznych. Dotyczy to zwłaszcza: wtryskiwania, prasowania przetłocznego i wytłaczania, formowania kompozytów, a ostatnio – także termoformowania.

Do projektowania kształtu i symulacji obciążenia wyprasek wtryskowych służy większość dostępnych programów CAD: CATIA, NX, Pro/Engineer, Autodesk Inventor itp. Do symulacji formowania wtrysku wyprasek przeznaczone są programy: Autodesk Moldflow Insight (AMI), CADMOULD,

Moldex3D i SIGMA Soft – wobec szybko wprowadzanych modyfikacji technologii wtrysku są one stopniowo uaktualniane, aby nadążać za zmianami i sprostać konkurencji.

Zauważalna jest także tendencja do łączenia tych programów z systemami CAD. W ten sposób najstarszy program symulacyjny Moldflow został wykupiony przez firmę Autodesk, co pozwoliło na jego integrację z innymi produktami obecnego właściciela. Ułatwia to projektowanie form wtryskowych za pomocą programu Autodesk Inventor i przenoszenie wyników do obliczeń wytrzymałościowych (w programie Nastran). Podobne działania podjęły firmy CoreTech (właściciel Moldex3D) i Siemens PLM Software (właściciel NX) – na mocy ich porozumienia program Moldex3D został zintegrowany z systemem NX, począwszy od wersji NX 8.5.

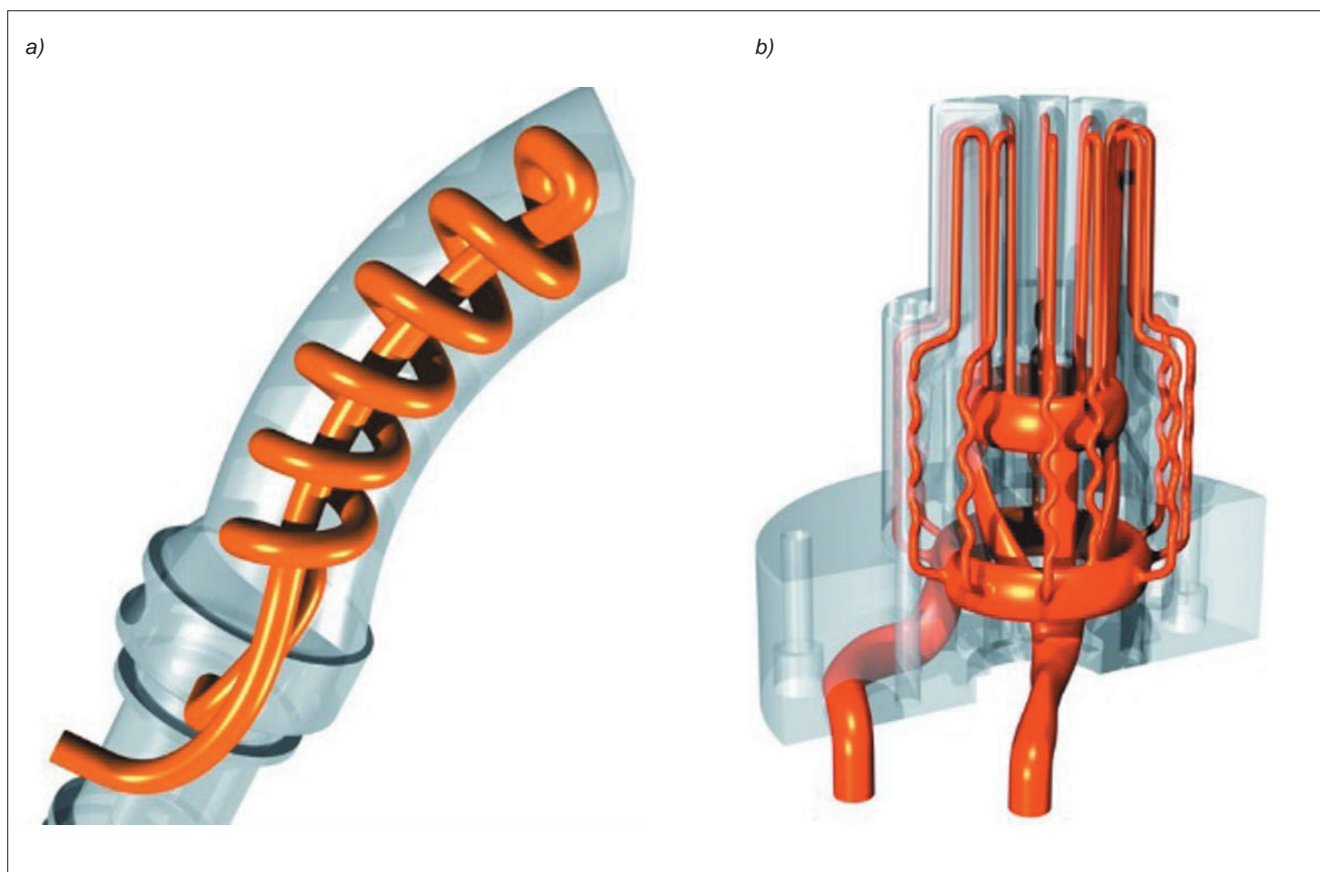
Współczesne wtryskarki wyposaża się w czujniki monitorujące temperaturę i/lub ciśnienie panujące w gniazdach formujących, a także w systemy sterowania, które pozwalają na bieżącą kontrolę stanu wypełniania gniazda i odpowiednie korygowanie ustawień maszyny albo na eliminowanie wadliwych kształtek, wytworzonych przy źle dobranych parametrach. Przykładem takiego systemu jest Priamus, przeznaczony głównie do wytwarzania kształtek o zwiększonej dokładności. Czołowi producenci wtryskarek stosują systemy oparte na podobnej idei, gwarantujące bieżącą, statystyczną kontrolę procesu dostosowaną do koordynacji ze zdalnym sterowaniem produkcją. Wszystkie te działania mieszczą się w ramach tzw. czwartej rewolucji przemysłowej – Industry 4.0.

Podobnie jest w przypadku wytłaczania, dla którego opracowano kilka komercyjnych programów do projektowania narzędzi i sterowania procesem: ANSYS Polyflow, COMPUPLAST VEL, polyXtrue, LabVIEW i ERP (dla wytłaczania profili).

### Technologie przyrostowe – zagrożenie czy wzbogacenie tradycyjnych metod przetwórczych?

Techniki przyrostowe (*rapid prototyping*), które początkowo miały ułatwić i przyspieszyć wytwarzanie prototypów, szybko się rozwinęły i stały się bardzo elastyczną metodą produkcji narzędzi (*rapid tooling*) oraz krótkich serii wyrobów (*rapid manufacturing*). Takie metody, jak FDM czy SLS, są często stosowane do wytwarzania z tworzyw sztucznych niewielkiej liczby detali, przy czym dają możliwość szybkiej modyfikacji kształtu tych detali bez konieczności zmiany narzędzi. Duża elastyczność technologii przyrostowych pozwala na łatwe dostosowywanie cech wyrobów do potrzeb i wymagań klientów. Te metody skutecznie konkurują więc z wtryskiwaniem, wytłaczaniem, termoformowaniem itp., a więc z procesami, w których każda zmiana cechy wyrobu wymaga modyfikacji narzędzi (np. formy, głowicy), co zazwyczaj jest kosztowne i czasochłonne. Należy się zatem spodziewać dalszego rozwoju technologii przyrostowych.

Technologie przyrostowe, zwłaszcza te z grupy *rapid tooling* – np. laserowe spiekanie proszków metali (DMLS) – umożliwiają wytwarzanie bardzo skomplikowanych geometrycznie gniazd formujących oraz uzyskiwanie dostosowanych do kształtu wyprasek kanałów chłodzących gniazda lub rdzenie formujące – tzw. kanałów konformalnych (rys. 2) [2]. W tych przypadkach technologie przyrostowe zapewniają większą efektywność wtryskiwania dzięki bardziej równomiernemu chłodzeniu wyprasek i skróceniu czasu tej operacji w formach wyposażonych w kanały konformalne.



Rys. 2. Przykład kształtek z zaprojektowanymi, dostosowanymi do ich geometrii chłodzącymi kanałami konformalnymi – rozwiązanie firmy FADO [2]

### Informatyzacja zapewniająca elastyczne reagowanie na potrzeby rynku

Kolejnym czynnikiem, zdecydowanie wkraczającym do przetwórstwa tworzyw sztucznych oraz powodującym bardziej efektywne i elastyczne reagowanie na mocno zindywidualizowane wymagania klientów, jest pełna informatyzacja procesu wytwarzania. Realizuje się ją poprzez takie systemy, jak:

- statystyczna kontrola procesu SPC (*statistical process control*) – program do stałej oceny jakości wyrobów, polegającej na ciągłej kontroli parametrów technologicznych i sprawdzaniu, czy mieszczą się one w dopuszczalnych granicach. Połączenie tych danych w systemie informatycznym pozwala na eliminację wadliwych produktów i zapobiega konieczności wyrwykowego sprawdzania jakości produktów;
- system realizacji produkcji MES (*manufacturing execution system*) – pozwala na bieżące zbieranie, gromadzenie i selekcję informacji o stanie poszczególnych procesów produkcyjnych bezpośrednio, praktycznie ze wszystkich stanowisk pracy. Dzięki temu dyspozytor ma wgląd do danych o stanie realizacji zamówień i może sterować zmianami poszczególnych strumieni materiałowych. System ten jest zazwyczaj skorelowany z MRP i ERP;
- planowanie zapotrzebowania materiałowego MRP (*material requirements planning*) i planowanie zasobów przedsiębiorstwa ERP (*enterprise resource planning*) – MRP określa procedury dotyczące surowców, materiałów, komponentów itp., natomiast ERP obejmuje systemy informatyczne do wspomaganie zarządzania przedsiębiorstwem lub firmami stanowiącymi łańcuch dostawców,

tj. systemy zbierające potrzebne poszczególnym jednostkom dane oraz pozwalające na ich obrabianie.

Dopasowywanie produkowanych wyrobów do indywidualnych wymagań różnych klientów/konsumentów jest możliwe dzięki wprowadzaniu tzw. inteligentnych robotów reagujących na bieżące potrzeby. To główny kierunek zmian w organizacji wytwórczości zgodnie z regułami Industry 4.0.

### LITERATURA

1. [www.carbonfiber.gr.jp/english/tech/lca.html](http://www.carbonfiber.gr.jp/english/tech/lca.html).
2. [www.immt.pwr.wroc.pl/~gasiar/hpvl/KMP%20%20Aplikacja%20%20C5%9Bwiat%20%20owodowych%20metod%20czujnikowych%20do%20monitorowania%20ekstremalnie%20wyt%20C4%99%20BCo-nnych%20konstrukcji%20kompozytowych.pdf](http://www.immt.pwr.wroc.pl/~gasiar/hpvl/KMP%20%20Aplikacja%20%20C5%9Bwiat%20%20owodowych%20metod%20czujnikowych%20do%20monitorowania%20ekstremalnie%20wyt%20C4%99%20BCo-nnych%20konstrukcji%20kompozytowych.pdf).
3. Wang Y., Pham T.D., Ji C. "Self-healing composites: A review". *Materials Engineering*. 2 (2015), 1075686.
4. Bhattacharya M. "Polymer nanocomposites – A comparison between carbon nanotubes, graphene, and clay as nanofillers". *Materials*. 9 (2016): s. 262.
5. Yurddaskal M., Celik E. "Effect of halogen-free nanoparticles on the mechanical, structural, thermal and flame retardant properties of polymer matrix composite". *Composite Structures*. 183, 1 (2018): s. 381–388.
6. [https://omnexus.specialchem.com/news/industry-news/solvay-peek-okani-medical-all-polymer-knee-implant-000213766?l=iom18031715&li=100212492&utm\\_source=NL&utm\\_medium=EML&utm\\_campaign=iom18031715&m\\_i=CFoCDiYR\\_cKIwFUpJVAY6JPrIx1vr8a9qDqYFbeBlxNVBwabyzPUlllaPQZGHQwA8FfUUL0v3BJpegq3eaqO5J1scZCa](https://omnexus.specialchem.com/news/industry-news/solvay-peek-okani-medical-all-polymer-knee-implant-000213766?l=iom18031715&li=100212492&utm_source=NL&utm_medium=EML&utm_campaign=iom18031715&m_i=CFoCDiYR_cKIwFUpJVAY6JPrIx1vr8a9qDqYFbeBlxNVBwabyzPUlllaPQZGHQwA8FfUUL0v3BJpegq3eaqO5J1scZCa).
7. [www.alpha-marathon.biz/alpha-exclusive-technologies/alpha-s-patented-annular-nano-layer-die.html](http://www.alpha-marathon.biz/alpha-exclusive-technologies/alpha-s-patented-annular-nano-layer-die.html).
8. [www.fado.info/oferta/chlodzenie-konformalne](http://www.fado.info/oferta/chlodzenie-konformalne).