

EKSPERYMENTALNE I SYMULACYJNE BADANIA INNOWACYJNEGO ROZWIĄZANIA DO KSZTAŁTOWANIA DWUKRZYWIZNOWYCH FORM W ARCHITEKTURZE

Przemysław NOWAK

Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej
ul. Bolesława Prusa 53/55
50-317 Wrocław

E-mail: p.nowak@pwr.edu.pl, URL: <https://orcid.org/0000-0002-8848-100X>

Słowa kluczowe: *architektura, wynalazek, fasady, beton, cement, GRC, osnowa*

ABSTRAKT

1. Wstęp

Niniejszy referat poświęcony jest eksperymentalnym i symulacyjnym badaniom wynalazku służącego do kształtowania dwukrzywiznowych form w architekturze - samotężącej osnowy cementowej. W ramach prezentowanych prac przeprowadzono szereg eksperymentów mających na celu zbadanie skuteczności osnowy przy formowaniu dwukrzywiznowych form przestrzennych w architekturze. Podjęto próby określenia potencjału wynalazku do spełnienia zaproponowanej funkcji oraz sformułowania wstępnych wytycznych, które należy uwzględnić przy jej zastosowaniu. W toku prac badawczych przeprowadzono m.in. badania zniszczeniowe prototypów. Pozyskane wyniki posłużyły za podstawę do stworzenia narzędzia cyfrowego, ukierunkowanego na symulowanie struktur wykonanych z osnowy, opartego na modelowaniu parametrycznym i algorytmicznym. Narzędzie wzbogacono również o zaawansowane algorytmy optymalizacyjne. Potwierdzono działanie narzędzia w zakresie symulacyjnego kształtowania nowych form architektonicznych, na przykładzie fragmentu fasady. Jego zastosowanie dostarczyło danych oraz modeli, które mogą zostać wykorzystane w przyszłości do bardziej zaawansowanych analiz (np. metodą Elementów Skończonych). Samotężąca osnowa cementowa zgłoszona została do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej i uzyskała ochronę patentową w październiku 2023 roku.

Jednym z głównych składników prezentowanej osnowy jest cement. Stosowane tego materiału w budownictwie wskazywane jest przez liczne pozycje literaturowe [1][2][3] jako jedno z największych źródeł zanieczyszczeń i emisji CO₂. Wobec narastających problemów związanych z antropogeniczną degradacją środowiska poszukiwanie nowych technologii opartych na wykorzystaniu cementu zyskuje na szczególnym znaczeniu. W artykule „Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production” [4] odnaleźć można bezpośrednie stwierdzenie, iż kluczową metodą walki z emisjami CO₂ do atmosfery, wytwarzanymi przez przemysł cementowy jest opracowywanie nowych technologii i innowacyjnych rozwiązań. Zmniejszenie zużycia, idące za tym ograniczenie tonażu transportu, czy przyśpieszenie procesu budowlanego to tylko nieliczne przykłady zabiegów mogących znacznie zredukować szkodliwy wpływ przemysłu cementowego na środowisko. Podejście to wpisuje się w założenia celu 12 (Odpowiedzialna konsumpcja i produkcja) z 17 celów Zrównoważonego Rozwoju określonych przez ONZ [5].

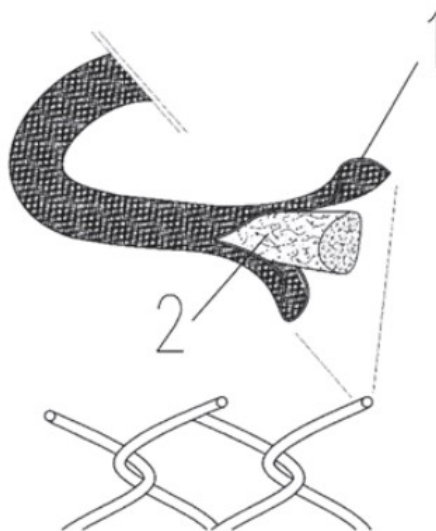
1.1. Badania literaturowe

Przed przystąpieniem do prac eksperymentalnych przeprowadzone zostały szeroko zakrojone studia literaturowe metodą przeglądu literatury. Miały one na celu zrozumienie otoczenia badawczego, oraz zidentyfikowanie luk i problemów badawczych, których podjęcie przyniosłoby wymierne korzyści. Autor przeanalizował dostępne na rynku technologie oraz materiały budowlane, wykorzystywane w praktyce architektonicznej. Dokonany został przegląd literatury naukowej, w tym artykułów przeglądowych dotyczących technologii opartych na włóknach, stosowanych w budownictwie i architekturze. Podczas badań literaturowych korzystano zarówno z naukowych baz danych on-line, takich jak Web of Science, Science Direct, czy IEEE, jak i z klasycznych źródeł literatury technicznej – zbiorów bibliotecznych, archiwów i danych udostępnianych przez producentów. W przeglądzie uwzględniono ponad 390 pozycji, które były posortowane zgodnie ze słowami kluczowymi występującymi w streszczeniach. W celu uzupełnienia zebranej wiedzy i umieszczenia jej w szerszym kontekście, autor posłużył się również raportami branżowymi oraz opiniami ekspertów.

2. Opatentowane rozwiązanie

Wynalazek opracowany w toku prac badawczych otrzymał nazwę „samotężąca osnowa cementowa”. Osnowa tworzona jest z tkaniny lub maty prasowanej z włókna szklanego bądź węglowego. Ma formę przestrzennego rękawa, który wypełniony jest sypką, suchą mieszanką cementu i włókien szklanych oraz polimerowych (rys. 1). Jest ona

formowana na sucho, w postaci wiotkiej. Można ją dowolnie kształtować, zarówno w orientacji poziomej (jako np. sklepienie) jak i pionowej (np. jako fasada lub wzmocnienie skarpy). Po właściwym uformowaniu osnowa zwilżana jest wodą, co skutkuje jej stężeniem i przyjęciem zadanego kształtu. Zewnętrzna warstwa osnowy funkcjonuje więc na dwa sposoby: w stanie sypkim stanowi wiotki szalunek, w stanie stężonym zaś przejmuje funkcję zbrojenia. Osnowa może funkcjonować jako samodzielne tworzywo budowlane, bądź stać się częścią złożonej struktury, jak np. „utkanej” z niej siatki. Możliwość tkania skomplikowanych wzorów to jedna z jej najbardziej znamiennych cech tego wynalazku.



Rysunek 1 - Tkana osnowa (rysunek ze zgłoszenia patentowego) 1 – rękaw osłaniający 2 - wypełnienie

3. Metoda

Ponieważ autor wynalazku związany jest z dyscypliną „architektura” podjęta została decyzja o zawężeniu badań nad rozwiązaniem osnowy do zastosowań ściśle związanych z zastosowaniami architektonicznymi. W celu pozyskania danych niezbędnych do prowadzenia badań nad kształtowaniem innowacyjnych form architektonicznych konieczne było sięgnięcie do metod badawczych wykorzystywanych szerzej w budownictwie i materiałoznawstwie. Głównym celem prac autora było jednak przeprowadzenie badań architektonicznych.

Prezentowane badania eksperymentalne podzielone zostały na trzy części, określone jako *mikro*, *mezo* i *makro*. Podział ten wynikał zarówno ze skali próbek poddawanych badaniu na poszczególnych etapach, jak i przeznaczenia wyników pozyskiwanych w czasie poszczególnych etapów. Skala *mikro* zakładała prowadzenie badań na próbkach materiałów wchodzących w skład rozwiązania w celu opracowania prototypu o jak najlepszych parametrach. Skala *mezo* dotyczyła badań

fragmentu gotowego prototypu wykonanego na podstawie wcześniej uzyskanych wytycznych. Skala *makro* zaś odnosiła się do badań modelu pełnoskalowej struktury wykonanej z osnowy. Ostatni etap przeprowadzony został przy użyciu metody symulacyjnej.

3.1. Metoda eksperymentalna w skali *mikro*

W zakres badań określonych jako „skala mikro” wchodziło przebadanie propozycji mieszanek dla zapraw cementowych, wzbogacanych włóknem szklanym. Celem tych badań było dobranie jak najlepszego składu wypełnienia osnowy pod kątem parametrów wytrzymałościowych. Przeprowadzenie tego etapu badań było niezbędne do rozpoczęcia następnych prac w innych skalach.

Zdecydowano o zastosowaniu metod badawczych charakterystycznych dla zapraw, opisanych przez normę PN-EN 1015-11:2020-04 [7]. Ponadto podjęta została decyzja o wykonaniu próbek różniących się zawartością włókna szklanego i przeprowadzeniu prób zniszczeniowych w celu określenia wytrzymałości na rozciąganie w próbie zginania trójpunktowego, oraz wytrzymałości na ściskanie za pomocą prasy. Jako rozmiar próbek przyjęto 40×40×160 mm. Do przeprowadzenia testów wybrana została hydrauliczna maszyna wytrzymałościowa ZD 100 o zakresie 0 ÷ 1000 kN, przeznaczona do przeprowadzania prób statycznych dla sił rozciągających i ściskających. Przebadane zostało 12 próbek, których składy dobrano na podstawie przeprowadzonej wcześniej kwerendy źródłowej.

3.2. Metoda eksperymentalna w skali *mezo*

Pomyślne zakończenie etapu badawczego „*mikro*” potwierdziło zasadność dotychczasowych prac i pozwoliło na kontynuację badań. Zgodnie z przyjętą metodologią w zakres badań określonych jako „skala *mezo*” wchodziło prototypowanie oraz przebadanie małoskalowych (0,3 m – 7,0 m) fragmentów osnowy, dobór tkaniny okrywającej wypełnienie, sprawdzenie przebiegu procesu tężenia, oraz określenie parametrów wytrzymałościowych gotowych prototypów osnowy o różnych przekrojach i recepturach. Prace opisane w niniejszym rozdziale ukierunkowane były głównie na empiryczne poznanie właściwości osnowy oraz na pozyskanie parametrów wytrzymałościowych w zakresie niezbędnym dla kolejnego etapu badań – prac symulacyjnych.

Wykonana została seria prototypów wstępnych, różniących się między sobą rodzajem użytej tkaniny, rozmiarem i metodą produkcji. Dokonana została analiza ich kształtowania, potwierdzono podstawowe założenia i zidentyfikowano problemy konieczne do rozwiązania. Przeprowadzono również badanie tężenia, sprawdzając różne metody aplikowania wody w celu utwardzenia osnowy.

Podjęta została także decyzja o przeprowadzeniu próby rozciągania jednoosiowego za pomocą zrywarki laboratoryjnej w celu dokonania pomiaru wytrzymałości na rozciąganie oraz określenia modułu sprężystości prototypu. Zidentyfikowano również konieczność przystosowania próbek do badania, ze szczególnym naciskiem na mocowanie próbek w maszynie.

3.3. Metoda symulacyjna – skala *makro*

Założeniem etapu badań „makro” było sprawdzenie możliwości kształtowania osnowy w złożoną strukturę o skali obiektu architektonicznego. Zgodnie z założoną wcześniej metodologią przyjęto metodę symulacyjną z wykorzystaniem narzędzi parametrycznych. W tym celu stworzone zostało narzędzie generacyjno-obliczeniowe, pozwalające na wytworzenie modelu komputerowego osnowy, ukształtowanie go w złożoną strukturę i przeprowadzenie jego symulacji. Pozyskane w poprzednich etapach badań laboratoryjnych (eksperymentalnych) parametry wytrzymałościowe osnowy posłużyły jako wartości graniczne dla generowanej struktury. Ze względu na zidentyfikowany wcześniej szeroki wachlarz potencjalnych zastosowań osnowy będącej przedmiotem niniejszej dysertacji konieczne było zawężenie obszaru prac do jednego pola badawczego. Zidentyfikowana została luka badawcza w obszarze parametrycznego kształtowania fasad budynków. W przypadku badań będących przedmiotem niniejszego referatu, podjęto decyzję o zasymulowaniu pełnowymiarowej złożonej struktury fasady w skali średniowysokiego obiektu architektonicznego.

Narzędzie badawcze stworzone na potrzeby prezentowanych badań ukierunkowane jest na analizie pionowych powierzchniowych elementów architektonicznych. Ogólny schemat narzędzia obejmuje etapy generacji powierzchni, przekształcenia, dodawania punktów zaczepienia/wsparcia, tworzenia węzłów, symulacji fizyki i analizy wyników. W ramach symulacji uwzględnia się obciążenia związane z ciężarem własnym i parciem wiatru. Możliwa jest modyfikacja układu obciążeń oraz formowanie grawitacyjnie (formowanie odwrócone) za pomocą narzędzia wykorzystującego krzywą łańcuchową.

W celu uzyskania modelu statycznego, narzędzie generuje trójwymiarową strukturę, nadając jej wybrany przez użytkownika przekrój i materiał. Możliwe jest również określenie danych wejściowych i wyjściowych dla analizy MES.

4. Wyniki

4.1. Faza mikro

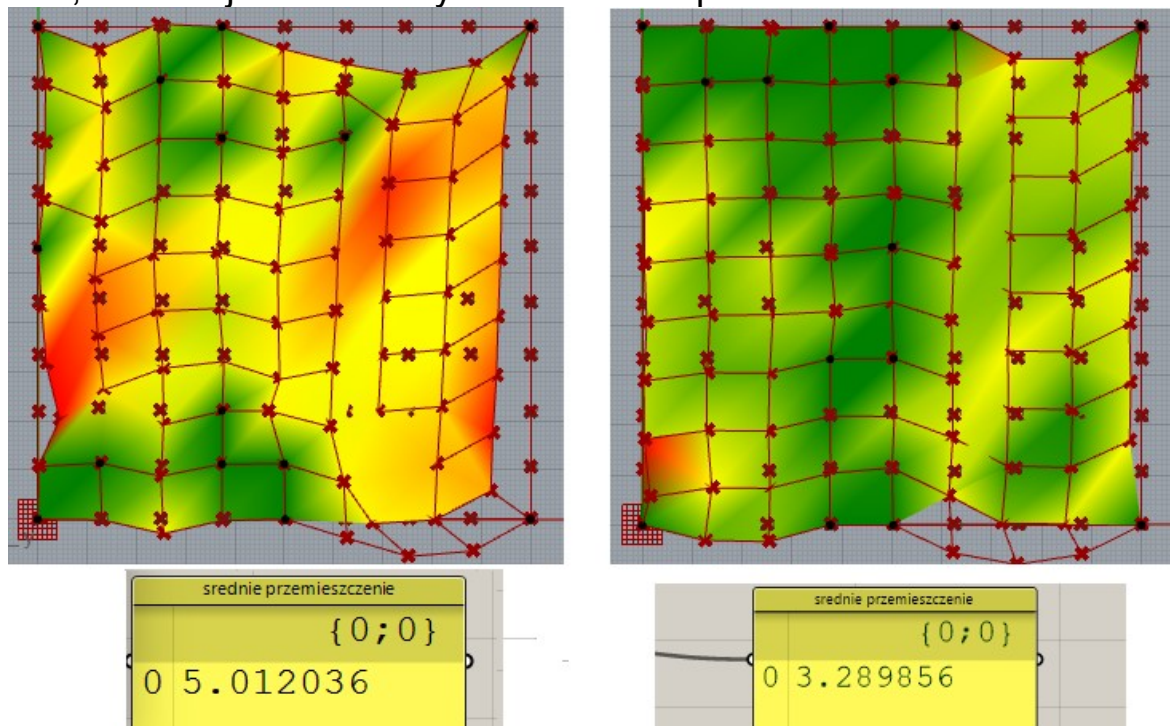
W procesie badawczym wyłoniona została mieszanka cementu portlandzkiego CEM I 32,5, piasku kwarcowego o przeznaczeniu budowlanym o grubości ziarna poniżej 2 mm, oraz włókna szklanego AR, ciętego do długości 12 mm. Próbkki wykonane z tej mieszanki wykazały się najwyższymi spośród badanych prób parametrami wytrzymałościowymi, osiągając wartości charakterystyczne dla opisywanych w literaturze [6] wyrobów cementowych zbrojonych włóknem szklanym o podwyższonej wydajności. Samo wypełnienie rękawa wykonane z wybranej mieszanki cechowało się średnią wytrzymałością na rozciąganie na poziomie 8,64 MPa (bez współpracy z warstwą z włókna szklanego/węglowego). Niezbrojony cement o podobnej do badanej próbki wytrzymałości na ściskanie (C25/30) według normy PN-EN 1992-1-1 powinien posiadać charakterystyczną wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 1,8Mpa [8] – niemal pięciokrotnie mniej niż średnia wytrzymałość omawianej mieszanki.

4.2. Faza mezo

W czasie przygotowywania prototypów wynalazku udowodniona została wykonalność zaproponowanego rozwiązania osnowy – rękaw z włókna szklanego skutecznie utrzymał mieszankę wypełniającą. Nie zostały zaobserwowane czynniki wykluczające zasadność kontynuacji prac badawczych bądź obalające fundamentalne założenia rozwiązania. Co więcej – potwierdzona została również prostota wytworzenia osnowy – możliwe było pozyskanie jej małoskalowych odcinków bez wykorzystania specjalistycznego sprzętu ani aparatury. W trakcie badań w skali *mezo* potwierdzone zostało również działanie osnowy jako materiału opartego na cemencie, posiadającego określone parametry wytrzymałościowe, zdolnego do przenoszenia obciążeń własnych i zewnętrznych. Potwierdzona została możliwość formowania go w nietypowe kształty z dużą dowolnością i utwardzania w pożądanej formie bez użycia szalunku, specjalistycznego sprzętu do mieszania, transportu czy aplikowania. Zmierzona wytrzymałość na rozciąganie części prototypów przekroczyła wartość 20 MPa, co daje trzykrotny wzrost w porównaniu z próbkami samej mieszanki wypełniającej rękaw. Oznacza to, że zastosowanie oplotu zdecydowanie zwiększa wytrzymałość testowanego rozwiązania. Dla porównania według danych zawartych w normie PE-EN 338 wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien konstrukcyjnego drewna iglastego klasy C14 wynosi ok. 8 Mpa [9].

4.3. Faza makro

W fazie makro zaproponowany wynalazek testowano przy użyciu autorskiego narzędzia cyfrowego. Pozwala ono na symulowanie, badanie i optymalizację wielu aspektów struktury architektonicznej. Podjęta została decyzja o zawężeniu prowadzonych badań do zagadnienia doboru punktów podwieszenia. Badania polegały na symulowaniu rozwieszania wiotkiej, niestężonej osnowy na zadanych punktach i obserwowaniu przemieszczeń struktury pod wpływem przykładanych obciążeń. Funkcjonalność narzędzia pozwoliła na wizualną reprezentację występujących w wiotkiej strukturze przemieszczeń, oraz modyfikację układu punktów podwieszenia. Zastosowanie algorytmu optymalizacyjnego umożliwiło poszukiwanie rozkładu punktów podwieszenia, zapewniającego minimalizację naprężeń i przemieszczeń występujących wewnątrz struktury. Działanie narzędzia umożliwia przykładowo określenie minimalnej liczby podpór niezbędnych aby występujące w strukturze przemieszczenia nie przekroczyły zadanej wartości. Optymalizację struktury pod kątem przemieszczeń zaprezentowano na rys. 2, gdzie wskutek dwuminutowego działania algorytmu optymalizacyjnego (poniżej tysiąca iteracji) zredukowano średnie przemieszczenie wiotkiej struktury po przyłożeniu obciążeń własnych z 50 do ok. 33 centymetrów, przy założeniu stałej liczby punktów podparcia. Oznacza to, że możliwa jest optymalizacja wariantu podwieszenia, w celu osiągnięcia kształtu najbliższego do zamierzonego. Redukcja przemieszczeń względem pierwotnego kształtu struktury zwizualizowana została przy pomocy skali barw, na której kolor zielony oznacza brak przemieszczenia.



Rysunek 2 - wizualizacja struktury architektonicznej wykonanej z osnowy przed i po zastosowaniu algorytmu optymalizacyjnego.

5. Podsumowanie

Swoboda kształtowania osnowy pozwala na poszukiwanie jej zastosowań w wielu dziedzinach i branżach. Wśród pomysłów na wykorzystanie osnowy pojawiają się m.in. konstruowanie zakrzywionych płaszczyzn czy kopuł, formowanie odwrócone, wzmocnianie gruntu w trudnodostępnych terenach, a nawet użycie jej jako pręta zbrojeniowego. Znamiennością tkanej osnowy cementowej jest możliwość ominięcia niektórych typowych elementów procesu budowlanego: zbrojenie, szalowanie, mieszanie i wylewanie betonu. Oznacza to możliwości jej stosowania w miejscach niedostępnych dla ciężkiego sprzętu. Łatwość formowania struktur o nietypowym kształcie wskazuje również na potencjał wykorzystania osnowy do tworzenia sztucznych przestrzeni treningowych np. dla wspinaczy czy alpinistów. Pod uwagę należy wziąć również zastosowania wojskowe. W trakcie działań militarnych niezbędna jest szybkość i sprawność działania. Wyeliminowanie potrzeby użycia sprzętu budowlanego, możliwość łatwej aplikacji i transportu może przynieść znaczną przewagę nad przeciwnikiem i przyspieszyć budowę np. schronienia przed jego atakami.

5.1. Ograniczenia badań

Jak każde badania eksperymentalne, prezentowane badania mają swoje ograniczenia. Ze względów finansowych możliwe było przeprowadzenie ograniczonej liczby testów w skali mikro, zaś brak opracowanej technologii wielkoskalowej produkcji pozwolił na wytworzenie prototypów w ilości niewystarczającej na wytworzenie struktury architektonicznej w pełnej skali. Prezentowane prace mają charakter badań podstawowych, mających na celu potwierdzenie zasadności prowadzenia dalszych prac nad wynalazkiem i poszukiwanie możliwości wdrożeniowych.

5.2. Dalsze badania

Przyjęta dla prezentowanych badań metodologia zakładała na każdym etapie zidentyfikowanie aspektów koniecznych do poruszenia w przypadku przyszłościowej kontynuacji badań nad osnową. Przebadanie wszystkich zidentyfikowanych obszarów w ramach prowadzonych prac było niemożliwe. Wiele z nich stanowiło materiał na rozległy projekt badawczy, w wielu przypadkach wykraczający poza dyscyplinę w której porusza się autor. W przypadku podjęcia działań mających na celu wdrożenie materiału do użytku konieczne jest przeprowadzenie badań między innymi pod kątem bezpieczeństwa użytkowania, nośności, stateczności, urabialności, skurczu, pęczania, czy choćby ochrony środowiska. Przeprowadzone prace pozwoliły na zaobserwowanie potencjału rozwojowego zarówno prezentowanego wynalazku jak i narzędzia obliczeniowo-symulacyjnego. Prace winny być kontynuowane

we współpracy ze specjalistami z dziedziny architektury, budownictwa, materiałoznawstwa i informatyki.

LITERATURA

- [1] Zhongming, Z., et al. (2021). IEA to produce world's first comprehensive roadmap to net-zero emissions by 2050.
- [2] Huang, B., Gao, X., Xu, X., Song, J., Geng, Y., Sarkis, J., ... & Nakatani, J. (2020). A life cycle thinking framework to mitigate the environmental impact of building materials. *One Earth*, 3(5), 564-573.
- [3] Ferry, R., & Parrott, L. (1999). Defining and Improving Environmental Performance in the Concrete Industry. DETR Project 39/3/437, CC1553.
- [4] Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2012). Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6220-6238.
- [5] Organizacja Narodów Zjednoczonych. (2015). 17 Celów Zrównoważonego Rozwoju.
- [6] Madhkhan, M., & Katirai, R. (2019). Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and aging of glass fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 225, 146-158.
- [7] Polski Komitet Normalizacyjny (2020). PN-EN 1015-11:2020-04.
- [8] Polski Komitet Normalizacyjny (1992). PN-EN 1992-1-1
- [9] Polski Komitet Normalizacyjny (2016). PN-EN 338:2016-06