

# Digital Twin in manufacturing

## Part II. Case studies in removal and additive machining processes

### Cyfrowy bliźniak w procesach wytwórczych Część II. Przykłady zastosowań w skrawaniu i obróbce przyrostowej

WIT GRZESIK \*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2023.2.4>

In this paper, a survey of the applications of digital twins (DTs) in removal and additive machining operations performed in smart manufacturing is presented. Some representative examples of virtual modelling in these manufacturing areas at different scales and complexity, including tools, fixtures, machines, equipment and manufacturing/production systems are presented and overviewed. Current experiences of research centres and machine tools companies, which develop and implement of DT technology in the context of control and optimization of machining processes performed on CNC machine tools, are highlighted. According to the author's opinion this comprehensive survey would encourage to undertake this important manufacturing problem to implement new virtual tools for developing the I4.0 strategy.

**KEYNOTES:** manufacturing, Industry 4.0, smart manufacturing, Internet of Things, digital twin

W artykule zaprezentowano przegląd zastosowań cyfrowego bliźniaka (DT) w skrawaniu i obróbce przyrostowej. Podano przykłady o różnym poziomie złożoności, z uwzględnieniem oprzyrządowania, maszyn, procesów i systemów wytwórczych/produkcyjnych. Omówiono doświadczenia ośrodków badawczych we wdrażaniu technologii DT w kontekście sterowania procesami obróbkowymi na obrabiarkach CNC i ich optymalizacji. Zdaniem autora artykuł powinien zachęcić do podjęcia problematyki wprowadzania nowych narzędzi informatycznych w rozwoju strategii Przemysłu 4.0.

**SŁOWA KLUCZOWE:** przemysł wytwórczy, Przemysł 4.0, inteligentne wytwarzanie, internet rzeczy, cyfrowy bliźniak

### Wprowadzenie

W numerze 1/2023 *Mechanika* opisano zasady i środki rozwoju procesów wytwórczych z wyróżnieniem wielu filarów, m.in. digitalizacji, sztucznej inteligencji, internetu rzeczy (IoT), systemów cybernetyczno-fizycznych (CPS), oraz uwypukleniem roli tzw. cyfrowych bliźniaków [1].

Należy podkreślić, że cyfrowy bliźniak jest cyfrową reprezentacją obiektu fizycznego, CPS odnosi obydwie światy (obie przestrzenie) – fizyczny i cyfrowy – do cyfrowego bliźniaka i jego odpowiednika fizycznego, natomiast IoT umożliwia połączenie różnych urządzeń (środków wytwórczych w różnej skali) w świecie fizycznym [2–5].

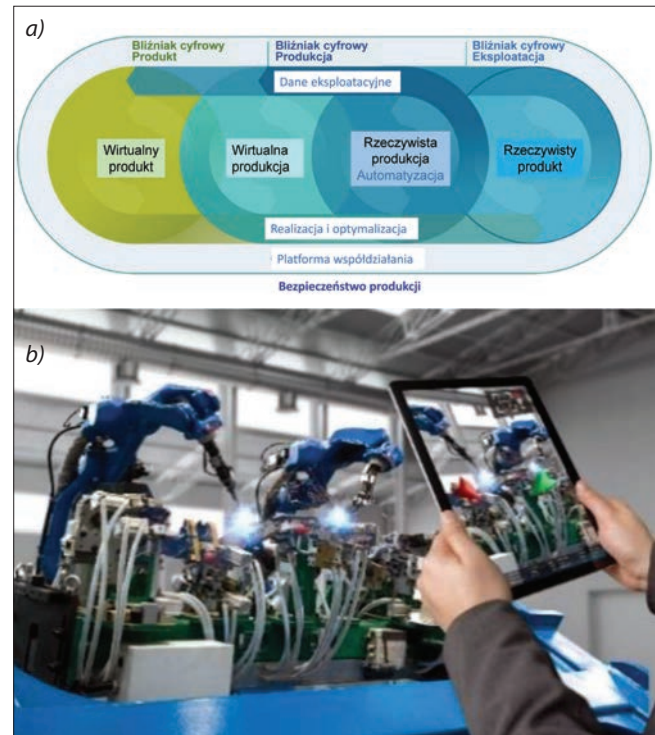


Fig. 1. The concept of virtual production in the enterprise range (a) [2] and example of virtual commissioning of production line (b) [8]  
Rys. 1. Konceptja wirtualizacji produkcji w zakresie przedsiębiorstwa (a) [2] i przykład wirtualnego sprawdzania pracy linii produkcyjnej (b) [8]

Według firmy Siemens, która dostarcza odpowiednie oprogramowanie (np. Tecnomatix Plant Simulation i Tecnomatix Process Simulate), możliwe jest zaplanowanie całego procesu wytwórczego w pełnym środowisku wirtualnym, z użyciem cyfrowego portfolio przedsiębiorstwa i cyfrowego bliźniaka reprezentującego realizowaną w tym przedsiębiorstwie produkcję [2]. Etapy wdrażania koncepcji DT na poziomie systemu produkcyjnego [1] przedstawiono na rys. 1a. Obejmują one projektowanie ustawienia maszyn, wizualizację przepływu materiałów, wykrycie wąskich gardeł i symulację kodów sterowników PLC dla sprzętu automatyki. To prowadzi do uruchomienia wirtualnej działalności/pracy, która umożliwi sprawdzanie/testowanie (rys. 1b) i optymalizację nowych linii produkcyjnych z uwzględnieniem redukcji czasu, wysiłku i ryzyka, towarzyszącego stale rzeczywistemu uruchomieniu działalności operacyjnej.

\* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik – [wit.grzesik@gmail.com](mailto:wit.grzesik@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3898-5119> – Opole, Polska

## Zastosowanie DT w produkcji

Na rys. 2 przedstawiono ogólną strukturę i zastosowanie DT w różnych formach produkcji, takich jak obróbka, montaż, logistyka i pakowanie, z wyróżnieniem wytwarzanych produktów, maszyn, operatorów i personelu obsługi. Biorąc pod uwagę długość życia produktu, zastosowanie DT można przypisać do trzech kolejnych etapów, mianowicie: projektowania, produkcji i użytkowania/serwisu. Ze względu na treść artykułu polecane są inne publikacje, np. [1, 3–5], które odnoszą specyfikę zastosowania DT do czynności projektowych i obsługi [6, 10].

Istnieją przesłanki [3, 4], że technika DT umożliwia projektowanie i symulację całych procesów produkcyjnych łącznie z układem fabryki, konfiguracją maszyn, transportem materiałów, pojemnością magazynów itp., a w następstwie – wykorzystanie tych symulacji do rozwoju modeli DT całego zakładu i planowania produkcji. Natomiast w czasie produkcji, wykorzystując zarządzanie produkcją przez symulację, weryfikację i zatwierdzanie planowania oraz harmonogramowania, DT umożliwia optymalną rekonfigurację zgromadzonych środków produkcji, wyposażenia, pracy w toku i obsługi/pracowników. Z perspektywy sterowania i realizacji poleceń wykonawczych ważne jest, że DT może śledzić wszystko, co się wydarza w środowisku/świecie fizycznym. Na tej podstawie można tworzyć prognozy operacyjne i przeprowadzać optymalizację strategii sterowania. W dodatku DT konstrukcji hali produkcyjnej może posłużyć do wykrywania i przewidywania zadań w przestrzeni wirtualnej, zanim pojawią się w rzeczywistości, czyli w przestrzeni fizycznej. W rezultacie DT dla przestrzeni fabrycznej może ułatwić optymalizację planowania produkcji, rozmieszczenia środków produkcji, procesów wytwórczych i sterowania procesami.

Ponieważ technika DT umożliwia zorganizowanie bardziej stabilnego, elastycznego i przewidywalnego procesu produkcyjnego na bazie zastosowania systemu cybernetyczno-fizycznego, sugeruje się następu-

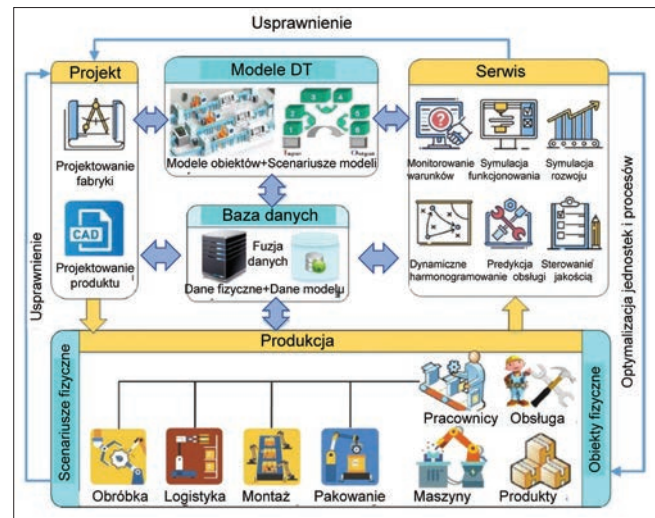


Fig. 2. The conceptual framework and application of DT in different forms of production [3]

Rys. 2. Koncepcja struktury i zastosowanie DT w różnych formach produkcji [3]

jące zastosowania praktyczne [5]: zarządzanie i harmonogramowanie wytwarzania (przez co poprawia się zdolności wytwórcze), optymalizację sterowania wytwarzaniem na bazie AI i IoT, tworzenie bardziej złożonych systemów CPS, m.in. z wykorzystaniem technik modelowania i symulacji DT, ustawienie linii produkcyjnych.

Na rys. 3 i 4 przedstawiono dwie koncepcje laboratoriów zbudowanych na Uniwersytecie Middlesex w Londynie i Politechnice w Mediolanie, które stosują technikę DT do realizacji różnych zadań z obszaru inteligentnej produkcji.

Na rys. 3 zaprezentowano strukturę dydaktycznej linii montażowej wyrobu, w której użyto cybernetyczno-fizycznego modelu firmy Festo o nazwie CP Lab [6, 12]. W jej skład wchodzi dwie komórki/wyspy produkcyjne połączone przez automatycznie sterowany pojazd (AGV). Każda z tych komórek ma stację pomostową do transportu części oraz trzy stacje z możliwością przeprowadzania niezależnych czynności

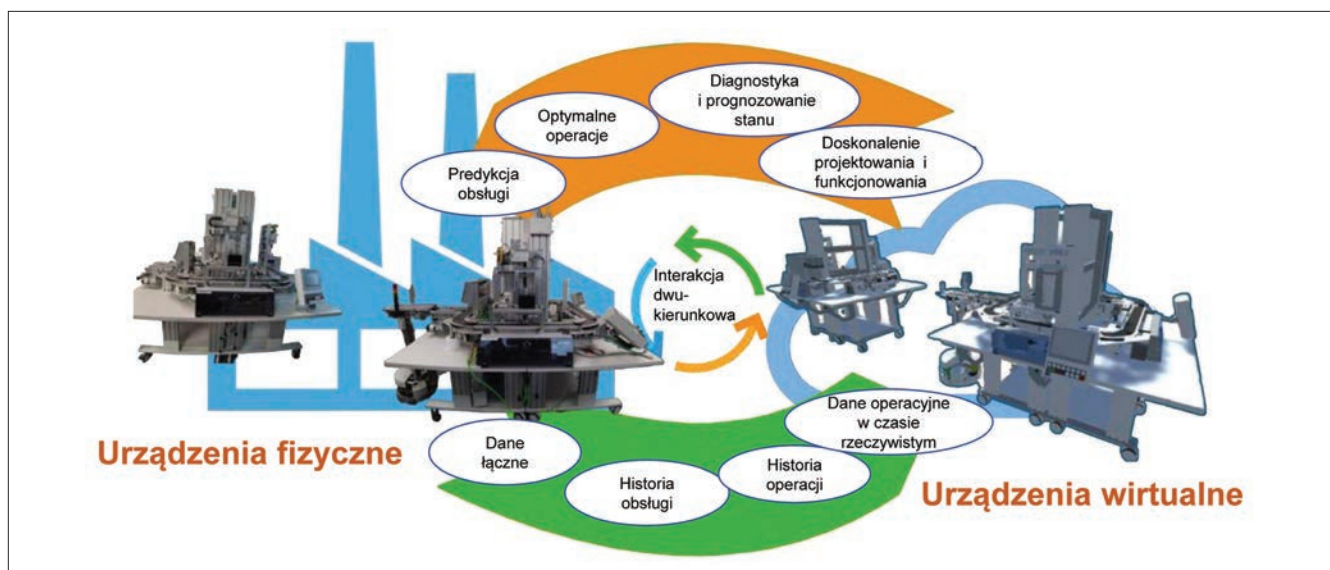


Fig. 3. The DT of a didactic product assembly line using Festo Cyber Physical Factory [6]

Rys. 3. DT dla dydaktycznej linii montażowej wyrobu na bazie Cyber Physical Factory firmy Festo [6]

montażowych. Numer realizowanej operacji i postępowanie w montażu są sprawdzane na każdej stacji za pomocą identyfikacji sygnału radiowego – techniki (RFID – *radio-frequency identification*). Rzeczywisty (fizyczny) i wirtualny obiekt są synchronizowane za pomocą komunikacji dwudrogowej. To umożliwia realizację kilku zadań, takich jak: gromadzenie danych operacyjnych i na temat utrzymania ruchu, monitorowanie danych w czasie rzeczywistym i zapewnienie wymaganych zdolności analitycznych/obliczeniowych.

Pierwszym krokiem jest zbudowanie przestrzennego modelu CPF (*cyber physical factory*) z użyciem plików CAD w systemie dostarczonym przez firmę Festo. Dzięki temu można rozdzielić model na elementy składowe, a nawet czujniki/sensory. Następnym zadaniem jest zwrócenie uwagi na wspomnianą wcześniej dwukierunkową komunikację, co osiągnięto przez wdrożenie ciągłego śledzenia ruchu przenośnika produktu. Dane z sensorów pojemnościowych zamocowanych na przenośniku oraz enkodera optycznego mierzącego prędkość obrotową silnika są przekazywane do jednostki obliczeniowej (*Unity Engine*) w celu tworzenia cyfrowego bliźniaka przenośnika. Każdy sterownik PLC w systemie ma możliwość połączenia typu serwer-klient za pomocą skryptów generowanych przez UE. W rezultacie dwukierunkowa interakcja między obiektem fizycznym i wirtualnym jest podstawą zdefiniowania DT dla CPF. W badaniach skoncentrowano się na monitorowaniu temperatury elementów i sterowania nagrzewaniem, co w dużym stopniu zależy od bieżącego stanu stacji realizującej proces [6].

Na rys. 4 przedstawiono linię montażową w skali laboratoryjnej zainstalowaną w laboratorium Przemysłu 4.0 na Wydziale Zarządzania Politechniki w Mediolanie, przeznaczoną do montażu prototypowego telefonu komórkowego. W tym systemie produkcyjnym zainstalowano DT do monitorowania zużycia energii, a cały proces obejmuje siedem etapów. Są to: (1) stacja czynności ręcznych (*manual station*) ze

stanowiskiem załadunku/rozładunku, (2) stacja pozycjonowania pokrywy czołowej (*front cover station*), gdzie czołowa płyta obudowy jest pozycjonowana na palecie, (3) stacja wiercenia (*drilling station*), gdzie w pokrywie wiercone są otwory, (4) zrobotyzowana komórka (*robotic cell*), gdzie płyta układu scalonego i bezpieczniki są wkładane do obudowy, (5) stanowisko wizyjne (*camera station*), na którym kontroluje się pozycję elementów w pokrywie, (6) stacja montażu pokrywy tylnej (*back cover station*), gdzie boczna pokrywa jest montowana razem z pokrywą czołową, (7) stacja prasy (*press station*), na której dwie części są zaciskane w jeden element. Numerem (8) oznaczono wyłącznik krańcowy, który może uruchamiać przemieszczanie elementu do zrobotyzowanej komórki (4) albo do stacji z zainstalowaną kamerą wizyjną (5). Wszystkie stacje w tym laboratorium są wyposażone w łącznik ciągnowy, sterownik PLC, moduł aplikacyjny i interfejs HMI. W przerwach między stacjami następuje odczytywanie/drukowanie niezbędnych informacji o stanie wyrobu za pomocą identyfikacji sygnału radiowego – w technice RFID (*radio-frequency identification*). Do modelowania i akwizycji danych wykorzystano pakiety Matlab i Simulink [7].

DT utworzono przez wbudowanie wirtualnej kopii każdej ze stacji (1–7) w środowisku Simulink, co pozwala na synchronizację symulacji w czasie rzeczywistym z wybranym obszarem funkcjonowania systemu. Identyfikację danych przeprowadzono w dwóch etapach, tj. przez ekstrakcję danych w pierwszym etapie z użyciem protokołu OPC UA (*Open Platform Communication Unified Architecture*) Toolbox w środowisku MATLAB (co umożliwia połączenie klienta z wybraną stacją, połączenie ze sterownikiem PLC i wizualizację danych w pakiecie Simulink) i przez wybranie właściwego modelu danej stacji w środowisku wirtualnym (do tego służy interfejs API – *application programming interface*). Szczegóły programowe i informatyczne dotyczące tworzenia DT opisano w artykułach [7] i [9].

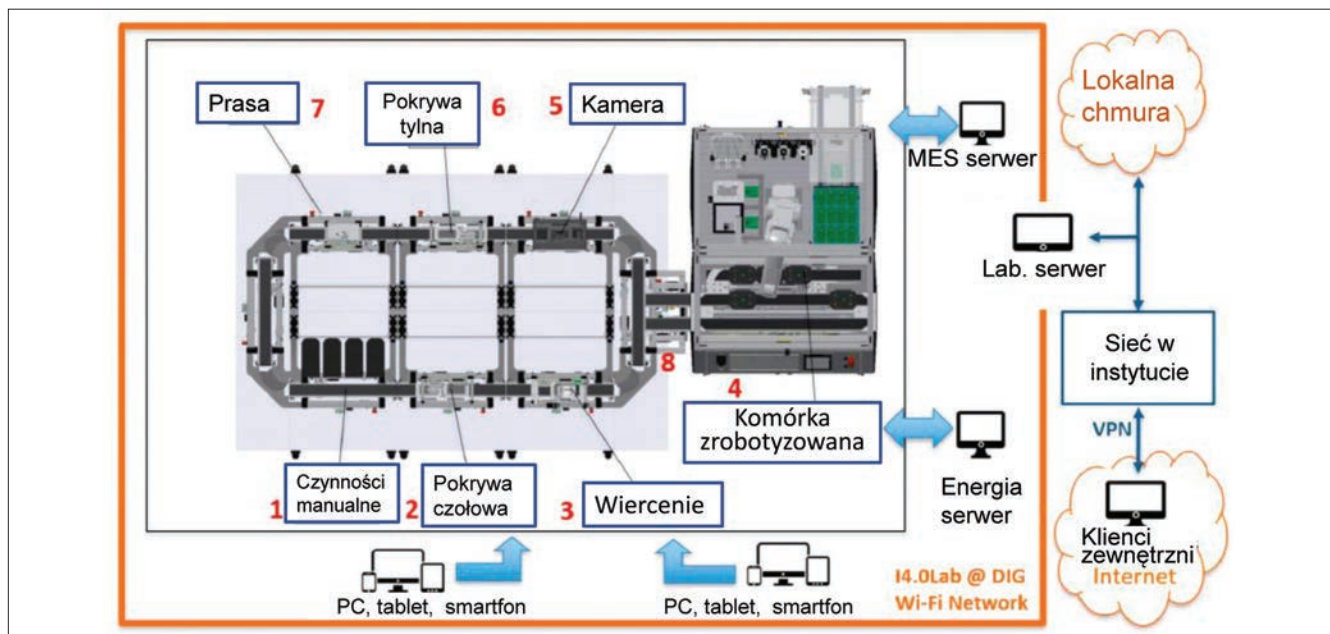


Fig. 4. The assembly line of a prototypical mobile phone installed in the Industry 4.0 laboratory [7,9]

Rys. 4. Linia montażowa prototypowego telefonu komórkowego zainstalowana w laboratorium Przemysłu 4.0 [7, 9]

## Zastosowanie DT do obrabiarek i narzędzi skrawających

Można wyróżnić kilka potencjalnych sposobów zastosowania DT do modelowania wyrobu, procesu lub systemu na różnych poziomach wytwarzania, takich jak: maszyna, komórka/stacja wytwórcza, linia wytwórcza, obiekty fabryczne czy łańcuch dostaw. Na rys. 5 pokazano trzy takie przykłady [17]. Dotyczą one następujących zadań:

- Minimalizacja wpływu przestoju pracy urządzeń. Cyfrowy bliźniak „**życia/trwałości maszyny**” (*machine health twin*) może wykorzystać dane z procesu i urządzeń do monitorowania, wykrywania problemów, diagnozy oraz prognozowania zakłóceń i uszkodzeń/awarii w pracy urządzenia. Zebrana wiedza może być przekazywana do systemu sterowania maszyny.
- Optymalizacja planowania i harmonogramowania produkcji. Cyfrowy bliźniak „**harmonogramowania i marszuty**” (*scheduling and route twin*) może zbierać dane z wydziału fabryki do analizy stanu systemu wytwórczego i możliwych obciążeń zamówieniami, zasobami magazynowymi i surowcowymi.
- Umożliwienie wirtualnego sprawdzania i odbioru. Cyfrowy bliźniak „**odbioru**” (*commissioning twin*) może wykorzystać informacje zebrane w czasie monitorowania nowego wyposażenia w trakcie badań odbiorczych do jego optymalizacji i ciągłego udoskonalania oraz wyeliminować kosztowne regulacje w trakcie lub po instalacji.

Ważnym problemem w definiowaniu cyfrowych bliźniaków w obróbce skrawaniem jest wybór systemu granic, który definiuje znaczenie danego obiektu [15, 18]. Wynika to z faktu, że samemu procesowi wytwarzania/skrawania nie przypisuje się odrębnego cyklu życia/trwałości i z tego względu nie może być rzeczywistym bliźniakiem fizycznym i mieć wirtualnego odpowiednika (DS lub DT). W przypadku skrawania, które jak każdy proces jest zasadniczo opisywane za pomocą funkcji przejścia charakteryzującej zmianę stanu obiektów fizycznych wskutek ich interakcji, bliźniaki fizyczne i cyfrowe należy odnieść do układu obrabiarka–narzędzie–przedmiot obrabiany (o-n-p) oraz możliwie do cieczy obróbkowej. Trzy wymienione domeny modeli DS/DT wyróżnione w procesie skrawania przedstawiono na rys. 6.

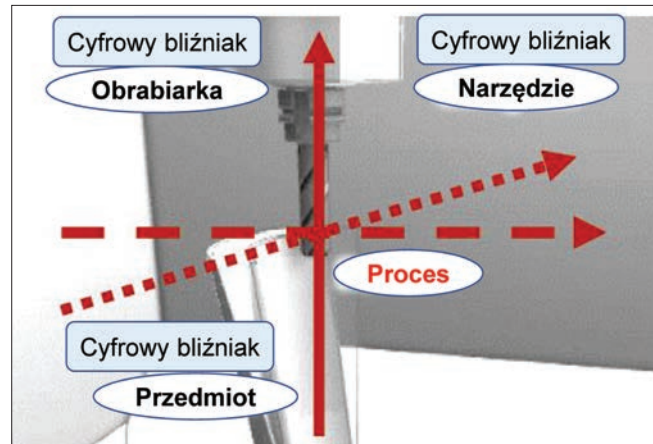


Fig. 6. Domains of the DT model in machining process [15, 18]  
Rys. 6. Domeny modelu DT w procesie skrawania [15, 18]

W przypadku obrabiarek skrawających bliźniaki cyfrowe mogą zostać użyte do oceny długości życia/eksploatacyjnej trwałości w dwojaki sposób. Pierwszy dotyczy rozwoju budowy i uruchomienia obrabiarki, ponieważ jest to specyficzny etap, kiedy zadania inżynierów mechaników, elektryków i automatyków są po raz pierwszy zintegrowane w jednej maszynie. Wirtualne sprawdzanie obrabiarki pozwala inżynierom przetestować, ocenić i zoptymalizować mechaniczne, elektryczne i logiczne aspekty projektu maszyny, jak również występującą między nimi integrację, ale przed montażem w zakładzie. Po sprawdzeniu, produkcji i dostarczeniu do zakładu technicy serwisu mogą wykorzystać cyfrowego bliźniaka do przeprowadzenia kontroli jakości w celu ewentualnej poprawy funkcjonowania i współdziałania zespołów fizycznych. Przekłada się to także na skrócenie okresu rozwoju i uruchomienia maszyny. Drugi przypadek zastosowania DT może być umiejscowiony w sektorze obróbki, już podczas pracy obrabiarki. Operator obrabiarki może użyć DT do sprawdzenia i zagwarantowania, że programy sterowania CNC działają płynnie, bez usterek i dostarczają żądaną część za pierwszym razem. Ważne jest również zapewnienie, że nowe programy sterujące CNC nie spowodują kolizji narzędzia lub uchwytu z maszyną lub przedmiotem.

Obrabiarki CNC (CNCMT – *CNC machine tool*) są powszechnie stosowane do obróbki złożonych, precyzyjnych części w produkcji o zmiennym asortymencie

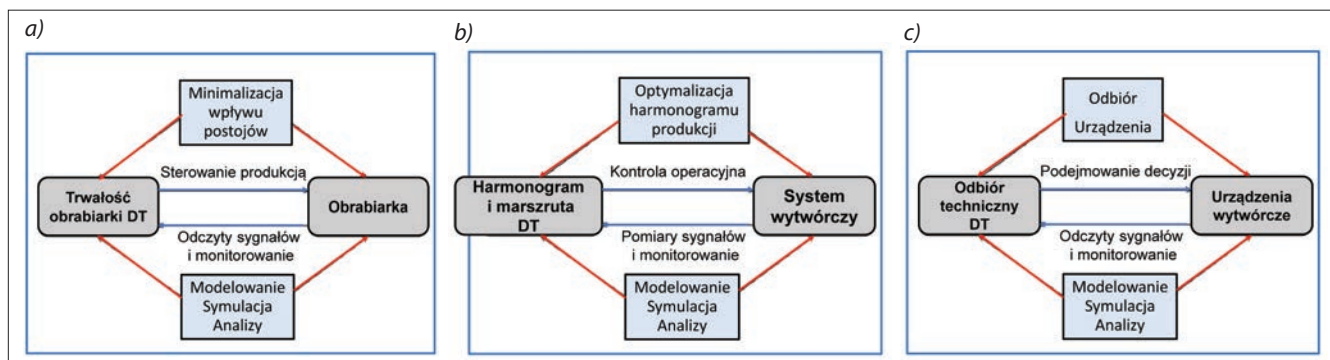


Fig. 5. Three examples of the use of digital twins in manufacturing process: a) machine health twin, b) scheduling and route twin, c) commissioning twin [17]

Rys. 5. Trzy przykłady zastosowania bliźniaków cyfrowych w procesie wytwórczym: a) cyfrowy bliźniak trwałości obrabiarki, b) cyfrowy bliźniak harmonogramowania i marszuty, c) cyfrowy bliźniak odbioru technicznego [17]

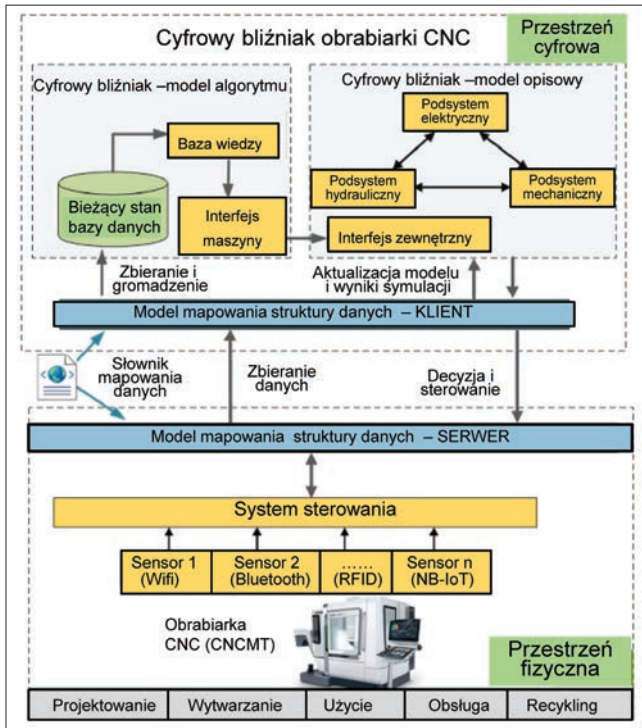


Fig. 7. DTMT modelling and application framework [14]

Rys. 7. Struktura modelowania i zastosowania obrabiarki (DTMT) [14]

i w małych seriach. Obrabiarka CNC jest przykładem typowego urządzenia mechatronicznego o dużej elastyczności i wysokiej wydajności (pisał o tym wielokrotnie w *Mechaniku* prof. J. Kosmol). Centralnym zespołem obrabiarki CNC jest układ sterowania, który składa się z jednostki CNC, sterowników PLC, interfejsu HMI i układu I/O. Z tego względu zastosowanie cyfrowych bliźniaków (DTMT) koncentruje się zasadniczo na tych elementach obrabiarki. Tworzenie modeli DTMT opisano dokładnie w pracach [14, 18, 19], bazując na podziale na układ sterowania, serwozespół, zespół wykonawczy i urządzenia pomocnicze. Należy pokreślić, że model cyfrowego bliźniaka takiego obiektu utworzonego na tej zasadzie musi mieć możliwość scalania i rozdzielania danych

pozyskanych z wielu źródeł, a także ich mapowania (czyli przenoszenia danych między systemami). Na rys. 7 przedstawiono strukturę cyfrowego bliźniaka, który ma możliwość zrealizowania wymienionych zdolności/funkcji systemu.

W tym celu realizowane są następujące zadania [14]:

1) Konieczne jest utworzenie systemu czujników, aby wykrywać i rozpoznawać zachowanie MT i otoczenia. Dane i informacje uzyskane z przestrzeni fizycznej są za pomocą tego układu mapowane/odwzorowywane, co pozwala na ich analizę i podejmowanie decyzji. Przestrzeń fizyczna obejmuje oprócz fizycznego modelu DTMT czujniki do monitorowania temperatury, prędkości, pozycji, drgań itp.

2) W przestrzeni cyfrowej DTMT składa się modelu opisowego (*descriptive model*) i modelu algorytmu (*algorithm model*) DTMT. Zadaniem modelu opisowego jest podanie charakterystyk geometrycznych, fizycznych i elektrycznych obrabiarki CNC. Z kolei model algorytmu DTMT służy do gromadzenia i analizy danych o bieżącym stanie obrabiarki i podejmowania decyzji z użyciem algorytmu uczenia maszynowego.

3) DTMT jest odwzorowywaniem MT w czasie rzeczywistym w skali 1:1. To daje dostęp do standardowych odczytów i zapisów bieżących danych z układu CNC i sensorów. W tym celu tworzony jest model mapowania (*mapping model*) jako interfejs sterowników komunikacyjnych, który pozwala DTMT współdziałać z fizyczną obrabiarką (CNCMT) w czasie rzeczywistym. Jak wynika z rys. 7, model mapowania DTMT składa się z modelu mapowania struktury danych dla serwera, klienta i odpowiedniego słownika mapowanych danych. Do usług modelu tworzenia/sporzadzania map danych należą połączenia/interfejsy między serwerami jako dostawcami modelu informacyjnego i klientami jako użytkownikami tego modelu.

Zastosowanie DT do monitorowania jakości wyrobu (cienkościennej, monolitycznej części stosowanej w lotnictwie) przedstawiono na rys. 8. W tym przypadku do tworzenia DT wykorzystano dane opracowane z użyciem sztucznej inteligencji [13].

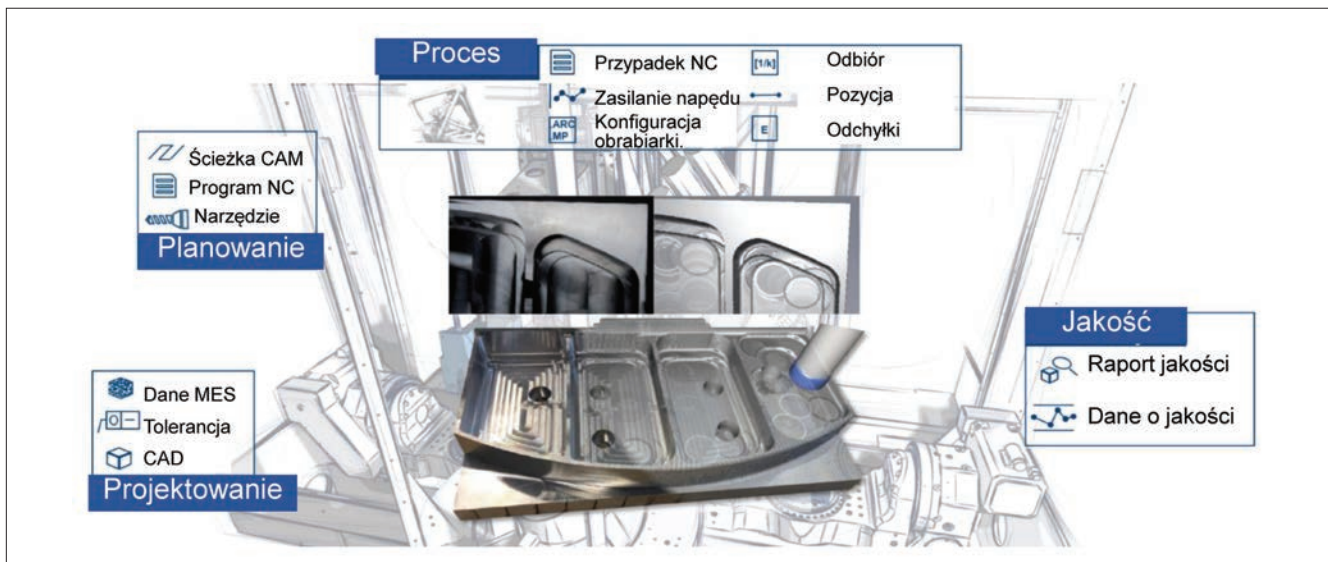


Fig. 8. An illustration of DT in machining for workpiece quality monitoring [13]

Rys. 8. Ilustracja bliźniaka cyfrowego w obróbce: monitorowanie jakości obrabianego przedmiotu [13]



Fig. 9. The digital twin along the process chain for a milling cutter [15]  
Rys. 9. Bliźniak cyfrowy łańcucha procesu wytwarzania frezu [15]

W przykładzie przedstawionym na rys. 8 DT jest tworzony przez dynamiczne odwzorowanie procesu obróbkowego części lotniczej, gdy dane źródłowe pochodzą z kontekstualizacji (czyli rozpoznawania i reagowania na kontekst, w jakim jest używana aplikacja) łańcucha systemu CAD-CAM-CNC-CAQ. Obecnie takie techniki jak druk 3D oraz produkcja lekkich elementów metalowych i kompozytowych są najczęściej realizowane na zasadzie prób i błędów. Ich rozwój/dopracowanie prowadzi nie tylko do wzrostu innowacyjności i oszczędności surowców w fazie projektowania i wytwarzania, ale także do wzrostu zrównoważoności prowadzonych operacji, redukcji użycia energii i emisji CO<sub>2</sub>.

Przykładem nowej koncepcji zastosowania cyfrowego bliźniaka w procesie wytwarzania jest łańcuch procesu technologicznego wykonania monolitycznego frezu węglkowo przedstawiemy na rys. 9. Z proszku węglkowo-kobaltowego wykonywany jest prętowy półfabrykat, który następnie się szlifuje. Końcowa operacja może dotyczyć nałożenia powłoki przeciwzużyciowej. W tym przypadku DS/DW mógłby być tworzony przez pomiar temperatury i czasu spiekania, jak również kontrolę wymiaru ziarna, ponieważ warunki spiekania i jakość (jednorodność) proszku decydują o właściwościach mechanicznych węgla spiekanego (KIC, HV10).

### Zastosowanie DT do monitorowania procesu skrawania i sterowania nim

Z analizy dotychczasowych osiągnięć wynika, że koncepcja DT odniesiona do sterowania procesem skrawania, monitorowania i sterowania obrabiarką może być przedstawiona w ogólny sposób, jak na rys. 10 [18]. W tej koncepcji DT odniesionej do modelu geometrycznego CAD takie elementy, jak: przedmiot i uchwyt obróbkowy, geometria narzędzia skrawającego oraz konfiguracja obrabiarki, są użyte jako dane wejściowe do systemu CAM. Na tej podstawie generuje się ścieżki/trajektorie ruchu narzędzia i następnie dobiera się warunki skrawania/parametry skrawania. Te informacje są przesyłane z programów cyfrowych do obrabiarek w zakładzie. Z kolei obrabiarka, narzędzie i uchwyt mają zainstalowane różne sensory, aby zbierać dane z procesu, oprzyrządowania i obrabiarki, które następnie są wykorzystywane w przestrzeni wirtualnej do tworzenia plików programów CAM, optymalizacji ścieżek ruchu narzędzia i parametrów procesu skrawania. Niektóre z tych modeli to me-

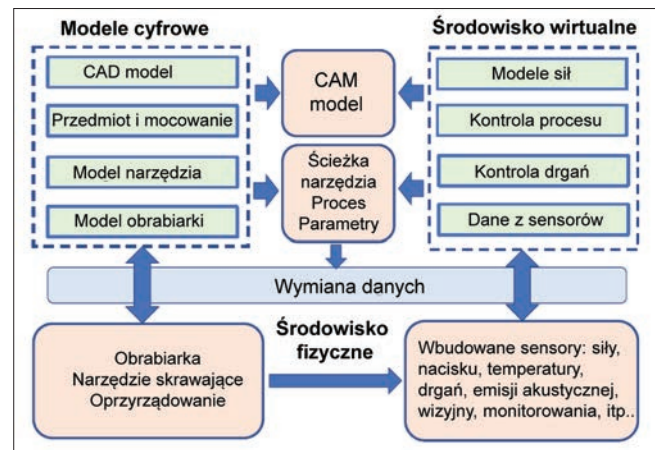


Fig. 10. The digital twin envisioned for machining process and machine tool control [18]  
Rys. 10. Cyfrowy bliźniak przewidywany do sterowania procesem skrawania i obrabiarką [18]

chanistyczne modele sił, modele analityczne, modele cieplne i modele numeryczne MES. Należy zauważyć, że te składowe elementy środowiska wirtualnego nie mogą być jeszcze uogólniane w celu tworzenia cyfrowych bliźniaków dla całych systemów obróbkowych.

W pracach [14, 18] do optymalizacji procesu skrawania na poziomie ścieżki ruchu narzędzia stosowano wiele komercyjnych pakietów oprogramowania CAD/CAM i MES, takich jak: Vericut firmy CGTech, NCSIMUL firmy Spring Technologies, NX firmy Siemens oraz Production Module firmy Third Wave Systems. Niektóre z nich są opisane w książce o programowaniu obrabiarek CNC [20].

Na rys. 11 przedstawiono inną koncepcję DT do monitorowania i sterowania procesem skrawania. DT składa się ze środowiska cyfrowego, które jest repliką środowiska fizycznego połączonego interfejsem z oprogramowaniem pośredniczącym, które ułatwia łączność oraz gromadzenie i transfer danych, informacji i wiedzy. Podobnie jak w poprzednim przypadku, modele CAD dla przedmiotu, uchwytu i narzędzi są wykorzystane w pakiecie CAD/CAM do identyfikacji trajektorii ruchu narzędzia dla wyselekcjonowanych parametrów skrawania. Parametry skrawania dobiera się na podstawie informacji o narzędziu i materiale obrabianym, albo na podstawie fizycznych modeli predykcyjnych [7, 9, 21]. Działania te są wspierane przez dane pozyskiwane z sensorów w celu zwiększenia wydajności procesu (MRR) i poprawy jakości powierzchni. Co jest nowością, mierzone składowe siły skrawania są wykorzystane

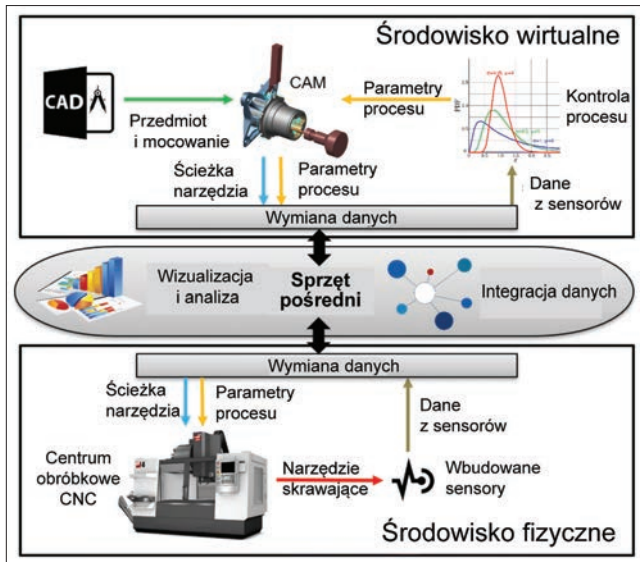


Fig. 11. A digital twin concept for process monitoring and control in chatter-free machining [7, 9]

Rys. 11. Koncepcja cyfrowego bliźniaka do monitorowania i sterowania procesem obróbki wolnym od drgań samowzbudnych [7, 9]

do predykcji parametrów zapewniających prowadzenie procesu bez drgań samowzbudnych (*chatter-free process*). W tym celu opracowano nowy model drgań samowzbudnych w procesie mikrofrezowania [7], z którego można wyznaczyć graniczną głębokość skrawania zapewniającą stabilną obróbkę. Model został wbudowany w cyfrowego bliźniaka dla systemu sterowania procesem.

Obecnie można zauważyć tendencję uwzględniania w cyfrowych bliźniakach tworzących do monitorowania procesu wytwarzania problematyki obsługi/utrzymania ruchu (*maintenance*) w zrównoważonym wytwarzaniu w formie odpowiedniego modułu [10].

Celem takiego podejścia – co zasygnalizowano już wcześniej – jest eliminacja zakłóceń pojawiających się w procesie skrawania, utrzymanie stabilności procesu na podstawie wykresów stabilności [21], sygnalizacja konieczności korekty parametrów skrawania, np. przez bieżącą ocenę chropowatości powierzchni, kontrola stanu obrabiarki CNC przez kompensację odkształceń cieplnych śruby tocznej oraz przewidywanie zużycia ostrza na podstawie sygnałów pomiarowych składowych sił skrawania, emisji akustycznej (AE) i drgań mechanicznych [22, 23]. W pracy [10] dokonano klasyfikacji odpowiednich kryteriów i modeli w formie drzew decyzyjnych.

Na rys. 12 pokazano koncepcję tworzenia odmiany DT (dosłownie: sprawdzian cyfrowy – *digital thread* [16]) w pętli sprzężenia zwrotnego wspomagającego inteligentne wytwarzanie łopatki wirnika turbiny lotniczej. Potrzeba takiego podejścia wynika z konieczności uaktualniania i optymalizacji DT zgodnie z wymaganiami wytwórczymi, które są zorientowane na poprawę jakości łopatek i wzrost efektywności procesu. Tzw. sprawdzian cyfrowy funkcjonujący w pętli sprzężenia zwrotnego służy do uzyskania interakcji między modelami cyfrowych bliźniaków, co gwarantuje ich zwartość, możliwość ponownego użycia i wymierną korzyść w procesie ciągłego rozwoju wyrobu. Wprowadzenie odmiany DT w pętli sprzężenia zwrotnego, jak na rys. 12, przyniosło duże korzyści w zakresie zwiększenia zdolności produkcyjnych monolitycznych łopatek turbin do silników lotniczych, a także części samochodowych i skomplikowanych części obrabiarek [16].

W pracy [11] zaproponowano rozszerzenie dotychczasowej klasyfikacji DT i użycia jej do oceny skuteczności wpływu bliźniaków cyfrowych w dużej, średniej

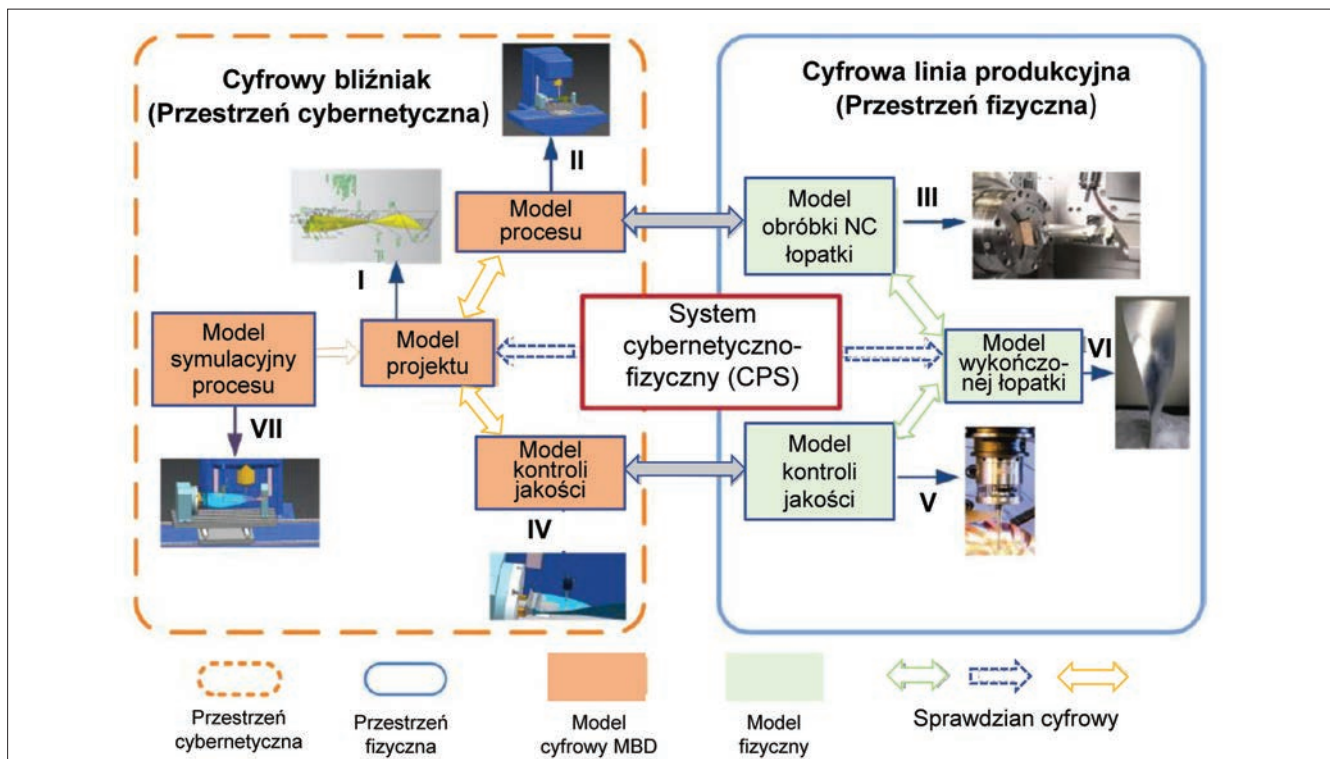


Fig. 12. Application mode of closed-loop digital twin for fan blade smart manufacturing [16]

Rys. 12. Odmiana DT w pętli sprzężenia zwrotnego w przypadku inteligentnego wytwarzania łopatki wirnika [16]

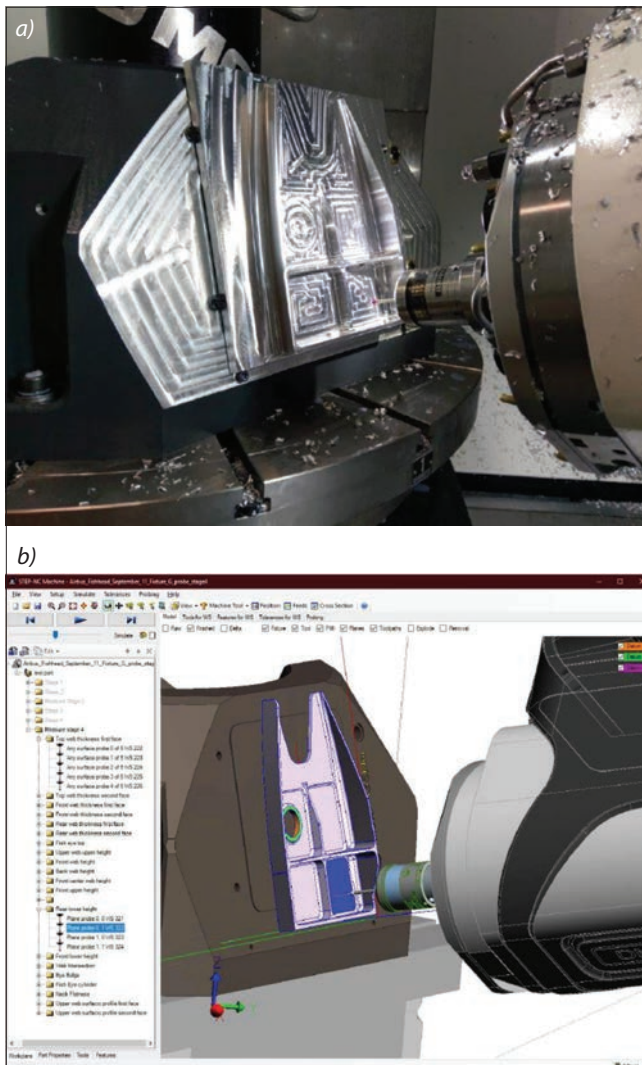


Fig. 13. Example of application mode of digital twin for monolithic part manufacturing: a) physical twin, b) digital twin [11]

Rys. 13. Przykład zastosowania DT w wytwarzaniu części monolitycznej: a) bliźniak fizyczny, b) bliźniak cyfrowy [11]

i małej skali (czyli z jednym agentem) w strukturze zaproponowanej w normie ISO 23247 [24]. Dotychczasowy stan standaryzacji DT opisano w I części artykułu [1].

Przykład zastosowania DT w wytwarzaniu części monolitycznej odnosi się do małej skali i został przedstawiony po raz pierwszy w 2018 r. na targach MTS przez firmę STEP Tools Inc., Troy, USA. Na podstawie eksperymentów obróbkowych przeprowadzonych na dwóch obrabiarkach sterowanych w pięciu osiach wykazano korzyści ze stosowania DT w postaci uzyskania wytrzymałej, cienkościennej struktury przedmiotu, obniżki kosztów narzędziowych i przeprowadzenia obróbki adaptacyjnej.

### Zastosowanie DT w obróbce przyrostowej

Ostatnie badania, podsumowane w pracach [25, 26], wskazują, że jest możliwe opracowanie koncepcji DT pierwszej generacji także dla obróbki przyrostowej (AM). Jednak trzeba uwzględnić wyzwania związane z dużą liczbą proponowanych technik AM [27], a więc także konieczność zbudowania modeli odpowiednich procesów, urządzeń i oprogramowania. W pionierskiej pracy [26] zaproponowano blokową strukturę DT dla obróbki AM, z zastosowaniem urządzenia do druku 3D, przedstawioną na rys. 14.

Zgodnie z rys. 14 struktura DTAM dla druku 3D składa się z modelu mechanicznego, modelu wykrywania bieżącego stanu i sterowania oraz modelu statystycznego, a także dużego zbioru danych (*big data*) i elementu uczenia maszynowego (*machine learning*). W trakcie prowadzonych badań wykazano, że stosowanie cyfrowego bliźniaka dla drukarki 3D zmniejsza znacznie liczbę testów koniecznych do uzyskania wymaganych właściwości produktu oraz skraca czas potrzebny do oceny jego jakości, a także redukuje koszty

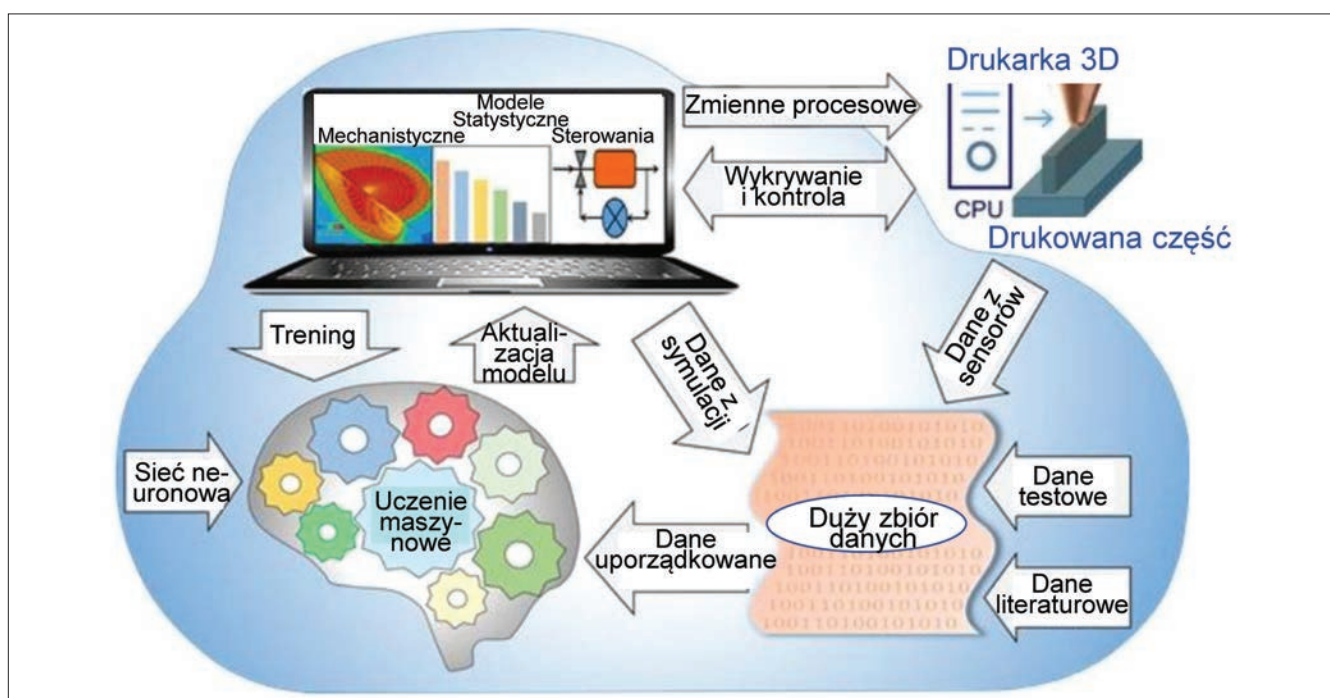


Fig. 14. Logical representation of the digital twin for additive manufacturing [26]

Rys. 14. Poglądowe przedstawienie cyfrowego bliźniaka dla wytwarzania przyrostowego [27]



wytwarzania (skraca się czas między projektem i produkcją).

Jak podkreślono wcześniej, konieczne jest opracowanie cyfrowej reprezentacji w czasie rzeczywistym zjawisk fizycznych występujących w obróbce przyrostowej, która napotyka poważne przeszkody w postaci ograniczeń obliczeniowych dotyczących takich problemów, jak: przepływ ciepła i rozkład temperatury, krzepnięcie roztopionego materiału w jeziorku, generowanie naprężeń własnych i powstawanie zniekształceń, struktury i właściwości drukowanych części, jak również warunków operacyjnych pracy maszyn. Wymaga to zainstalowania odpowiednich czujników. O skali problemu niech świadczy fakt, że do wyznaczenia rozkładu temperatury metodą MES w części kształtowanej metodą LDED (*laser-direct energy deposition*) należy rozwiązać 3,5 bln równań liniowych tylko dla jednej nałożonej warstwy, co wymaga ok. 50 min czasu obliczeniowego na komputerze z procesorem 3.40 GHz i7 i 8 GB RAM [26].

#### LITERATURA

- [1] Grzesik W. „Digital twin in manufacturing. Part I. State of the art, architecture and applications [Cyfrowy bliźniak w procesach wytwórczych. Część I. Stan zagadnienia, architektura i zastosowania]”. *Mechanik*. 1 (2023): 8–13, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2023.1.1>.
- [2] „Digital production planning and virtual commissioning”, <https://new.siemens.com/global/en/markets/automotive-manufacturing/digital-twin-production.html> (dostęp: listopad 2022).
- [3] Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A. “Enabling technologies and tools for digital twin”. *Journal of Manufacturing Systems*. 58 B (2021): 3–21, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>.
- [4] Warke V., Kumar S., Bongale A., Kotecha K. “Sustainable development of smart manufacturing driven by the digital twin framework: a statistical analysis”. *Sustainability*. 13 (2021): 10139, <https://doi.org/10.3390/su131810139>.
- [5] Yang D., Karimi H., Kaynak O., Yin S. “Developments of digital twin technologies in industrial, smart city and healthcare sectors: a survey”. *Complex Engineering Systems*. 1:3 (2021): <https://doi.org/10.20517/ces.2021.06>.
- [6] Mihai S., Davis W., Hung D.V., Trestian R., Karamanoglu M., Barn B., Prasad R.V., Venkataraman H., Nguyen H. “A Digital Twin Framework for Predictive Maintenance in Industry 4.0”. Conference paper. Middlesex University Research Repository (2021): <https://www.researchgate.net/publication/348629312>.
- [7] Cimino Ch., Negri E., Fumagalli L. “Review of digital twin applications in manufacturing”. *Computers in Industry*. 113 (2019): 103130, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>.
- [8] “Digital Twin Applications in Manufacturing”, <https://imr.ie/2021/01/11/digital-twin-applications-in-manufacturing/> (dostęp: listopad 2022).
- [9] Afazov S., Scrimieri D. “Chatter model for enabling a digital twin in machining”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 110 (2020): 2439–2444, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06028-9>.
- [10] Rojek I., Mikołajewski D., Dostatni E. “Digital Twins in Product Lifecycle for Sustainability in Manufacturing and Maintenance”. *Applied Science MDPI*. 11, 31 (2021): <https://dx.doi.org/app11010031>.
- [11] Hardwick M. “Assessment of Digital Twin manufacturing frameworks”, <https://www.nist.gov> (dostęp: listopad 2022).
- [12] Raza M., Kumar P.M., Viet Hung D., Davis W., Nguyen H., Trestian R. “A Digital Twin Framework for Industry 4.0 Enabling Next-Gen Manufacturing”. *2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*. (2020): 73–77, <https://doi.org/10.1109/ICITM48982.2020.9080395>.
- [13] Huang Z., Shen Y., Li J., Fey M., Brecher Ch. “A survey on AI-driven Digital Twins in Industry 4.0: smart manufacturing and advanced robotics”. *Sensors MDPI*. 21 (2021): 6340, <https://doi.org/10.3390/s21196340>.
- [14] Luo W., Hu T., Zhang Ch., WeiY. “Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy”. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 10 (2018): 1129–1140, <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0946-5>.
- [15] Bergs T., Gierlings S., Auerbach T., Klink A., Schraknepper D., Augspurger T. “The concept of digital twin and digital shadow in manufacturing”. *Procedia CIRP*. 101 (2021): 80–84, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.010>.
- [16] Zhang X., Zhu W. “Application framework of digital twin-driven product smart manufacturing system: a case study of aeroengine blade manufacturing”. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 16 (5) (September-October 2019): 1–16, <https://doi.org/10.1177/1729881419880663>.
- [17] Shao G., Helu M. “Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements”. *Manufacturing Letters*. 24 (2020): 105–107, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.04.004>.
- [18] Jarosz K., Ozel T. “Machine learning approaches towards digital twin development for machining systems”. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 15/2-3 (2022): 127–147, <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2022.124922>.
- [19] MaX., TaoF., ZhangM., WangT., ZuoY. “Digital twin enhanced human-machine interaction in product lifecycle”. *Procedia CIRP*. 83 (2019): 789–793, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.330>.
- [20] Grzesik W., Niesłony P., Kiszka P. „Programowanie obrabiarek CNC”. Warszawa: PWN (2020).
- [21] Grzesik W. „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”. Warszawa: PWN (2018).
- [22] Bartoszek M., Grzesik W., Chudy R. „Zastosowanie wielosensorowego systemu pomiarowego do monitorowania procesu skrawania – przypadek sekwencyjnych procesów toczenia i nagniatania”. *Mechanik*. 1 (2021): 6–12, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2021.1.1>.
- [23] Grzesik W., Żak K., Niesłony P., Chudy R. „Detection of the occurrence of cutting vibration in surface profiles generated in CBN precision hard turning”. *Procedia CIRP*. 71 (2018): 89–92, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.077>.
- [24] ISO 23247 – Automation systems and integration – Digital Twin Framework for Manufacturing, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:23247>.
- [25] Zhang L., Chen X., Zhou W., Cheng T., Chen L., Guo Z., Han B., Lu L. “Digital Twins for Additive Manufacturing: A State-of-the-Art Review”. *Applied Science MDPI*. 10 (2020): 8350, [doi.org/10.3390/app10238350](https://doi.org/10.3390/app10238350).
- [26] Mukherjee T., DebRoy T. “A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components”. *Applied Materials Today*. 14 (2019): 59–65: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.11.003>.
- [27] Grzesik W., Ruszaj A. *Hybrydowe metody obróbki materiałów konstrukcyjnych*. Warszawa: PWN (2021). ■