mgr inż. Dominik Grzęda [1)]
dr inż. Katarzyna Łaskawiec [1)*)]

Zastosowanie surowców odpadowych w technologii ABK

Globalne dążenie do gospodarki obiegu zamkniętego zwiększa zainteresowanie wykorzystaniem odpadów jako surowców wtórnych w budownictwie [1, 2]. Atrakcyjną alternatywą dla tradycyjnych surowców mineralnych jest **podziarno ze stłuczki szklanej**, które dzięki dużej zawartości amorficznej krzemionki i możliwości wielokrotnego przetwarzania pozwala zmniejszyć ilość odpadów na składowiskach oraz ograniczyć zużycie piasku i wapna, co jest zgodne z ideami polityki środowiskowej i redukcją śladu węglowego w produkcji materiałów budowlanych [1 – 3]. Autoklawizowany beton komórkowy (ABK) łączy małą gęstość z dobrą izolacyjnością termiczną i wytrzymałością mechaniczną [3, 4]. Tradycyjnie źródłem krzemionki jest w nim piasek kwarcowy lub popioły lotne, a proces autoklawizacji sprzyja tworzeniu uwodnionych krzemianów wapnia, przede wszystkim tobermorytu, odgrywających kluczową rolę w strukturze materiału [3, 4].

Zastąpienie naturalnych surowców zmielonym podziarnem ze stłuczki szklanej ogranicza zużycie surowców naturalnych oraz energochłonność przygotowania surowców krzemionkowych, przede wszystkim procesu mielenia piasku kwarcowego, co wpisuje się w cele zrównoważonego rozwoju przemysłu materiałów budowlanych [1, 3, 5]. Badania wskazują, że zmielone podziarno ze stłuczki szklanej może służyć jako substytut części piasku kwarcowego w ABK bez pogorszenia jego właściwości mechanicznych [4, 6, 7]. Drobny proszek szklany wchodzi w reakcje pucolanowe ze spoiwem cementowym, zwiększając udział fazy tobermorytu w materiale [5 – 7].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań w warunkach przemysłowych nad wpływem dodatku podziarna ze stłuczki szklanej na przebieg procesu autoklawizacji oraz wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne ABK.

Metoda badań

Program badań obejmował zastąpienie piasku kwarcowego różnymi formami podziarna ze stłuczki szklanej (zarówno frakcję gruboziarnistą, jak i drobno mielonym proszkiem). Odpady oczyszczano, kruszono i mielono do wymaganych frakcji. Próbki laboratoryjne wytwarzano zgodnie z typową technologią ABK i porównywano z serią referencyjną.

Właściwości materiałów oceniano przez porównanie serii eksperymentalnych z próbkami referencyjnymi wykonanymi wg standardowej receptury autoklawizowanego betonu komórkowego. **Zakres badań obejmował oznaczenie gęstości objętościowej, wytrzymałości na ściskanie zgodnie z PN-EN 771-4, wytrzymałości na zginanie, nasiąkliwości wodą oraz współczynnika przewodzenia ciepła.** W celu określenia wpływu dodatku podziarna na procesy zachodzące podczas autoklawizacji **przeprowadzono również analizę mikrostrukturalną materiałów**. Za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) zidentyfikowano fazy mineralne w wytworzonych materiałach, Identyfikację faz mineralnych wykonano metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), natomiast obserwacje morfologii produktów hydratacji przeprowadzono z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Szczególną uwagę poświęcono identyfikacji tobermorytu oraz faz C-S-H odpowiedzialnych za właściwości użytkowe autoklawizowanego betonu komórkowego.

Wyniki badań

Badania wykazały, że częściowe zastąpienie surowca krzemionkowego podziarnem ze stłuczki szklanej nie pogorszyło podstawowych właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego. Osiągnął on parametry odpowiadające typowym klasom gęstości (500 – 600 kg/m³) oraz wytrzymałości na ściskanie (2 – 4 MPa), charakterystycznym w przypadku zastosowania ABK jako materiału konstrukcyjno-izolacyjnego. Jednym z najważniejszych obserwowanych efektów był wpływ dodatku podziarna na strukturę porowatą materiału. Przy niewielkim udziale podziarna ze stłuczki nie odnotowano istotnych zmian gęstości objętościowej w porównaniu z materiałem referencyjnym. Wraz ze zwiększeniem zawartości drobno mielonego proszku szklanego, przekraczającej ok. 10% masy surowca krzemionkowego, zaobserwowano jednak stopniowe zmniejszenie porowatości oraz nieznaczne zwiększenie gęstości ABK. Zjawisko to jest zgodne z doniesieniami literaturowymi, wg których reaktywna amorficzna krzemionka obecna w szkle sprzyja zagęszczeniu mikrostruktury przez intensyfikację procesów tworzenia faz krzemianowo-wapniowych.

Wpływ dodatku podziarna ze szkła na właściwości mechaniczne zależał przede wszystkim od jego postaci oraz stopnia rozdrobnienia. Niewielkie ilości podziarna nie powodowały statystycznie istotnych zmian wytrzymałości na ściskanie. Przy zastąpieniu piasku na poziomie 5 – 10% obserwowano jedynie nieznaczne zmniejszenie wytrzymałości, mieszczące się w granicach kilku procent w porównaniu z materiałem referencyjnym. Znacznie większy spadek wytrzymałości występował natomiast w przypadku dużego udziału gruboziarnistego podziarna ze stłuczki szklanej. Zmniejszenie parametrów mechanicznych sięgało wówczas 30 – 35%. Efekt ten

[1)] Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych
[*)] Adres do korespondencji:
katarzyna.laskawiec@icimb.lukasiewicz.gov.pl

można tłumaczyć ograniczoną reaktywnością dużych ziaren szkła oraz ich słabszym udziałem w procesie tworzenia faz wiążących. Odmienną zależność zaobserwowano w przypadku drobno mielonego proszku szklanego. Wysoki stopień rozdrobnienia powodował zwiększenie aktywności pucolanowej materiału, co prowadziło do intensywnego tworzenia produktów hydratacji podczas autoklawizacji. W rezultacie próbki zawierające znaczny udział proszku szklanego osiągały wytrzymałość na ściskanie przekraczającą wartość materiału referencyjnego, dochodzącą do ok. 4,9 MPa. Wyniki te potwierdzają, że odpowiednio przygotowane podziarno ze stłuczki szklanej może pełnić nie tylko funkcję substytutu surowca krzemionkowego, lecz również aktywnego dodatku mineralnego poprawiającego właściwości mechaniczne autoklawizowanego betonu komórkowego.

Badania mikrostrukturalne potwierdziły obserwowane zmiany właściwości materiału. Analiza dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) autoklawizowanego betonu komórkowego wykazała obecność w nim typowych faz mineralnych, przede wszystkim tobermorytu (11 Å) oraz uwodnionych krzemianów wapnia (C-S-H). Nie stwierdzono obecności niepożądanych produktów reakcji ani nowych faz mogących świadczyć o niekorzystnym oddziaływaniu dodatku podziarna ze szkła. Obserwacje wykonane z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) ujawniły charakterystyczną włóknistą morfologię kryształów tobermorytu oraz obecność półkrystalicznych faz C-S-H. W próbkach zawierających duży udział proszku szklanego widoczna była bardziej zwarta mikrostruktura oraz lepsze wypełnienie przestrzeni pomiędzy porami, co pozostawało w bezpośredniej korelacji z uzyskanym zwiększeniem wytrzymałości mechanicznej. Jednocześnie wzrost zawartości podziarna ze szkła powodował stopniowe ograniczenie stopnia krystaliczności tobermorytu na rzecz większego udziału półkrystalicznych faz C-S-H, co jest charakterystyczne w przpadku materiałów zawierających reaktywną amorficzną krzemionkę.

Analiza właściwości użytkowych wykazała również niewielki wpływ dodatku podziarna ze szkła na przewodność cieplną materiału. Zmniejszenie jego porowatości skutkowało nieznacznym zwiększeniem współczynnika przewodzenia ciepła λ, ale wartości pozostawały w zakresie umożliwiającym zachowanie dobrych właściwości termoizolacyjnych autoklawizowanego betonu komórkowego. Nie zaobserwowano też istotnych zmian nasiąkliwości wodą, która utrzymywała się na poziomie charakterystycznym dla materiałów o strukturze komórkowej. Uzyskane wyniki potwierdzają ścisłą zależność pomiędzy mikrostrukturą, porowatością oraz właściwościami mechanicznymi ABK i wskazują, że odpowiednio przygotowane i rozdrobnione podziarno ze stłuczki szklanej może stanowić wartościowy surowiec wtórny w jego produkcji. Kluczowym czynnikiem decydującym o efektywności zastosowania podziarna jest stopień jego rozdrobnienia, determinujący aktywność pucolanową oraz udział w procesie tworzenia faz odpowiedzialnych za właściwości użytkowe ABK. Dzięki temu możliwe jest jednoczesne osiągnięcie korzyści środowiskowych, wynikających z wykorzystania odpadu szklanego oraz zachowanie lub nawet poprawa parametrów technicznych gotowego materiału. Należy jednak podkreślić, że stosowanie surowców odpadowych wiąże się z istotną zmiennością ich składu chemicznego i granulometrycznego. W praktyce oznacza to konieczność wdrożenia systemu kontroli jakości surowca wejściowego, obejmującego: analizę chemiczną (m. in. zawartości Na_2O, K_2O, SiO_2 oraz potencjalnie metali śladowych i/lub ciężkich); kontrolę rozkładu wielkości ziaren i wilgotności stłuczki; przyspieszone testy reaktywności alkalicznej oraz ocenę frakcji mączkowej (preferencyjnie <0,100 mm). Zmienność ta może wpływać na przebieg autoklawizacji, ryzyko reakcji alkaliczno-krzemionkowej, ilość i morfologię faz wiążących (C–S–H/tobermoryt), a w konsekwencji na porowatość, skurcz, absorpcję wody i powtarzalność parametrów technologicznych. W związku z tym **rekomendujemy: przygotowanie surowca** (mielenie, odsiew, homogenizacja); **wprowadzenie kryteriów akceptacyjnych dotyczących poszczególnych jego partii oraz cykliczne dostosowywanie receptur i parametrów procesu na podstawie wyników kontroli jakości**. Tylko przy takim podejściu wykorzystanie podziarna stłuczki szklanej jako surowca wtórnego zapewni powtarzalność właściwości ABK i zminimalizuje ryzyko technologiczne.

Literatura

[1] European Commission. A new Circular Economy Action Plan. For a Cleaner and More Competitive Europe. Brussels, 2020.

[2] Tihomirovs D, Korjakins A, Bajare D, Bumanis G. Demolition Waste Glass Usage in the Construction Industry. Materials. 2023, 16(3), 1120.

[3] Pichór W, i in. Environmentally friendly material solutions in the technology of autoclaved aerated concrete. AAC Worldwide, 2025.

[4] Hilal AA, Thom NH, Dawson AR. On the utilization of waste materials in autoclaved aerated concrete. Construction and Building Materials. 2015, 94, 405 – 423.

[5] Shi C, Zheng K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resources, Conservation and Recycling. 2007; 52(2), 234 – 247.

[6] Straub M, Brouwers HJH, i in. Valorization of Municipal Waste Glass Powder in Autoclaved Aerated Concrete: Microstructural Evolution and Performance Analysis. Construction and Building Materials. 2025.

[7] Walczak P, Pichór W, i in. Utilization of Waste Glass in Autoclaved Aerated Concrete. Archives of Civil Engineering, 2015.

Partner działu: **Stowarzyszenie Producentów Betonów**

www.s-p-b.pl