

# Biologicalisation of manufacturing processes State of the art, principles and developing trends

## Biologizacja procesów wytwórczych Stan zagadnienia, zasady i trendy rozwojowe

WIT GRZESIK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2022.11.21>

In this paper, a survey of new achievements in the area of biologically inspired design and manufacturing and fundamental rules of biological transformation in manufacturing – also in relation to mechanical engineering – is provided. Some possible scenarios and several examples of the applications of biological transformation in manufacturing are presented. Some new trends, for instance, the way so-called Living Manufacturing Systems, which are based on advanced AI techniques, are discussed. Finally, some examples of a successful biologicalisation of manufacturing tools, i.e. injection moulds, machine tools, manufacturing processes, and systems are provided. This paper can motivate Polish engineers and researchers to undertake this topic in Poland. **KEYWORDS:** manufacturing, manufacturing biologicalisation, bio-inspired manufacturing, biological transformation of manufacturing, bio-intelligent manufacturing systems

W artykule dokonano przeglądu osiągnięć w zakresie biologicznie inspirowanego projektowania i wytwarzania oraz zasad biologicznej transformacji tych podstawowych funkcji w inżynierii mechanicznej. Przedstawiono możliwe scenariusze i liczne przykłady wdrażania biologicznej transformacji w przemyśle wytwórczym. Omówiono nowe trendy, m.in. przejście do „żywych” systemów wytwórczych (*living manufacturing systems*) oparte na technikach AI samouczenia się. Zamiarem autora jest zainteresowanie inżynierów i naukowców w kraju tematem transformacji biologicznej. **SŁOWA KLUCZOWE:** przemysł wytwórczy, biologizacja wytwarzania, biologicznie inspirowane wytwarzanie, biologiczna transformacja wytwarzania, biointeligentne systemy wytwórcze

### Wprowadzenie

Powszechnie obowiązującą strategią nowoczesnego przemysłu jest koncepcja Produkcji/Wytwarzania 4.0 – określana inaczej czwartą rewolucją przemysłową, która jest oparta na dziewięciu filarach [1, 2]. Są to:

- autonomiczne roboty wkomponowane w proces produkcyjny,
- symulacje procesów wytwórczych/przemysłowych,
- pionowa i pozioma integracja softwarowa,
- przemysłowy Internet rzeczy (*Internet of things*),
- cyberbezpieczeństwo,
- chmura obliczeniowa – przetwarzanie w chmurze (*cloud computing*),

- wytwarzanie przyrostowe (*3D printing*),
- rzeczywistość rozszerzona obejmująca oprogramowanie oraz sprzęt,
- duże zbiory danych i ich analiza.

Analiza zagadnienia w świetle licznych opracowań, m.in. [3–5], upoważnia do stwierdzenia, że dziesiątym i niezwykle ważnym filarem strategii Przemysłu 4.0 jest **bionika**. To interdyscyplinarna nauka zajmująca się badaniem organizmów żywych (roślin i zwierząt) pod kątem możliwości wykorzystania ich budowy i funkcji w rozwiązaniach technicznych [1]. Według A. Samka [5] bionika jest nową dziedziną wiedzy, która obejmuje badania przyrodnicze mające na celu uzyskanie innowacyjnych rozwiązań technicznych, głównie w zakresie budowy maszyn, architektury i budownictwa, a także w innych dziedzinach techniki. Obecnie bionikę definiuje się jako zastosowanie (czy naśladowanie bądź kopiowanie) biologicznych funkcji, struktur i mechanizmów do projektowania maszyn i sterowania nimi. Z tego względu używane jest zamiennie nazewnictwo takie jak: *Biomimetic design* oraz biologicznie inspirowane projektowanie i wytwarzanie (*Biologically-inspired design/manufacturing*). Bionika z pewnością będzie coraz ważniejszym elementem koncepcji Przemysłu 4.0, co wynika z faktu, że w naturze wszystkie organizmy żywe są budowane przyrostowo, a kształtowanie przyrostowe uznaje się za wiodącą technikę wytwórczą [5, 6].

Bionika już znalazła istotne miejsce w naukach technicznych, np. jako biologizacja/bionizacja projektowania i wytwarzania, co przekłada się na przejście na poziom biologicznej transformacji przemysłowych procesów wytwórczych (*biological transformation of industrial manufacturing*) [7, 15].

Istotę i zasady biologizacji opisano szczegółowo m.in. w pracach [10, 11]. W pracy [10] podano zasady wykorzystania wiedzy biologicznej do biologicznie inspirowanego projektowania (*biologically-inspired design* – BID), stosując hierarchiczny podział bionasładowania (*biomimetics*) i/lub bionasładowania (*biomimicry*) – jako synonimów bioniki – na konstrukcyjne, procesowe i informacyjne. Z kolei w pracy [11] przedstawiono wyniki eksperymentów projektowych przeprowadzanych w parach inżynier + biolog i oddzielnie w celu udoskonalenia metod biologicznie inspirowanego projektowania. Procedurę

\* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik, em. prof. zw. Politechniki Opolskiej – [wge103@wp.pl](mailto:wge103@wp.pl), <https://orcid.org/0000-0003-3898-5119> – Opole, Polska

eksperymentu, który zasadniczo jest nastawiony na sposób prezentowania informacji, określono akronimem: *BioId Support (Bio-inspired Ideation Support)*.

Należy zwrócić uwagę, że w programach kształcenia inżynierskiego [13] bioinżynieria (bionika) ma charakter wybitnie interdyscyplinarny i traktuje się ją jako łącznik inżynierii (mechanicznej, materiałowej, chemicznej, elektrycznej oraz informatycznej) z biologią i naukami ścisłymi oraz naukami o życiu. W tym kontekście w biologii inżynierskiej formułuje się 16 otwartych problemów, m.in. problemy wytwarzania i dystrybucji oraz projektowania, w myśl zasady: *nie co ma być odkryte ale co ma być rozwiązane* [14].

Definicja transformacji biologicznej wypracowana w założonej w 2019 r. grupie roboczej CIRP Biologisation in Manufacturing jest następująca [6, 7]: *użycie i integracja biologicznych i inspirowanych biologicznie zasad, materiałów, funkcji, struktur i zasobów do inteligentnych i zrównoważonych technologii i systemów wytwórczych z zamiarem osiągnięcia ich pełnego potencjału.*

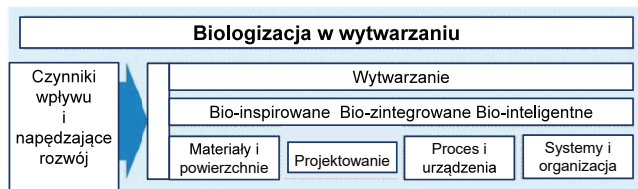


Fig. 1. Subdivision of manufacturing field into sections [6]

Rys. 1. Podział obszaru wytwarzania na sekcje [6]

W pracach tej grupy przyjęto podział obszaru wytwarzania na trzy sekcje (rys. 1) obejmujące kolejno: materiały i powierzchnie, projektowanie wyrobów i systemów wytwarzania, procesy wytwórcze, obrabiarki, roboty i operacje montażu oraz systemy produkcyjne, łańcuchy dostaw i organizację [6].

Szczegółne inicjatywy tego typu mają obecnie miejsce w przemyśle niemieckim w związku z realizacją przez sieć badawczą Fraunhofera wspólnie z 15 reprezentantami przemysłu i jednostkami badawczymi programu badawczego BIOTRAN, którego celem jest analiza potencjału i wymagań transformacji biologicznej do 2050 r. Wytypowano cztery wiodące aspekty (odniesione do przemysłu niemieckiego):

- selekcję kluczowych technologii pod kątem transformacji biologicznej,
- ocenę bieżącego stanu sektora wytwórczego w kontekście transformacji biologicznej,
- nakreślenie potencjalnych scenariuszy rozwoju przemysłu wytwórczego w kontekście transformacji biologicznej,
- sformułowanie zaleceń co do przyszłych działań.

Jako istotne powody tych działań podano wzrost globalnej konkurencji, wzrost wymagań w zakresie zrównoważonego rozwoju oraz braki surowcowe (w ciągu ostatnich 30 lat podwoiło się bowiem zużycie surowców), które w przemyśle niemieckim sygnalizuje już około 40% średnich firm [7]. To są też wyzwania stojące przed przemysłem wytwórczym innych krajów należących do UE. Do ważnych aspektów na wysokim poziomie biologizacji, które mają stanowić

kolejny etap rozwoju digitalizacji i strategii Przemysłu 4.0, należy zaliczyć [6]:

- nowe osiągnięcia w chemii i nowe materiały,
- wyroby z zastosowaniem nowych biomateriałów,
- rozwój klasycznych procesów przemysłowych z wykorzystaniem potencjału zupełnie nowych bioinspirowanych procesów przemysłowych,
- tworzenie podstaw do nowego bioinspirowanego wyposażenia obejmującego roboty, obrabiarki i urządzenia pomiarowe,
- nowe bioinspirowane modele organizacji produkcji obejmujące systemy wytwórcze i łańcuchy dostaw.

## Zasady transformacji biologicznej i możliwe scenariusze

Ogólną koncepcję transformacji biologicznej w formie systemowej aplikacji wiedzy o procesach biologicznych prowadzącej do integracji produkcji, informacji i biotechnologii przedstawiono na rys. 2. W konsekwencji proces transformacji biologicznej obejmuje trzy etapy rozwojowe – tj. inspirację, integrację i interakcję – które skutkują odpowiednio w biologicznie inspirowanym, zintegrowanym i inteligentnym procesie wytwórczym.

W pierwszej kolejności **inspiracja** pozwala na translację/przełożenie ewolucyjnych zjawisk biologicznych w systemy tworzące wyłącznie techniczne wartości (np. lekkie konstrukcje), funkcjonalności (np. biomechanikę) i rozwiązania organizacyjne (np. inteligencję roju – *swarm intelligence*, sieci neuronowe). W drugiej kolejności wiedza biologiczna znajduje zastosowanie w formie rzeczywistej **integracji** systemów biologicznych w systemach produkcyjnych (np. zamiana procesów chemicznych na biologiczne przez zastosowanie enzymów, komórek i innych organizmów biologicznych). Przykłady tej formy biologizacji dotyczą zastosowania w przywracaniu rzadkich pierwiastków z magnezów, funkcjonalizacji polimerów i uwolnienia bioplastików ze strumienia zanieczyszczeń CO<sub>2</sub>. W trzeciej kolejności pełna **interakcja** systemów technicznych, informatycznych i biologicznych prowadzi do tworzenia całkowicie nowych, samowystarczalnych i samoopimalizujących się technologii produkcyjnych i struktur, zwanych **biointeligentnymi systemami wytwórczymi**. Świadczy to o tym, że koncepcja biologicznej transformacji realizuje się w trzech etapach ze wzrastającą kompleksowością

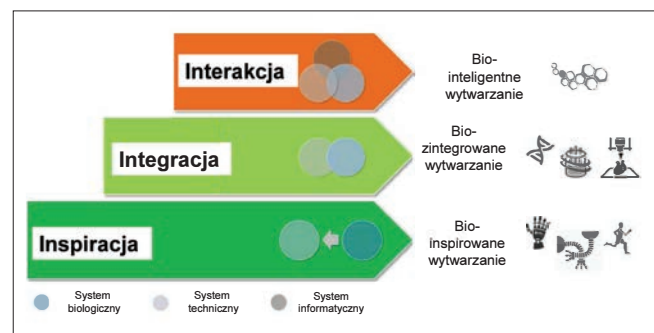


Fig. 2. Development modes of the biological transformation according to Miede [7]

Rys. 2. Formy rozwoju transformacji biologicznej według Miede [7]

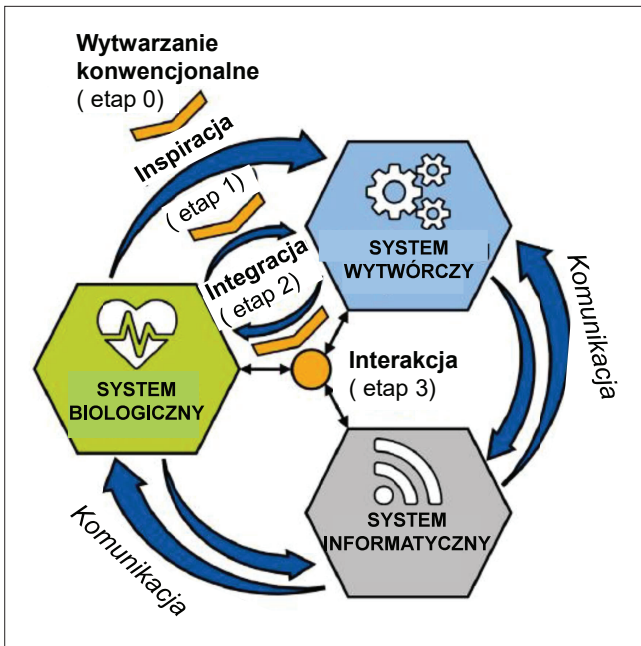


Fig. 3. Framework of biologicalisation in manufacturing [8]  
Rys. 3. Struktura biologizacji w wytwarzaniu [8]

i interdyscyplinarnością [9]. Strukturę biologizacji wytwarzania przedstawiono poglądowo na rys. 3.

Ogólnie podejścia do biologizacji wytwarzania mogą mieć kilka scenariuszy polegających na grupowaniu w różne okresy rozwoju, ale rozróżnia się systemy techniczne, informatyczne i biologiczne oraz opisuje się poziomy ich interakcji (komunikacji). Wersja przedstawiona na rys. 3 zawiera trzy stopnie rozwoju prowadzące do urzeczywistnienia koncepcji biologizacji procesów wytwórczych.

### Zastosowania potencjału biologizacji w wytwarzaniu

Przykłady oceny możliwości i wpływ zastosowania biologicznej transformacji w wytwarzaniu zestawiono na rys. 4.

Na rys. 5 przedstawiono przykład biologizacji procesu projektowania, optymalizacji i wytwarzania formy wtryskowej (rys. 5b) z konforemnym układem chłodzenia, który zapewnia najwyższą jakość wyrobu z plastiku z uwagi na minimalizację wad powierzchniowych

BIOLOGIA	WYTWARZANIE/ PRODUKT							
	Materiały powierzchni	Projektowanie, struktura	Obrabiarki, roboty, urządzenia	Proces wytwarzania	Sensory, aktulatory	Komputery i sterowanie	Systemy produkcyjne, organizacja, łańcuch dostaw	
Materiały naturalne, kompozycje	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●	
Liście, powierzchnie skóra, naskórek, wzrok, kolor	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●	
Szkielet, kości	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●	
Ciało	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●	
System nerwowy, sensory naturalne	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●	
Mózg, system sterowania	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●	
Mięśnie	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●	
Okres życia, elementy samochłodzące	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●	
Spoleczności, grupy i kooperacja	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●	

MAŁY  
Potencjał  
DUŻY

Fig. 4. Examples of assessment of the potential and impact of applying biological transformation in manufacturing [6]  
Rys. 4. Przykłady oceny możliwości i stopnia wpływu zastosowania biologicznej transformacji w wytwarzaniu [6]



Fig. 5. Evaluation of biological systems (a) selected for optimization of conformal cooling channels in injection mould fabricated additively (b) [6]  
Rys. 5. Ewaluacja systemów biologicznych (a) wytypowanych do optymalizacji konforemnego systemu chłodzenia w formie wtryskowej wytwarzanej przyrostowo (b) [6]

wynikających z niedostatecznego i nierównomiernego chłodzenia [6, 17]. W projekcie o nazwie HARBEC [6] zastosowano koncepcję typu *top-down*, a na początku czynności projektowych i wytwórczych przeprowadzono poszukiwanie i ewaluację rozwiązań biologicznych w koncepcji naśladowania (*biomimicry*), mających związku z nowymi technologiami wytwórczymi.

Jak pokazano na rys. 5a, wytypowano niektóre naturalne i botaniczne struktury, w tym kapilarny efekt w roślinach, naturalne konwekcyjne chłodzenie kopców termitów, strukturę dużych i cienkich uszu słonia, strukturę żył w systemie naczyń krwionośnych ssaków i żyłek w liściu rośliny dwuliściennej (*dycotyl*), które dobrze pochłaniają ciepło. Formę wykonano z aluminium metodą DMLS (*direct metal laser sintering*) i SLM (*selected laser melting*). W rezultacie połączenia zasad transformacji biologicznej z wytwarzaniem przyrostowym uzyskano wyrób znacznie lepszej jakości, skrócono cykl wytwarzania i zmniejszono zużycie energii [6].

W przypadku obrabiarek biologizacja radykalnie zmienia koncepcję ich budowy i struktury. Można wyróżnić trzy główne kierunki poprawy funkcjonalności obrabiarek: mobilność, redundancję (nadmierność) ruchów i masę konstrukcji [6, 9]. Na bazie obserwacji funkcjonowania dzięcioła opracowano koncepcję mobilnej obrabiarki do obróbki dużych i ciężkich ele-

mentów (rys. 6b), w której przedmiot jest stacjonarny, a obrabiarka jest mobilna. Oczywiście konstrukcja takiej obrabiarki powinna być lekka, aby zminimalizować zużycie energii. W celu optymalizacji konstrukcji nośnej wykorzystano rozwiązania biologiczne dotyczące struktur lekkich, w tym struktury kości i roślin, i na tej bazie przeprowadzono topologiczną optymalizację konstrukcji 5-osiowego centrum obróbkowego (rys. 6a).

Chociaż proponowane rozwiązania są wartościowe z perspektywy naukowej, to jeszcze nie jest możliwy ich zrównoważony transfer do przemysłu. Jako przykład takiej inicjatywy można wymienić projekt o nazwie „BioManuIII” dotyczący budowy frezarki całkowicie opartej na transformacji biologicznej (rys. 7), który realizują naukowcy z Instytutu Fraunhofera i przedstawiciele światowego lidera produkującego obrabiarki – koncernu DMG MORI [9].

Przykładowo: emulsję chłodząco-smarującą całkowicie zastąpi się olejem roślinnym (a na rys. 7), co znacznie ograniczy emisję CO<sub>2</sub> i zanieczyszczenie środowiska w przypadku obróbki z chłodzeniem konwencjonalnym. W dodatku proponuje się samowystarczalny system zasilania cieczą biointegrowalną, czyli integrację bakterii, alg i drożdży, zrównoważone zasilanie energetyczne, biologicznie funkcjonalne powierzchnie, recykling odpadów i najwyższej jakości surowce. Dalsze prace badawcze mają obejmować problematykę kontroli termicznej i odzysku ciepła, ponieważ cała konstrukcja ma być zaprojektowana jako homoitermiczna (stałocieplna – *homoiothermal*), oparta na biologicznym modelu zwierząt ciepłokrwistych (b). W ten sposób przez regulację śledzącą/ukierunkowaną z uwzględnieniem gradientów temperatury osiągnie się większą stabilność cieplną. W odniesieniu do osiągnięcia pełnej zrównoważoności ekologicznej zostaną wyeliminowane izolatory z polistyrenu, a jako zamienniki na osłony termiczne i akustyczne zostaną zastosowane biodegradowalne materiały (c). W dodatku, jak wspomniano, mają to być materiały powlekane o wymaganej funkcjonalności.

Kolejnym poziomem demonstracji zastosowania transformacji biologicznej są inspirowane biologicznie samouczące się (*self-learning*) przyrostowe maszyny, systemy i procesy. Strukturę biointeligentnego systemu obróbki przyrostowej (AM) przedstawiono na rys. 8. Ważnym zadaniem w takim przypadku jest integracja doświadczeń różnych operatorów, jeśli stosuje się różne techniki wytwórcze. Zintegrowany system ekspercki zbiera dane od doświadczonych

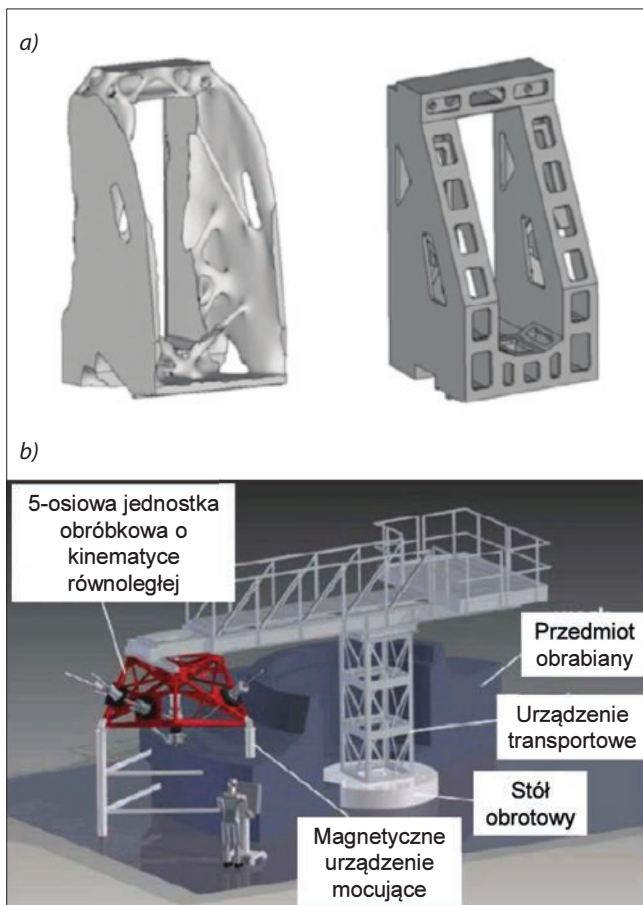


Fig. 6. Examples of application of biologicalisation in machine tool design: a) topological optimization of a machine stand (left) and its technical representation (right), b) modular mobile 5-axis parallel kinematic machine tool [6]

Rys. 6. Przykłady zastosowania transformacji biologicznej w projektowaniu obrabiarek: a) topologiczna optymalizacja korpusu obrabiarki, b) modułarna, mobilna sterowana w pięciu osiach obrabiarka o kinematyce równoległej [6]

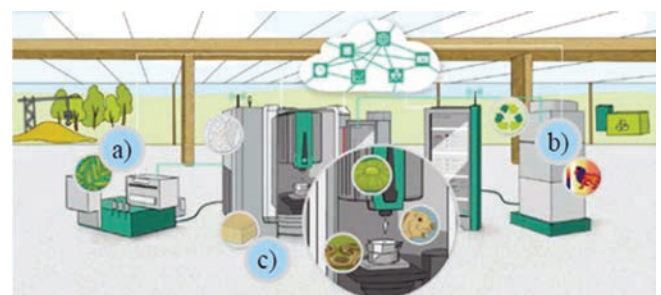


Fig. 7. Concept of a biologically transformed machine tool [9]  
Rys. 7. Koncepcja biologicznej transformacji obrabiarki [9]

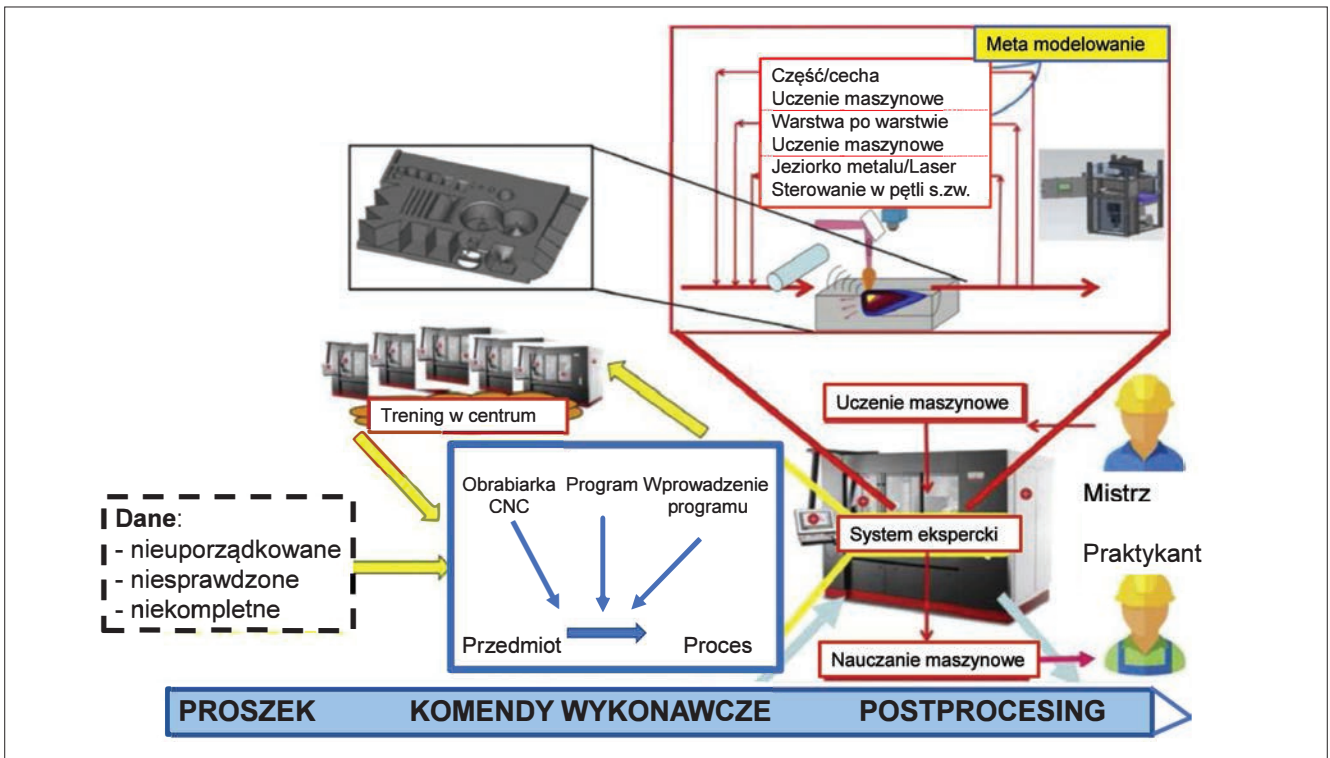


Fig. 8. Concept of a biointelligent AM system [16]

Rys. 8. Koncepcja biointeligentnego systemu obróbki przyrostowej (AM) [16]

operatorów i wydaje decyzje co do użytecznych informacji w dalszych zadaniach wytwórczych.

W analizowanym przypadku do identyfikacji wad warstw nakładanych metodą SLM na podstawie automatycznego rozpoznawania obrazu dopasowano koncepcję uczenia maszynowego (*machine learning approach*). Podstawowymi składnikami omówionego biointeligentnego systemu wytwórczego są: system komunikacji, uczenie się od doświadczonych operatorów i zabezpieczenie informacyjne dla niedoświadczonych operatorów.

Trwają prace koncepcyjne nad bioinspirowaną fabryką przyszłości [9], w których planuje się wykorzystać ideę fabryki inspirowanej przez komórkę biologiczną. W tej propozycji (rys. 9) stacjonarne środki produkcyjne, takie jak urządzenia do obróbki plastycznej lub odlewania, reprezentują jądra poszczególnych komórek (1), a pozostałe elementy produkcyjne (2) są rozmieszczone wokół tych jąder. Podczas gdy stacjonarne urządzenia pozostają niezmiennie, duża liczba wysoko elastycznych jednostek (3), jak zrobotyzowane komórki, jest rozmieszczona wokół nich i mogą one być szybko przekazywane do zmiennych zadań produkcyjnych. To pokazuje analogię systemu z rys. 9 do komórki biologicznej, która jest z natury bardzo elastyczna.

W osiągnięciu rozwiązań biointeligentnych należy uwzględnić sześć podstawowych aspektów:

- uczenie się,
- podejmowanie decyzji,
- wnioskowanie,
- symbiozę,
- współistnienie/koegzystencję,
- współrozwój/koewolucję.

Wynika to z faktu, że bioinspiracja i biointegracja, a dokładnie ich rozwiązania praktyczne, rozwijają się

w kierunku rozwiązań biointeligentnych na bazie ICT (*information and communications technology*), z użyciem sztucznej inteligencji (AI), uczenia maszynowego (ML – *machine learning*), głębokiego uczenia maszynowego (DP – *deep learning*), ewolucyjnych obliczeń w sztucznej inteligencji (EC – *evolutionary computation*) i innych [16]. Na tej podstawie można sformułować następujące definicje bioinspiracji, biointegracji i biointeligencji [16]:

- **Bioinspirowane wytwarzanie** jest realizowane przez transfer koncepcji obejmujących zasady, funkcje, struktury i/lub rozwiązania z biosfery do technosfery wytwórczej.

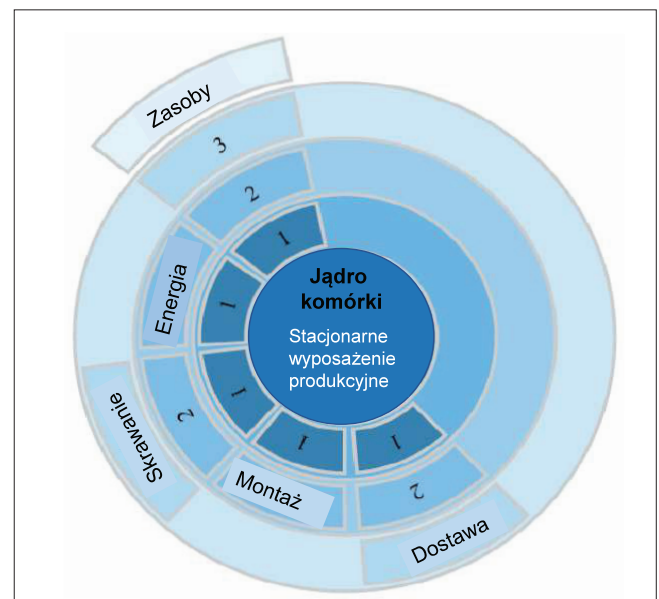


Fig. 9. Vision of a cell-inspired factory of the future [9]

Rys. 9. Wizja komórkowo-inspirowanej fabryki przyszłości [9]

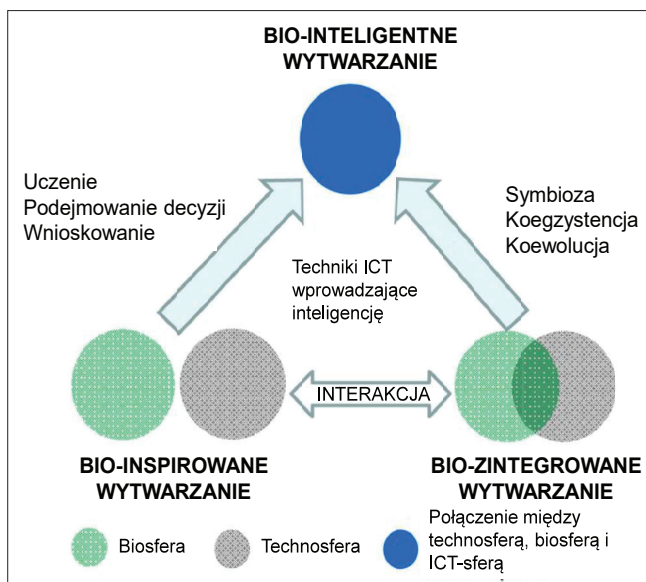


Fig. 10. Relationship between bioinspired, biointegrated and biointelligent manufacturing [16]

Rys. 10. Związki między bioinspirowanym, biozintegrowanym i biointeligentnym wytwarzaniem [16]

- **Biozintegrowane wytwarzanie** jest realizowane przez integrację elementów z biosfery do technosfery w środowisku wytwórczym.

- **Biointeligentne wytwarzanie** jest realizowane przez łączenie/scalanie środków ICT z rozwiązaniami w obszarach bioinspiracji i/lub biointegracji z wykorzystaniem kanałów informacyjnych, sensorów i aktuatorów. Specjalną (rozwinętą) formę biointeligentnego wytwarzania, która ma już potencjał prowadzący do łączenia się w żywe systemy wytwórcze (*living manufacturing systems*), osiąga się, gdy mają miejsce koegzystencja, wzajemne interakcje oraz koewolucja systemów technicznych, informatycznych i biologicznych.

Związki między trzema wymienionymi systemami przedstawiono schematycznie na rys. 10.

W pracy [16] postawiono hipotezę, że dotychczasowe osiągnięcia w zakresie biologicznej transformacji procesów wytwórczych są podstawą do stwierdzenia, że przyszłościowe systemy wytwórcze będą zawierać/włączać komponenty, cechy, charakterystyki i zdolności, które umożliwią zbieżność/konwergencję z żywymi systemami biologicznymi. Zasady funkcjonowania takich systemów omówiono w pracach [15, 16].

## Podsumowanie

Zauważalnie rozwijają się badania nad transformacją biologiczną w czynnościach projektowych i wytwórczych. Uważa się, że są one konieczne dla dalszego rozwoju digitalizacji produkcji i strategii Przemysłu 4.0. Podstawowa koncepcja wyróżnia trzy fazy rozwoju, tj.: bioinspirację, biointegrację i biointerakcję. Docelowym zamierzeniem są tzw. żywe systemy wytwórcze, które w sposób systemowy wykorzystują olbrzymie zasoby naturalnych rozwiązań zaczerpniętych z przyrody. Obecnie realizuje się wiele projektów badawczych tego typu, w większości o charakterze konceptualnym.

## LITERATURA

- [1] Grzesik W., Ruszaj A. *„Hybrydowe metody obróbki materiałów konstrukcyjnych”*. Warszawa: PWN (2021).
- [2] Ruszaj A. „Bionika w rozwoju inżynierii produkcji” [“Bionic in production engineering development”]. *Mechanik*. 5–6 (2016): 350–355, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.5-6.86>.
- [3] Shu L.H., Ueda K., Chiu I., Cheong H. “Biologically inspired design”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 60 (2011): 673–693, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.06.001>.
- [4] Lurie-Luke E. “Product and technology innovation: What can biomimicry inspire”. *Biotechnology Advances*. 32 (2014): 1494–1505, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.10.002>.
- [5] Samek A. *„Bionika. Wiedza przyrodnicza dla inżynierów”*. Kraków: Wyd. AGH (2010).
- [6] Byrne G., Dimitrov D., Monostori L., Teti R., van Houten F., Wertheim R. “Biological transformation in manufacturing”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 21 (2018): 1–32, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.03.003>.
- [7] Miehe R., Bauernhansel T., Beckett M., Brecher C. i in. “The biological transformation of industrial manufacturing. Technologies, status, and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry”. *Journal of Manufacturing Systems*. 54 (2020): 50–61, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.11.006>.
- [8] Bergs T., Schwaneberg U., Barth S., Hermann L., Grunwald T., Mayer S., Bierman F., Sözer N. “Application cases of biological transformation in manufacturing technology”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 31 (2020): 68–77, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.09.010>.
- [9] Harst S., Früchtl M., Neugebauer R. “Biological transformation in manufacturing – from a vision to industrial transfer – interim evaluation from the prospective of applied research”. 55<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*. 107 (2022): 925–930, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.086>.
- [10] Tan R., Liu W., Cao G., Shi Y. “Creative design inspired by biological knowledge: technologies and methods”. *Frontiers in Mechanical Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0511-0>.
- [11] Farzaneh H.H. “Bio-inspired design: the impact of collaboration between engineers and biologists on analogical transfer and ideation”. *Research in Engineering Design*. 31 (2020): 299–322, <https://doi.org/10.1007/s00163-020-00333-w>.
- [12] Nagel J.K. “A thesaurus for bioinspired engineering”, in: A.K. Goel et al. (eds.), *“Biologically inspired design”*. London: Springer-Verlag (2014).
- [13] “Bioengineering is richly collaborative and interdisciplinary”. <https://bioe.uw.edu/academic-programs/about-bio-engineering/>.
- [14] Pande V., Tran A. “16 Open Problems in Engineering Biology”, <https://future.com/open-problems-engineering-biology/>.
- [15] Monostori L., Váncza J. “Towards living manufacturing systems”. 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*. 93 (2020): 323–328, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.150>.
- [16] Byrne G., Damm O., Monostori L., Teti R., van Houten F., Wegener K., Wertheim R., Sammler F. “Towards high performance living manufacturing systems – a new convergence between biology and engineering”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 34 (2021), 1–6, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.10.009>.
- [17] Grzesik W., Rech J. “Finishing processes of additively manufactured metallic parts” [„Wykańczające procesy wyrobów metalowych wytwarzanych technikami przyrostowymi”]. *Mechanik*. 10 (2022): 33–37, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2022.10.18>. ■

Artykuł w wersji polskiej i angielskiej jest dostępny na: [www.mechanik.media.pl](http://www.mechanik.media.pl).