

Szymon Skibicki

OCENA WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTU NA SPOIWIE CEMENTOWYM DO DRUKU 3D

STRESZCZENIE

Idea przyspieszenia i automatyzacji wykonywania konstrukcji budowlanych może przyczynić się do zrewolucjonizowania budownictwa. Druk 3D kompozytów cementowych jest technologią, która pozwala na wytwarzanie przyrostowe skomplikowanych struktur budowlanych w krótszym czasie i przy zmniejszonym zużyciu materiałów w porównaniu do tradycyjnego budownictwa. W ciągu ostatnich ośmiu lat liczba zespołów oraz firm komercyjnych zajmujących się tematyką druku 3D kompozytów cementowych zaczęła rosnąć wykładniczo. Głównym problemem tej technologii jest zaprojektowanie kompozytu o odpowiednich właściwościach. Mieszanka betonowa na spoiwie cementowym przeznaczona do wytwarzania przyrostowego powinna mieć odpowiednie niezmiennie w czasie wydruku właściwości. Materiał w postaci świeżej mieszanki betonowej bezpośrednio po wytłoczeniu musi posiadać zdolność do zachowania swojego kształtu pod ciężarem własnym oraz obciążeniem od kolejnych warstw. Ponadto wydrukowany materiał uformowany przez dyszę nie powinien ulegać deformacji podczas procesu wydruku. Dokładne określenie składu mieszanki posiadającej powyższe właściwości jest jednym z głównych problemów badawczych w tej dziedzinie.

Innym istotnym problemem jest ocena wytrzymałości wydrukowanej struktury. Idea przyspieszenia procesu wykonywania obiektów budowlanych wymaga podjęcia decyzji na temat czasu po którym wydrukowany kompozyt będzie zdolny do przeniesienia obciążeń z stropów, nadproży lub innych elementów. Ocena wytrzymałości wydrukowanego kompozytu musi także uwzględniać zmiany temperatury mogące wystąpić podczas drukowania na placu budowy, w tym celu można stosować funkcję dojrzałości.

Przedstawiona wyżej problematyka badawcza nie jest do końca rozpoznana. Rozwój automatyzacji budownictwa przez zastosowanie technik wytwarzania przyrostowego dla inżynierii lądowej jest zagadnieniem nowym i stosunkowo mało przebadanym. Obecnie brak jest znormalizowanych metod badawczych oceniających przydatność mieszanki do druku 3D. Ponadto nie istnieją funkcje opisujące nośność mieszanki betonowej, które mogą służyć optymalizacji procesu wydruku. W kontekście stwardniałego kompozytu przeznaczonego do druku 3D brak jest funkcji dojrzałości szacujących ich wytrzymałość na ściskanie w zmiennych warunkach termicznych.

W części studialnej rozprawy opisano metody stosowane w druku 3D, podstawowe zasady oraz opisano wybrano realizacje (rozdział 3). Wykonano szczegółową analizę właściwości istotnych dla betonów drukowanych oraz opisano stosowane metody badawcze (rozdział 4). Dodatkowo przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat metody dojrzałości oraz opisano możliwość jej zastosowania do oceny wytrzymałości stwardniałych kompozytów wykonanych w technologii wytwarzania przyrostowego (rozdział 5).

Przeprowadzone badania własne (rozdziały 6 – 11) można podzielić na trzy etapy. Etap pierwszy obejmował badania wstępne mieszanek potencjalnie przeznaczonych do druku. W ramach tych badań wykonano wydruki kilku struktur dla różnych parametrów wyjściowych. Oceniono parametry wydruków w kilku kategoriach. Na tej podstawie ustalono wstępne właściwości mieszanek przeznaczonych do druku. Następnie na stanowisku do symulacji procesu wydruku przetestowano 24 mieszanki z których wybrano osiem do dalszych badań. Drugi etap badań obejmował badania zasadnicze ośmiu wybranych mieszanek. W tym etapie określono szczegółowo szereg właściwości mieszanki oraz stwardniałego kompozytu. Dla każdej z mieszanek wykonano badania na stanowisku do symulacji procesu wydruku w dziewięciu punktach czasowych co pozwoliło na określenie funkcji rozwoju właściwości mechanicznych mieszanki. Ponadto określono właściwości mechaniczne stwardniałego kompozytu w zmiennych warunkach termicznych co pozwoliło na zastosowanie metody dojrzałości do wyprowadzenia funkcji określających wytrzymałość mieszanki w czasie. Trzeci etap obejmował badania weryfikacyjne polegające na wydruku wybranych mieszanek w kilku punktach czasowych. Umożliwiło to określenie zależności między wytrzymałością mieszanki uzyskaną na stanowisku do badania wydruku a realnym wydrukiem. Ponadto w tym etapie wykonano badania niszczące wydrukowanych struktur. Po wykonaniu badań przeprowadzono analizę wyników (rozdział 12) oraz wyprowadzono funkcje określające właściwości mechaniczne mieszanki oraz stwardniałego kompozytu (rozdział 13).

Na podstawie badań wykonanych w rozprawie doktorskiej opracowano autorski sposób oceny mieszanki do druku 3D. Wyprowadzono funkcję, która po określeniu wymaganych parametrów docelowej struktury pozwala na obliczenie zalecanej prędkości głowicy przy której struktura zostanie wydrukowana prawidłowo. Następnie zmieniono znane funkcje dojrzałości umożliwiając ich zastosowania do oceny wytrzymałości stwardniałego kompozytu przeznaczonego do druku. Badania pokazały szereg zależności między badanymi kompozytami, które przedstawiono w podsumowaniu (rozdział 14).

26.08.2020, Szymon Skibicki