

dr inż. Grzegorz Adamczewski<sup>1\*)</sup>  
dr hab. inż. Piotr Woyciechowski, prof. PW<sup>1)</sup>

## Kierunki rozwoju prefabrykacji

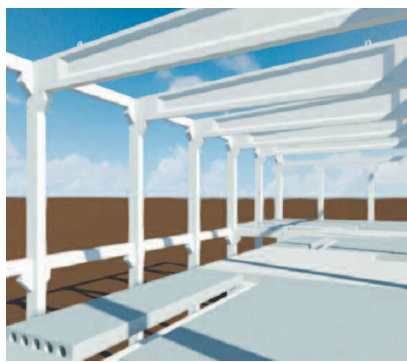
**P**refabrykacja betonowa bardzo dobrze wpisuje się w kierunki wyznaczone przez zrównoważony rozwój dzięki optymalizacji nakładów na materiały i robociznę, zwiększeniu trwałości elementów, a tym samym wydłużeniu czasu bezawaryjnego użytkowania obiektu oraz ograniczeniu uciążliwości procesów budowlanych dla otoczenia. Prefabrykaty z betonu stosowane są w budownictwie użyteczności publicznej, przemysłowym, infrastrukturalnym oraz mieszkaniowym.

Postęp w prefabrykacji betonowej w ostatniej dekadzie związany jest m.in. z rozwojem technik komputerowych, zwiększeniem wiedzy o betonie oraz ogólnym wzrostem świadomości ekonomiczno-ekologicznej. Szczególną rolę w rozwoju prefabrykacji odgrywają nowe technologie oraz wykorzystywane materiały, a także nowe, dotychczas niekojarzone z prefabrykacją, funkcje materiału lub elementów konstrukcji.

### Technologie

**Modelowanie obiektów w technologii BIM** na etapie produkcji prefabrykatów stanowi szansę zwiększenia atrakcyjności oferty producentów i ich konkurencyjności wobec technologii monolitycznej. Wirtualna biblioteka modeli wyrobów oraz możliwość ich indywidualnego przeprojektowywania na potrzeby danej inwestycji prowadzić może do urzeczywistnienia idei prefabrykacji jako budowania z gotowych „klocków”, z pełną kontrolą procesu budowy, która znacznie minimalizuje prawdopodobieństwo popełnienia błędów wykonawczych obejmujących przede wszystkim kolizje branżowe i opóźnienia w realizacji harmonogramu. Warunkiem urzeczywistnienia tej idei jest dostępność cyfrowych modeli elementów ze szczególnym uwzględnieniem akce-

soriów umożliwiających szybki montaż i trwałość połączeń dla wszystkich uczestników procesu budowlanego. Z punktu widzenia producentów prefabrykatów, BIM ma największe zastosowanie w relacjach inwestor – konstruktor oraz architekt – konstruktor. W przypadku konstruktorów, BIM to przede wszystkim integracja programów przeznaczonych do modelowania geometrii, obciążeń i połączeń elementów i nadawania charakterystyk obiektom, z programami obliczeniowymi, do których importuje się dane dotyczące obiektu w formie modelu 3D (fotografia 1) wraz ze wszystkimi informacjami o elementach. Technologia BIM umożliwia tworzenie jednego wspólnego modelu wszystkich branż. Każda z branż tworzy swój plik, w którym wykonuje projekt,



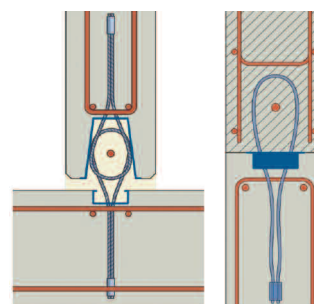
Fot. 1. Model obiektu zaprojektowany z wykorzystaniem BIM

[Fot.: COMFORT S.A.]

a następnie plik synchronizuje z modelem głównym, dzięki czemu naniesione zmiany stają się widoczne dla pozostałych uczestników procesu budowlanego. Możliwe jest również rozwiązanie, w którym wszystkie branże tworzą swoje modele oraz kontrolują i nanoszą w nich zmiany, które wprowadzają inne branże.

**Połączenia między elementami** są niewralgiczne i decydują o efektywności montażu oraz bezpieczeństwie, niezawodności i trwałości konstrukcji. Muszą przenosić siły wynikające z charakteru pracy elementów konstrukcji,

być niezawodne i trwałe oraz proste w realizacji, ekonomiczne i estetyczne (rysunek). W przypadku większości połączeń wykorzystuje się proste złącza skręcane (przy zapewnieniu stosunkowo dużej tolerancji montażowej) lub proste złącza wtykane. Interesującym rozwiązaniem są dyskretne połączenia



Połączenia ścian prefabrykowanych za pomocą łączników wykorzystujących giętkie liny stalowe [1]

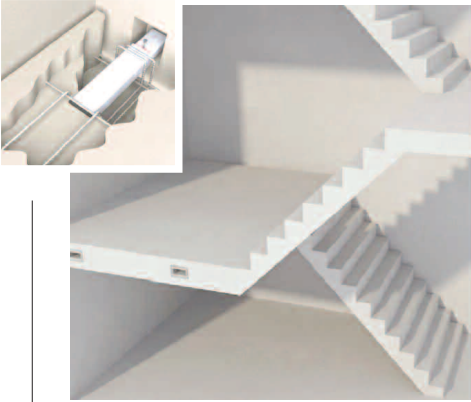
o zwiększonej estetyce. Wykorzystują one prostą zasadę zakotwienia odpowiednich wkładów stalowych w elemencie podpierającym (np. słupie, ścianie, belce) oraz wkładu z tzw. wysuwającym nożem kotwiącym w elemencie podpieranym (belka, podest klatki schodowej), dzięki czemu połączenie „ukryte” jest w elemencie. Połączenia tego typu najczęściej stosowane są w przypadku belek i słupów, a także biegów schodowych (fotografia 2).

Przykładem nowoczesnych rozwiązań połączeń, istotnym z punktu widzenia minimalizacji zapotrzebowania energetycznego obiektów budowlanych, są złącza pomiędzy zewnętrznymi elementami konstrukcyjnymi, np. balkony, galerie, a konstrukcją nośną obiektu. W tym celu wykorzystywane są specjalne łączniki. Siły rozciągające lub ścinające przenoszą w złączy zgrzewane pręty ze stali zbrojeniowej czarnej i nierdzewnej, a izolacyjność zapewniają wkładki termoizolacyjne.

**Technika druku 3D** zdaje się być stworzona na potrzeby współczesnej prefabrykacji, umożliwiając wytwarzanie elementów o skomplikowanym

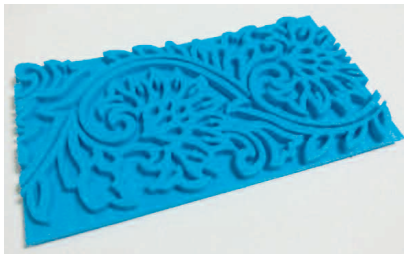
<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska; Wydział Inżynierii Łądowej

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji:  
g.adamczewski@il.pw.edu.pl



Fot. 2. Oparcie spoczników schodowych na podporach z nożem kotwiącym [1]

kształcie, które w tradycyjnych technikach formowania są niemożliwe lub nieopłacalne do wykonania. Ograniczenia technologii druku 3D wynikają z konieczności posiadania specjalistycznych urządzeń do drukowania z betonu oraz dostosowania właściwości mieszanek betonowych, a także z ograniczonych możliwości „zadrukowania” mieszaną betonową przestrzennego szkieletu zbrojenia. Innym przykładem zastosowania technik druku 3D w prefabrykacji jest produkcja form z tworzywa sztucznego. W celu wykonania formy powstaje najpierw model w 3D, który następnie służy do przygotowania formy (najczęściej silikonowej) do wytworzenia zaprojektowanego elementu (fotografia 3).



Fot. 3. Forma z tworzywa sztucznego wykonana metodą druku 3D [8]

## Materiały

Prefabrykacja stanowi dobry „poligon testowy” w przypadku rozwiązań nietypowych i może pełnić czołową rolę w rozwoju innowacyjnej myśli technicznej. Przykładem zastosowania niestandardowych rozwiązań materiałowych w prefabrykacji są **kompozyty geopolimerowe** [3], charakteryzujące się dobrymi właściwościami mechanicznymi oraz zdolnością do szczelnego wypełniania form. Beton geopolimerowy

jest wykorzystywany zarówno do wykonywania niewielkich, często dekoracyjnych, elementów, jak i konstrukcyjnych fragmentów obiektów budowlanych. Ma on dużą wytrzymałość na ściskanie, zginanie, rozciąganie i jest trwalszy od tradycyjnego betonu z cementu portlandzkiego. Geopolimery charakteryzują się szybkim przyrostem wytrzymałości, dużą odpornością ogniową oraz na działanie wysokiej temperatury, odpornością na korozję chemiczną oraz na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie [5].

**Betony zawierające materiały odpadowe** są powszechnie stosowane w celu obniżenia śladu węglowego betonu przez zmniejszenie ilości klinkieru stosowanego w cemencie i zastąpienie go materiałami mineralnymi o znacznie mniejszym wskaźniku emisji CO<sub>2</sub>. Wiele takich materiałów jest stosowanych jako zamienniki klinkieru i cementu, zgodnie z PN-EN 197-1 i PN-EN 206.

W Polsce powszechnie stosowanym zamiennikiem jest popiół lotny. Ze względu na odpadowe pochodzenie emisja CO<sub>2</sub> wynikająca z jego użytkowania jest niemal zerowa. Zamiennik musi mieć takie cechy, aby uzyskany cement miał odpowiednie właściwości, a zawierający go beton charakteryzował się odpowiednią trwałością. Wykorzystywanych jest także wiele innych mineralnych produktów ubocznych (żużel wielkopiecowy, mikrokrzemionka i inne sztuczne pucolany). Tego rodzaju modyfikacje nie są jednak rozwiązaniem idealnym w prefabrykacji, ponieważ w pewnym zakresie ograniczają wydajność produkcji z uwagi na inną charakterystykę rozwoju wytrzymałości substytutów spoiwa. Ograniczenia dotyczące wykorzystywania materiałów odpadowych są podyktowane również wymaganiami stawianymi przez klasy ekspozycji betonu, a użyteczność materiału każdorazowo powinna być weryfikowana w kontekście jego trwałości.

Zwiększające się znaczenie zrównoważonego rozwoju w budownictwie sprawia, że stosowanie odpadów w prefabrykacji jest nieuniknione w najbliższych latach. W tym kontekście znaczenia nabierają nowe metody aktywacji dodatków mineralnych w betonie, które pozwolą zwiększyć ich atrakcyjność dla

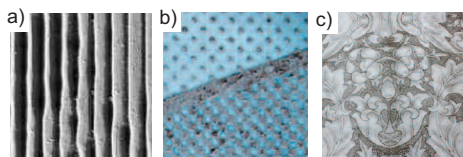
prefabrykacji z uwagi na szybki rozwój wytrzymałości. Do takich metod można zaliczyć aktywację chemiczną lub mechaniczną żużla oraz wprowadzenie zaawansowanych chemicznie nanomateriałów, np. grafenu. Przyszłościowym kierunkiem jest także zastępowanie naturalnego kruszywa grubego materiałami alternatywnymi, w tym np. gruzem betonowym z własnych odpadów produkcyjnych producenta prefabrykatów.

**Betony ze zbrojeniem niemetalicznym.** Oprócz stosowanych obecnie w prefabrykacji włókien szklanych (GFRC, ang. *Glass Fiber Reinforced Concrete*) można zaobserwować tendencję wykorzystania innych rodzajów włókien niemetalicznych. Szczególne zainteresowanie budzą włókna bazaltowe (BFRC) oraz węglowe (CFRC), stosowane jako zbrojenie rozproszone lub główne w elementach prefabrykowanych. Zbrojenie rozproszone pozwala na znaczne zwiększenie wytrzymałości betonu na zginanie i rozciąganie, co jest istotne w przypadku wyrobów „szytych na miarę” (*Tailor Made Products*), np. lekkie (redukcja grubości przy jednoczesnym zwiększeniu pozostałych wymiarów) i trwałe płyty elewacyjne o dużych walorach architektonicznych. Niemetaliczne zbrojenie może być z powodzeniem stosowane w postaci siatek przeciwskurczowych jako zbrojenie główne. W elementach warstwowych (np. prefabrykowane elementy ścienne) zastosowanie znajdują niemetaliczne łączniki, które w porównaniu z łącznikami konwencjonalnymi mają większą wytrzymałość i sztywność, a także korzystnie zmniejszony współczynnik przewodności cieplnej w stosunku do stali.

**Betony architektoniczne.** Od współczesnej prefabrykacji coraz częściej oczekuje się spełniania funkcji estetycznych. Fabryczne warunki produkcji wyrobu sprzyjają stosowaniu rozwiązań materiałowych i technologicznych trudnych lub nieopłacalnych w technologii monolitycznej. Oprócz kształtowania powierzchni betonu za pomocą indywidualnie projektowanych form oraz matryc, a także ekspozycji kruszywa i stosowania domieszek barwiących, architekci coraz częściej poszukujący nowych możliwości atrakcyjnego wykończenia powierzchni, chętnie wy-

korzystują różne odmiany **fotobetonu** lub **beton transparentny**.

Technologia fotobetonu znana jest od połowy lat osiemdziesiątych XX w. i nadal obserwuje się jej intensywny rozwój, m.in. związany z możliwościami nowoczesnych betonów, w tym geopolimerowych, postępowaniem technologii wykonywania skomplikowanych form, a także dostępnością zaawansowanej chemii do mieszanek betonowych. Wzory widoczne na powierzchni fotobetonu mogą być uzyskiwane za pomocą układu żłobień (fotografia 4a) lub techniką podobną do sitodruku (fotografia 4b). Najnowszym trendem jest wykonywanie trwałych, odpornych na działanie czynników zewnętrznych, nadruków (fotografia 4c). Beton transparentny (fotografia 5) opatentowany został stosunkowo niedawno. Uzyskuje się go przez wprowadzenie do matrycy betonowej ciągłych włókien (światłowody) lub innych przezroczystych elementów (np. szklanych precyków) w układzie uporządkowanym lub losowo zmiennym – zależnie od koncepcji architekta. Popularność tych rozwiązań rośnie pomimo relatywnie dużych kosztów.



Fot. 4. Powierzchnia fotobetonu wykonanego w technice: a) żłobień [6]; b) sitodruku [7]; c) nadruku na powierzchni betonu [8]



Fot. 5. Prefabrykowane elementy z betonu transparentnego wykonane z wykorzystaniem światłowodów w celu uzyskania efektu częściowej przezroczystości [8]

## Funkcje

W podejściu tradycyjnym kształtowanie właściwości materiału ma na celu m.in. zapobieganie powstawaniu uszkodzeń („Damage Prevention”). Natomiast koncepcja samonaprawy zakłada, że uszkodzenia są naturalną i dopuszczalną cechą materiału, dopóki jest im przeciwstawiony proces samoistnej regeneracji struktury („Damage Management”) [2]. **Realizacja idei samonaprawialności** może polegać na umieszczeniu materiału naprawczego wewnątrz kompozytu już na etapie wytwarzania, czyli zanim doszło do uszkodzenia. Dzięki temu środek naprawczy jest dostępny w miejscu i czasie, kiedy staje się niezbędne odtworzenie struktury kompozytu. Pozwala to wyeliminować podstawowy problem, jaki należy rozwiązać podczas naprawy elementu betonowego [4].

Właściwości „samoobsługowe” wykazuje również **beton zawierający tlenek tytanu**, który katalizuje procesy rozpadu zanieczyszczeń z atmosfery i umożliwia samooczyszczenie powierzchni, co pozwala dłużej zachować jej walory architektoniczne.

Jednym z aktualnych kierunków rozwoju prefabrykacji jest **optymalizacja efektywności energetycznej obiektu przez modyfikację tradycyjnych wyrobów**. Zjawiskiem wykorzystywanym w tym celu jest **akumulacja ciepła** (BITES – *Building-Integrated Thermal Energy Storage*) w masie elementów betonowych, które jest transportowane wskutek cyrkulacji powietrza w obiegu sterowanym przez czujniki obiektu. Takie rozwiązanie sprzyja oszczędności energii wymaganej do zapewnienia komfortu cieplnego użytkownikom, a także pozwala zaoszczędzić miejsce na instalacje, które znajdują się niejako wewnątrz konstrukcji nośnej. Użytkowana w ten sposób oszczędność miejsca może być spożytkowana na wykonanie wyższych kondygnacji lub w przypadku ograniczeń wynikających z warunków zabudowy – zwiększyć liczbę

kondygnacji z zachowaniem dopuszczalnej wysokości budynku.

Innowacyjne rozwiązania mogą dotyczyć też wykorzystywania materiałów stosowanych do izolacji termicznej obiektu, np. aerożeli (rodzaj „sztywnej piany”) o wyjątkowo małej gęstości, które w przyszłości mogą znaleźć powszechne zastosowanie w ściennych elementach warstwowych. Obecnie w celu zapewnienia bardzo dobrej izolacyjności termicznej przegrody podejmowane są próby wykorzystania próżni w takich elementach.

## Podsumowanie

Można się spodziewać rozwoju technologii mieszanek betonowych przeznaczonych do drukowania 3D, wykorzystania najnowszych osiągnięć chemii budowlanej, czy też szerszego zastosowania niekonwencjonalnych rodzajów zbrojenia. Przewiduje się również rozwój technologii wpisujących się w kierunki wyznaczone przez wymagania systemów certyfikacji środowiskowej budynku (BREEAM i LEED), do których należą technologie wykorzystujące recykling, reusing i zastosowanie odpadów przemysłowych.

## Literatura

- [1] Adamczewski Grzegorz, Piotr Woyciechowski. 2014. *Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność*. Stowarzyszenie Producentów Betonów.
- [2] Blaiszik Benjamin J., S. L. B. Kramer, S. C. Olugebefola, J. S. Moore, N. R. Sottos, S. R. White. 2010. „Self-Healing Polymers and Composites”. *Ann. Rev. of Mat. Res.*, s. 179 – 211.
- [3] Davidovits Joseph. 2011. *Geopolymer Chemistry & Applications*. 3rd edition, Institut Géopolymère, Saint-Quentin. France.
- [4] Hansen C. J., W. Wu, K. S. Toohey, et al. 2009. „Self-Healing Materials with Interpenetrating Microvascular Networks”. *Advanced Materials, Weinham* 21, s. 1 – 5.
- [5] Provis J. L., Y. Muntingh, R. R. Lloyd, H. Xu, L.M. Keyte, L. Lorenzen, P. V. Krivenko, J. S. J. van Deventer. 2009. *Will geopolymers stand the test of time?* Wiley Online Library.
- [6] [www.klinikabetonu.pl](http://www.klinikabetonu.pl).
- [7] [www.beton.org](http://www.beton.org).
- [8] [www.beton-campus.de](http://www.beton-campus.de).

Partner działu:

**Stowarzyszenie Producentów Betonów**

