

Organizacja produkcji stropów typu filigran w warunkach cyfryzacji przemysłu budowlanego

Production organization of filigran-type slabs in the conditions of digitalization of the construction industry



dr inż. Aleksander Nicał

Politechnika Warszawska,
Wydział Inżynierii Lądowej
aleksander.nical@pw.edu.pl
ORCID: 0000-0001-7124-4481

Streszczenie

Artykuł przedstawia analizę rozwoju technologii stropów typu filigran w kontekście współczesnych trendów cyfryzacji, automatyzacji oraz wdrażania założeń Przemysłu 4.0. Omówiono genezę systemu filigran oraz jego ewolucję od rozwiązań stalowo-dźwigarowych do prefabrykowanych płyt żelbetonowych stanowiących obecnie istotny element nowoczesnego budownictwa. Szczególną uwagę poświęcono charakterystyce technicznej stropów, obejmującej budowę warstwową, zastosowanie kratownic przestrzennych, parametry geometryczne oraz możliwości kształtowania i prefabrykacji elementów. W artykule przedstawiono również kluczową rolę modelu BIM jako centralnego źródła danych w procesie projektowo-produkcyjnym oraz wskazano na integrację BIM z systemami ERP i MES. Omówiono znaczenie cyfrowych linii produkcyjnych, w tym systemów obiegowych oraz mechanizmów

optymalizacji rozmieszczenia elementów, które wpływają na efektywność wykorzystania zasobów. W części końcowej wskazano kierunki dalszego rozwoju branży prefabrykacji, obejmujące zastosowanie cyfrowych bliźniaków, sztucznej inteligencji oraz koncepcji Przemysłu 5.0. Podkreślono, że integracja technologii cyfrowych prowadzi do zwiększenia efektywności produkcji, poprawy jakości prefabrykatów oraz redukcji kosztów i wpływu środowiskowego. Wnioski wskazują, że stropy filigran stanowią przykład technologii, której rozwój jest ściśle powiązany z postępującą cyfryzacją sektora budowlanego. Dodatkowo należy podkreślić rosnące znaczenie integracji danych w czasie rzeczywistym oraz automatyzacji decyzji produkcyjnych, które w przyszłości mogą całkowicie zmienić model zarządzania zakładami prefabrykacji i zwiększyć ich elastyczność operacyjną.

Słowa kluczowe stropy filigran, automatyzacja produkcji, cyfryzacja budownictwa

Abstract

The article presents an analysis of the development of filigran slab technology in the context of contemporary trends in digitalization, automation, and the implementation of Industry 4.0 principles. The study discusses the origin of the filigran system and its evolution from steel truss-based solutions to precast reinforced concrete slabs, which currently constitute an important element of modern construction. Particular attention is given to the technical characteristics of the slabs, including their layered structure, the use of spatial trusses, geometric parameters, and the possibilities of shaping and prefabricating elements. The article also presents the key role of the BIM model as a central data source in the design and production process. The integration of BIM with ERP and MES systems is also indicated. The importance of digital production lines is discussed, including circulation systems and

nesting optimisation mechanisms, which affect resource efficiency. The final part outlines the directions of further development in the precast concrete industry, including the application of digital twins, artificial intelligence, and the concept of Industry 5.0. It is emphasised that the integration of digital technologies leads to increased production efficiency, improved precast quality, and reduced costs and environmental impact. The conclusions indicate that filigran slabs represent a technology whose development is closely linked to the ongoing digitalisation of the construction sector. Additionally, it should be highlighted that the growing importance of real-time data integration and automated production decision-making may in the future completely transform the management model of precast manufacturing plants and increase their operational flexibility.

Keywords filigran slabs, production automation, construction digitalization

WPROWADZENIE

Z technologią systemu budowlanego filigran związana jest osoba Stefana Kellera, autora ponad 40 patentów obejmujących rozwiązania z zakresu konstrukcji budowlanych, technologii ich wytwarzania oraz urządzeń wykorzystywanych w procesach produkcyjnych. W 1948 r. opatentował lekkie stalowe dźwigary dachowe o wysokiej nośności, które określił mianem „filigran” [1]. Nazwa ta wywodzi się od włoskiego słowa *filigraneri*, oznaczającego coś delikatnego i finezyjnego, co trafnie oddawało charakter opracowanej konstrukcji. W tym samym roku Keller założył przedsiębiorstwo Filigranbau Keller K.G. W kolejnym roku rozpoczęto intensywne prace badawczo-rozwojowe nad gęstożebrowymi stropami filigran oraz pierwszymi rozwiązaniami opartymi na kratownicowych dźwigarach wyposażonych w betonową stopkę dolną. Efektem tych działań było opracowanie w 1950 r. stropu gęstożebrowego z wypełnieniem z pustaków ceramicznych, stanowiącego rozwiązanie porównywalne z późniejszymi systemami Fert, Teriva czy DZ. W kolejnych latach rozwijano koncepcję płytowego prefabrykatu stropowego filigran, który po serii udoskonaleń technologicznych został wprowadzony do praktyki rynkowej w latach 1964–1965 [1]. Warto podkreślić, że pierwotnie nazwa „filigran” odnosiła się do całej rodziny systemów stropowych. W polskiej praktyce inżynierskiej termin ten utrwalił się jednak przede wszystkim jako określenie płytowych prefabrykatów stropowych, które szeroką popularność zyskały dopiero pod koniec lat 90. XX w. [1]. Obecna od drugiej dekady transformacja w kierunku Przemysłu 4.0 nie omija przemysłu produkcyjnego prefabrykatów budowlanych. Tradycyjne zakłady produkcyjne prefabrykatów dla budownictwa ewoluują w kierunku cyfrowych i inteligentnych ekosystemów [2]. Wśród czynników przyczyniających się do tych zmian wymienia się m.in. niską produktywność pracy

w sektorze budowlanym, utrzymującą się zasadniczo na zbliżonym poziomie przez ostatnie ok. 100 lat [3], wysoką emisyjność budownictwa objawiającą się tym, że budynki generują ok. 39% emisji dwutlenku węgla (CO_2) związanej z wykorzystaniem energii oraz

korzystnie na bezpieczeństwo pracy oraz aspekty zdrowotne w kontekście zagrożeń pandemicznych [6]. Najnowsze trendy rozwoju linii produkcyjnych dla płyt typu filigran zakładają coraz szersze wykorzystanie sztucznej inteligencji polegające m.in. na inteligentnym

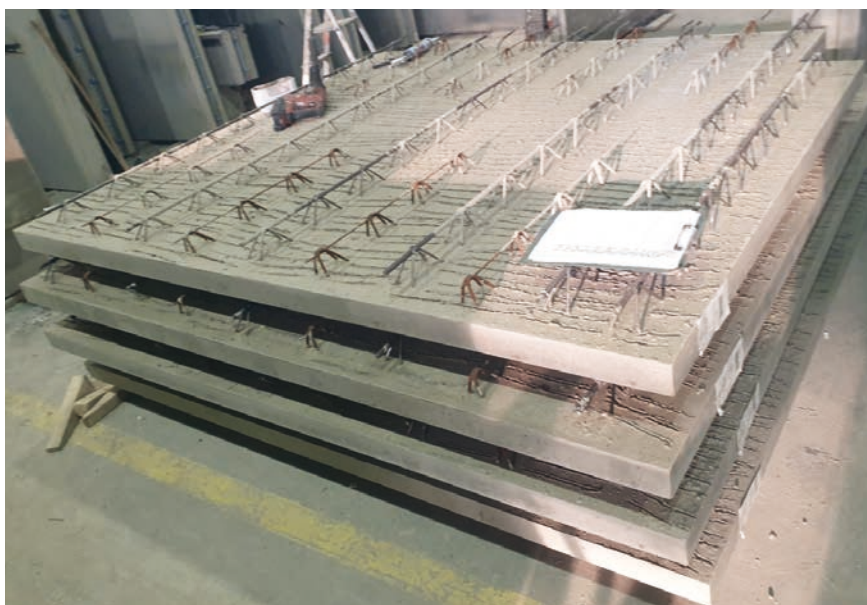
Nazwa filigran wywodzi się od włoskiego słowa *filigraneri* oznaczającego coś delikatnego i finezyjnego.

odpowiadają za ponad 36% światowego zużycia energii [4]. W tym kontekście przemysłowa produkcja prefabrykatów, takich jak stropy typu filigran, która jest realizowana niezależnie od warunków atmosferycznych i oparta na zastosowaniu maszyn wykonujących powtarzalne operacje z wysoką dokładnością, stwarza znacznie większe możliwości wdrażania innowacyjnych rozwiązań niż tradycyjne budownictwo monolityczne [5]. Produkcja tego typu elementów w zautomatyzowanych i cyfrowych zakładach prefabrykacji oznacza niższy poziom zatrudnienia załogi, mniejsze nagromadzenie osób na jednym metrze kwadratowym powierzchni zakładu, co wpływa

harmonogramowaniu produkcji, automatycznej kontroli jakości z wykorzystaniem systemów wizyjnych, predykcijnym utrzymaniu ruchu oraz integracji danych produkcyjnych z modelami BIM [7, 8].

CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA STROPÓW FILIGRAN

Konstrukcja stropu filigran składa się z cienkiej, prefabrykowanej płyty żelbetowej, pełniącej funkcję trzonego szalunku, oraz warstwy nadbetonu wykonywanej na placu budowy, która po związaniu tworzy z prefabrykatem jednolitą konstrukcję nośną. Prefabrykowana płyta dolna realizowana jest najczęściej z betonu klasy co najmniej C20/25 (dawniej B25)



Fot. 1. Prefabrykowane stropy typu filigran

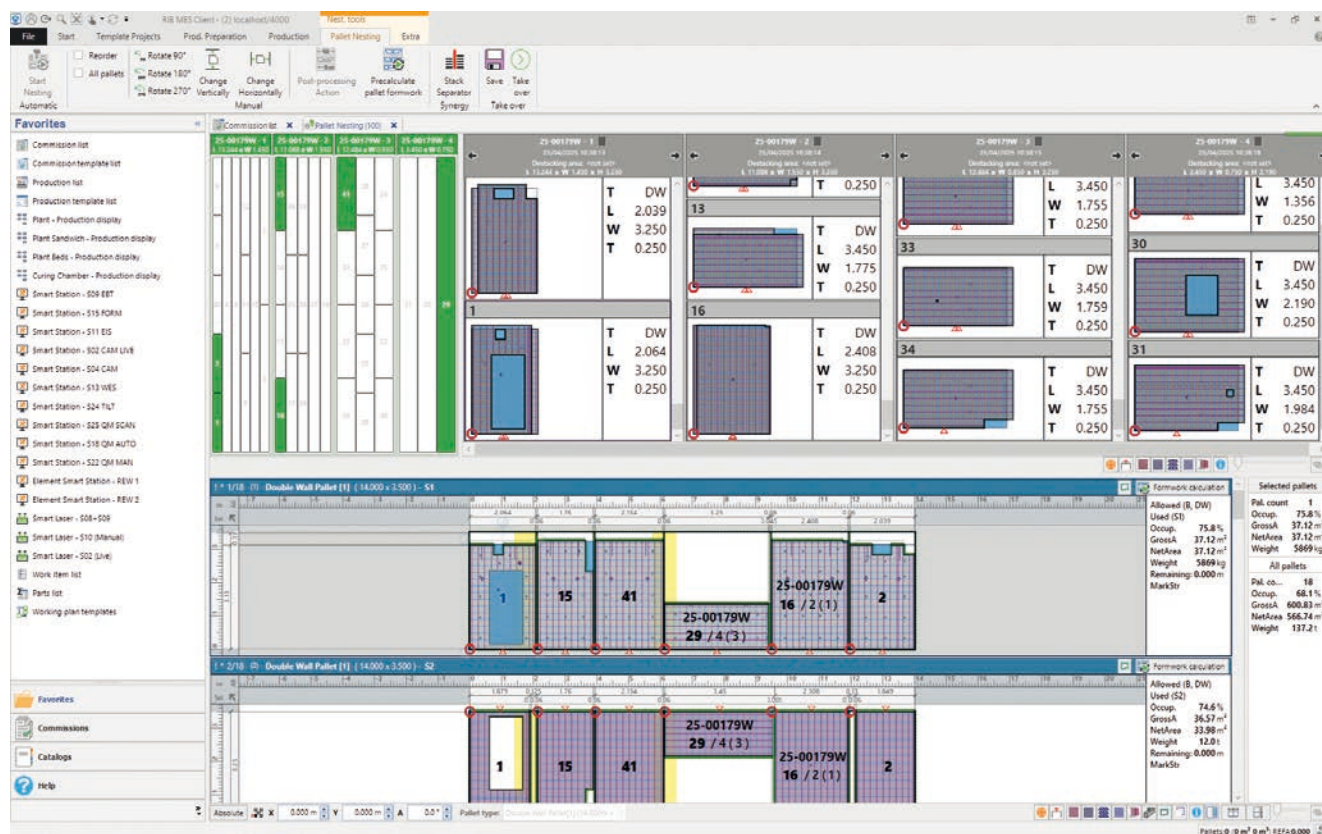
i ma grubość od ok. 4,5 do 7,0 cm. W płycie umieszczane są zbrojenie dolne oraz przestrzenne dźwigary kratownicowe, których zadaniem jest zapewnienie odpowiedniej sztywności prefabrykatu podczas transportu i montażu, a także przenoszenie sił ścinających pomiędzy prefabrykatem a warstwą nadbetonu. Dźwigary rozmieszczane są równolegle do dłuższego boku płyty, zazwyczaj w rozstawie nieprzekraczającym 75 cm [1]. Przykład prefabrykowanych stropów typu filigran pokazano na fot. 1.

Typowe grubości gotowych stropów mieszczą się w zakresie od 12 do 25 cm, choć w przypadku większych rozpiętości lub obciążeń mogą osiągać nawet 30 cm. Zaletami technologii filigran jest duża swoboda kształtowania geometrycznego. Płyty mogą być produkowane w różnych kształtach, m.in. prostokątnych, trapezowych, trójkątnych, łukowych, a także nieregularnych. Już na etapie prefabryka-

cji możliwe jest wykonywanie otworów technologicznych, wycięć pod pionowe instalacyjne, kanały wentylacyjne czy przewody kominowe, co znacznie przyspiesza realizację robót budowlanych [9, 10]. Prefabrykaty charakteryzują się stosunkowo niewielkim ciężarem własnym, wynoszącym przeciętnie od 125 do 145 kg/m² [10]. Rozpiętość stropów typu filigran wynosi najczęściej od 7 do 8 m, przy czym z ekonomicznego punktu widzenia za optymalną uznaje się rozpiętość ok. 7,5 m. Istotną cechą technologiczną jest zespolenie prefabrykatu z nadbetonem. Odpowiednio ukształtowana, szorstka powierzchnia górna płyty oraz obecność kratownic przestrzennych zapewniają skuteczne przenoszenie sił na styku obu warstw. Dodatkowo na budowie wykonuje się zbrojenie styków pomiędzy płytami, co zapobiega zjawisku ugięcia sąsiednich elementów [1].

ROLA MODELU BIM ORAZ ZINTEGROWANE SYSTEMY ERP I MES

Znaczenie modelu BIM w produkcji płyt filigran wynika przede wszystkim z możliwości bezpośredniego powiązania procesu projektowego z wykonawstwem. Współczesne środowiska projektowe pozwalają na eksport danych do specjalistycznych interfejsów wymiany informacji, takich jak: IFC, IFC4PRECAST, UNL, DXF, DWG, PXML czy 3D-PDF [11–13]. Standardy te umożliwiają bezstratne przekazywanie informacji pomiędzy środowiskiem projektowym a systemami sterowania maszynami produkcyjnymi CNC. Dzięki temu dane opracowane na etapie modelowania mogą zostać automatycznie wykorzystane podczas przygotowania stołów produkcyjnych, rozmieszczania zbrojenia, lokalizacji wkładek montażowych oraz sterowania procesem betonowania. W odniesieniu do stropów typu filigran model BIM stanowi zatem



Fot. 2. Cyfrowa optymalizacja przestrzeni produkcyjnej (Pallet Nesting) dla elementów ścian podwójnych. Ta sama technologia CAD/CAM, która rozmieszcza elementy ścian podwójnych, zarządza pozycjonowaniem płyt filigran na stołach wibracyjnych w celu maksymalizacji wydajności fabryki [14]

nie tylko narzędzie projektowe, lecz przede wszystkim informacyjny fundament całego cyklu życia elementu: od fazy koncepcji i projektowania, przez produkcję oraz transport, aż po montaż na budowie. Szczególne znaczenie w nowoczesnych zakładach prefabrykacji ma integracja modelu BIM z systemami klasy ERP (Enterprise Resource Planning) oraz MES (Manufacturing Execution System). Cyfrowa organizacja produkcji wymaga bowiem ścisłego powiązania warstwy planistyczno-zarządczej z poziomem wykonawczym, odpowiedzialnym za bezpośrednią realizację procesów technologicznych. W takim układzie system ERP pełni rolę nadrzędnego środowiska zarządzania zasobami przedsiębiorstwa, odpowiadając za obsługę zamówień, planowanie dostaw materiałów, kontrolę stanów magazynowych oraz koordynację harmonogramów produkcyjnych. Przykład zastosowania systemu MES w zakresie planowania, sterowania i optymalizacji automatycznej lub półautomatycznej produkcji elementów betonowych na tzw. liniach obiegowych (paletowych) przedstawiono na fot. 2.

Choć na kadrze uwieczniono proces planowania dla ścian podwójnych, to dokładnie te same oprogramowanie i te same magnetyczne roboty szalunkowe odpowiadają za formowanie stropów filigran. Elastyczność ta pozwala producentom na płynne przestawianie linii z produkcji stropów na ściany i reagowanie na bieżące potrzeby budowy w systemie just-in-time. Istotnym aspektem wdrożenia zintegrowanych systemów ERP i MES jest również zwiększenie transparentności ekonomicznej procesu produkcyjnego. Systemy te umożliwiają szczegółowe raportowanie kosztów przypisanych do każdego prefabrykatu, obejmujących m.in. zużycie betonu i stali zbrojeniowej. Dzięki temu możliwe staje się prowadzenie precyzyjnych analiz efektywności produkcji oraz identyfikacja obszarów wymagających optymalizacji. W przypadku stropów typu filigran, gdzie nawet niewielkie odchylenia w organiza-



Fot. 3. a) Paleta z magnesami szalunkowymi, b) system napędu palet

cji produkcji mogą generować znaczące koszty w masowej produkcji, tego rodzaju narzędzia analityczne odgrywają szczególnie istotną rolę.

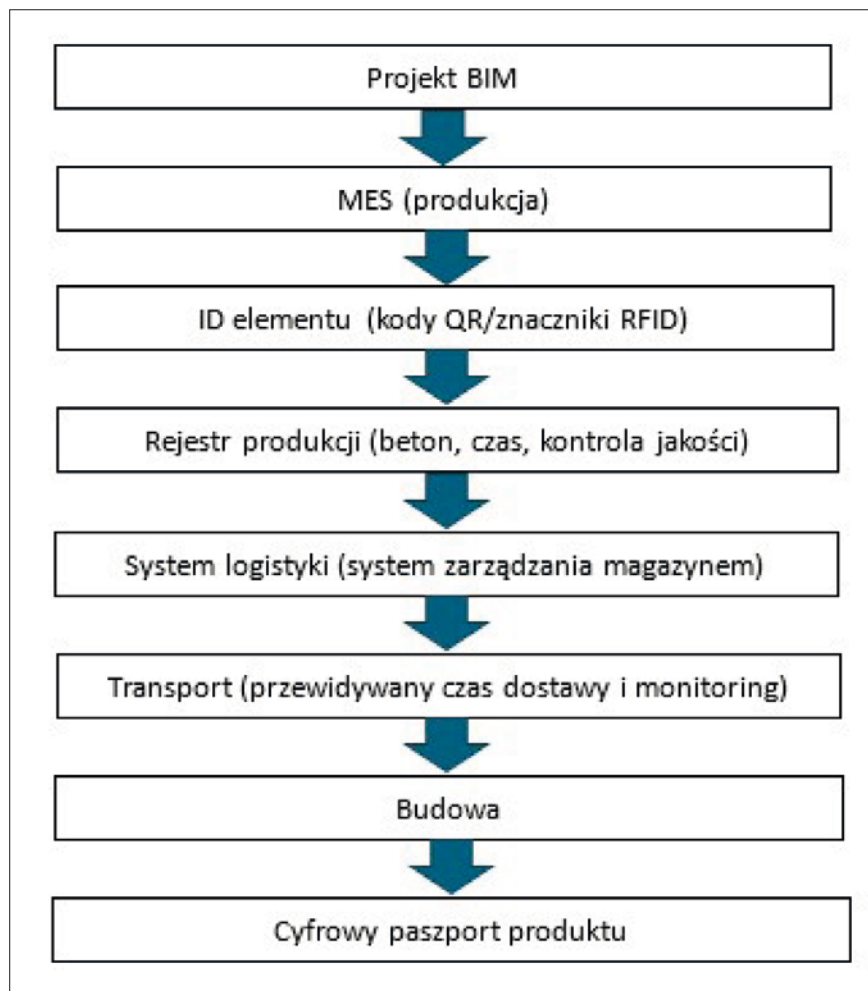
AUTOMATYZACJA POTOKOWEJ LINII PRODUKCYJNEJ

Współczesna produkcja prefabrykowanych elementów betonowych, w szczególności płyt filigran, realizowana jest w coraz większym stopniu w oparciu

o zautomatyzowane systemy linii obiegowych (karuzelowych). W tego typu instalacjach stalowe palety technologiczne przemieszczają się pomiędzy kolejnymi stanowiskami roboczymi zgodnie z harmonogramem generowanym przez systemy klasy MES, co umożliwia synchronizację operacji i utrzymanie stabilnego rytmu produkcyjnego. Proces rozpoczyna się od przygotowania palety, obejmującego czyszczenie oraz

Tab. 1. Struktura i orientacyjne czasy trwania operacji roboczych linii obiegowej dla płyt typu filigran wraz z dojrzewaniem betonu

Etap	Operacja	Poziom automatyzacji	Orientacyjny czas trwania	Charakterystyka
1	czyszczenie i smarowanie palety	wysoki	2–5 min	przygotowanie powierzchni
2	trasowanie BIM	pełny	1–3 min	odzworowanie geometrii
3	montaż elementów form	średni–wysoki	5–15 min	formowanie elementu
4	montaż zbrojenia	średni	10–25 min	operacja częściowo manualna
5	montaż wkładek formujących (inserty)	średni	3–8 min	osadzone elementy (wkładki)
6	wprowadzanie mieszanki betonowej	pełny	3–8 min	aplikacja mieszanki
7	zagęszczanie	pełny	2–5 min	eliminacja pustek powietrznych
8	dojrzewanie betonu	pełny	6–12 h	przyrost wytrzymałości betonu
9	rozformowanie	średni	5–10 min	wyjęcie elementu



Rys. 1. Cyfrowy przepływ danych w systemie identyfikowalności prefabrykacji betonowej dla płyt typu filigran

rozprowadzenie środka smarującego. Następnie wykonywane jest trasowanie geometrii elementu na podstawie danych BIM, najczęściej przy użyciu systemów laserowych lub ploterów przemysłowych. Kolejnym etapem jest montaż elementów formujących, którego stopień automatyzacji zależy od konfiguracji zakładu: od systemów manualnych wspieranych magnetycznie po rozwiązania półautomatyczne i robotyczne. Na fot. 3a i 3b pokazano palety formujące przeznaczone do wykonywania m.in. płyt typu filigran w systemach linii obiegowych wraz z magnesami szalunkowymi służącymi do stabilizacji elementów form oraz systemem napędu.

Równoległe z linią obiegową funkcjonuje zbrojarnia, w której realizowane są procesy cięcia, gięcia oraz przygotowania siatek i elementów przestrzennych. Montaż zbrojenia na palecie często pozostaje operacją częściowo manualną, wspieraną cyfrowymi instrukcjami montażu. Wprowadzanie mieszanki betonowej odbywa się z wykorzystaniem rozdzielaczy mieszanki (dystrybutorów), które zapewniają równomierne rozprowadzenie betonu. Następnie realizowane jest zagęszczanie mieszanki poprzez wibracje o kontrolowanych parametrach. Ostatnim etapem procesu jest przekazanie elementu do strefy dojrzewania. Czasy trwania poszczególnych operacji roboczych są zróżnicowane i uzależnione m.in. od stopnia automatyzacji linii produkcyjnej, producenta oraz zastosowanego wyposażenia. Orientacyjne czasy trwania operacji przedstawiono w tab. 1.

Cykl produkcyjny jest determinowany przede wszystkim przez etap dojrzewania betonu, który trwa najdłużej. Pozostałe operacje mają charakter krótkocyklowy i są optymalizowane pod kątem minimalizacji przestojów oraz równoważenia obciążenia stanowisk roboczych.

LOGISTYKA, IDENTYFIKOWALNOŚĆ I KONTROLA JAKOŚCI

Nowoczesne systemy prefabrykacji betonowej wykorzystują mechanizmy

identyfikowalności (ang. traceability), które umożliwiają pełne śledzenie historii elementu w całym cyklu życia produktu. Każdy prefabrykat może być oznaczony kodem QR lub znacznikiem RFID, powiązany z cyfrowym rekordem produkcyjnym. System ten obejmuje na ogół dane dotyczące: receptury betonu, czasu produkcji, warunków dojrzewania, wyników kontroli jakości, lokalizacji składowania. Cyfrowy przepływ

procesu produkcyjnego. Integracja modeli BIM z systemami ERP i MES pozwala na automatyzację przepływu informacji pomiędzy działem projektowym, produkcją, logistyką oraz kontrolą jakości. W efekcie możliwe są zwiększenie precyzji wykonania, ograniczenie liczby błędów oraz optymalizacja kosztów produkcyjnych. Współczesny rozwój prefabrykacji betonowej wpisuje się w założenia Przemysłu 4.0, opierające się

gania związane ze skróceniem czasu realizacji inwestycji, zwiększenia efektywności ekonomicznej oraz ograniczenia wpływu na środowisko. Można stwierdzić, że dalsza integracja narzędzi cyfrowych będzie wyznaczać standardy rozwoju współczesnej prefabrykacji betonowej. ■

Przyszłość technologii stropów typu filigran będzie związana z dalszym rozwojem cyfryzacji, automatyzacji i integracji procesów projektowo-produkcyjnych.

danych w systemie identyfikowalności prefabrykacji betonowej dla płyt typu filigran przedstawiono na rys. 1.

Integracja systemów MES, ERP oraz BIM pozwala na tworzenie cyfrowego paszportu prefabrykatu, który łączy dane projektowe z rzeczywistymi parametrami produkcyjnymi.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzona analiza organizacji produkcji stropów typu filigran potwierdza, że rozwiązanie to stanowi jeden z najbardziej perspektywicznych kierunków rozwoju współczesnego budownictwa prefabrykowanego. System stropów filigran łączy zalety konstrukcji monolitycznych, takie jak wysoka nośność, dobra izolacyjność akustyczna oraz możliwość swobodnego kształtowania geometrii, z korzyściami wynikającymi z uprzemysłowienia procesu produkcyjnego. Szczegółowe znaczenie ma możliwość integracji etapu projektowania, produkcji oraz montażu w ramach jednolitego środowiska cyfrowego. Kluczową rolę w tym procesie odgrywa technologia BIM, stanowiąca podstawowe źródło informacji o prefabrykacie. Cyfrowy model odwzorowuje geometrię elementu, rozmieszczenie zbrojenia oraz wszystkie parametry techniczne niezbędne do realizacji

na automatyzacji, cyfryzacji oraz inteligentnym zarządzaniu procesami. Szczególnie istotnym kierunkiem rozwoju są technologie cyfrowych bliźniaków (ang. Digital Twin), umożliwiające tworzenie wirtualnych modeli procesów produkcyjnych oraz obiektów budowlanych. Przewiduje się, że większą niż obecnie rolę w zarządzaniu produkcją odgrywać będzie sztuczna inteligencja (ang. Artificial Intelligence). Algorytmy analityczne mogą wspierać predykcyjne utrzymanie ruchu poprzez analizę parametrów pracy maszyn, takich jak drgania, temperatura czy zużycie energii. Umożliwia to wcześniejsze wykrywanie potencjalnych awarii i ograniczenie ryzyka przestojów produkcyjnych. Kolejnym etapem transformacji sektora będzie wdrażanie założeń Przemysłu 5.0, zakładających ścisłą współpracę człowieka z robotami współpracującymi oraz większe ukierunkowanie na aspekty środowiskowe.

Podsumowując, przyszłość technologii stropów typu filigran będzie związana z dalszym rozwojem cyfryzacji, automatyzacji i integracji procesów projektowo-produkcyjnych. Prefabrykacja oparta na inteligentnym nadzorze procesów staje się fundamentem nowoczesnego budownictwa, odpowiadając na wyma-

Literatura

- [1] Minch M., Trochanowski A., Boroń J., „Wybrane zagadnienia konstrukcyjne prefabrykowanych stropów typu filigran” w: *Przegląd budowlany*, nr 6, 2011, s. 73–77.
- [2] Wu K., Xu J., Zheng M., „Industry 4.0: review and proposal for implementing a smart factory” w: *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2024, <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13839-7>.
- [3] Reichenbach S., Kromoser B., „State of practice of automation in precast concrete production” w: *Journal of Building Engineering*, nr 43, s. 102527, 2021.
- [4] Dean B. i in., „Towards zero-emission efficient and resilient buildings” w: *Global Status Report 2016*, Global Alliance for Buildings and Construction 2016.
- [5] Kosse S. i in., „Industry 4.0 Enabled Modular Precast Concrete Components: A Case Study” w: *Rilem bookseries*, s. 229–240, 2023, https://doi.org/10.1007/978-3-031-33211-1_21.
- [6] Adamczewski G., Woyciechowski P.P., „Prefabrykacja w czasach pandemii – ratunek dla budownictwa?” w: *Materiały Budowlane*, nr 9, 2020, doi: 10.15199/33.2020.09.07.
- [7] Nicał A., „Perspektywy wdrożenia sztucznej inteligencji w produkcji prefabrykatów na potrzeby budownictwa” w: *Przegląd budowlany*, nr 6, 2024, s. 29–34, <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.7607>.
- [8] <https://psd.progress.group/en/news/news/artificial-intelligence> [dostęp: 26.05.2026].
- [9] <https://betard.pl/produkty/platy-stropowe-filigran> [dostęp: 28.05.2026].
- [10] Kisiółek A., *Rynek Systemów Stropowych w Polsce. Analiza wybranych rozwiązań na przestrzeni lat 2015–2016*, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Społeczno-Ekonomicznej w Środzie Wielkopolskiej, 2018, s. 34–37.
- [11] Nicał A., „Automatyzacja i cyfryzacja w produkcji prefabrykatów betonowych” w: *Materiały Budowlane*, nr 2, 2026, s. 72–73.
- [12] Nicał A. i in., „BIM w prefabrykacji”, Warszawa: PWN, 2021.
- [13] Pubanz K. i in., „Przygotowanie dokumentacji wykonawczej dla elementów konstrukcji prefabrykowanych przy wykorzystaniu narzędzi informatycznych działających zgodnie z technologią BIM” w: *Nowoczesne Hale*, nr 3, 2022, s. 22–25.
- [14] Materiały udostępnione przez firmę RIB Software.