

dr inż. Paweł Walczak¹⁾

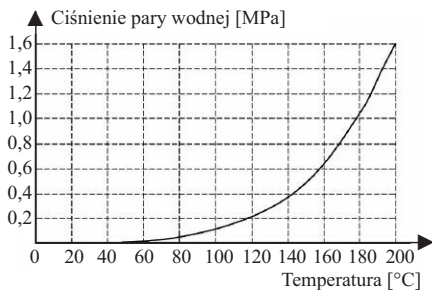
Znaczenie autoklawizacji w produkcji betonu komórkowego

Proces autoklawizacji w produkcji betonu komórkowego (ABK) został po raz pierwszy zastosowany przez szwedzkiego uczonego Axela Erikssona w 1923 r. w Szwecji. Przez następne dziesięciolecia materiał ten był rozwijany i produkowany w wielu krajach na całym świecie. W ostatnich latach ABK przeżywa renesans, ponieważ jego wytwarzanie dynamicznie rozwija się m.in. w krajach Azji oraz Ameryki Południowej. Produkcja ABK nie byłaby możliwa bez użycia obróbki hydrotermalnej, która nadaje mu unikatowe właściwości.

Para wodna w procesie autoklawizacji

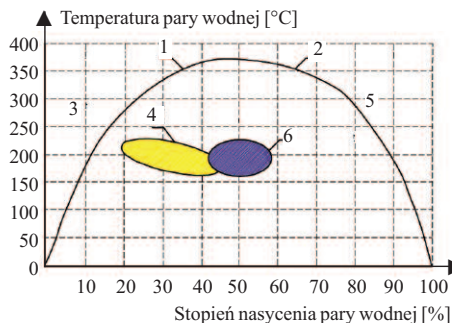
Autoklawizacja to obróbka hydrotermalna prowadzona w specjalnych zbiornikach ciśnieniowych, nazywanych autoklawami, do których wprowadza się nasyconą parę wodną o ciśnieniu 10 – 12 barów i temperaturze 170 – 200°C. Temperatura pary wodnej wynika wprost z jej ciśnienia (rysunek 1). Parametry pary wodnej stosowanej w produkcji ABK usystematyzował Paprocki (rysunek 2) [2].

W celu zrozumienia celowości stosowania procesu autoklawizacji należy przeanalizować rozpuszczalność głównych składników betonu komórkowego w funkcji temperatury. Wodorotlenek wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jako główny składnik wapnia i cementu jest bardzo dobrze rozpuszczalny w temperaturze 20 – 30°C,



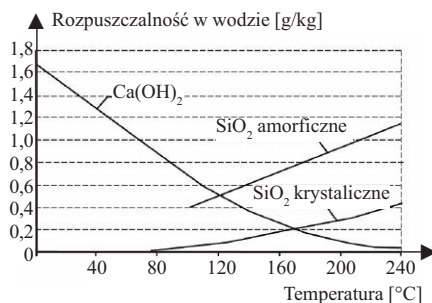
Rys. 1. Zależność pomiędzy ciśnieniem i temperaturą pary wodnej [1]

¹⁾ SOLBET Sp. z o.o.; pawel.walczak@solbet.pl



Rys. 2. Parametry pary wodnej stosowanej w procesie autoklawizacji: 1 – granica pary suchej; 2 – granica pary i wody; 3 – para przegrzana sucha; 4 – obszar optymalny końcowego etapu hartowania; 5 – woda; 6 – obszar optymalny

w przeciwieństwie do ditlenku krzemu SiO_2 , czyli głównego składnika kruszywa (piasku) stosowanego w produkcji ABK. Reakcje chemiczne przebiegają najlepiej w środowisku, gdzie dochodzi do równowagi chemicznej. Dzięki zastosowaniu obróbki hydrotermalnej główne składniki betonu komórkowego uzyskują podobną rozpuszczalność (rysunek 3).



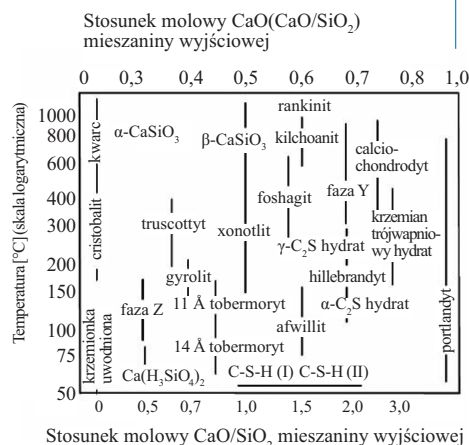
Rys. 3. Rozpuszczalność głównych składników ABK w funkcji temperatury [3]

Reakcje zachodzące w procesie autoklawizacji

Uwodnione krzemiany wapnia to produkty, które najczęściej powstają w produktach, w których jednym ze składników jest cement. Istnieje bardzo wiele uwodnionych krzemianów wapnia, a wg Taylora ich mnogość o różnym stopniu zaburzenia jest spowodowana właściwościami atomu wapnia [4]. Na rysunku 4 pokazano przybliżony zakres wy-

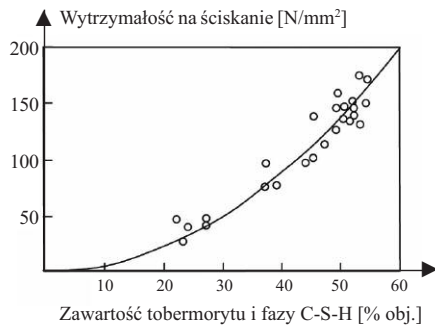
stępowania uwodnionych krzemianów wapnia w warunkach hydrotermalnych.

Badania potwierdzają, że w tradycyjnym betonie dojrzewającym w warunkach naturalnych głównym produktem hydratacji cementu są fazy C-S-H. W produkcji betonu komórkowego kruszywo, czyli piasek poddany jest mieleniu, dzięki czemu w procesie autoklawizacji może „rozpuścić się” jego większa ilość. W efekcie mikrostruktura betonu komórkowego jest bardziej zwarta i zostaje zmniejszony stosunek molowy C/S w produktach hydratacji. Patrząc na układ $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ w wa-



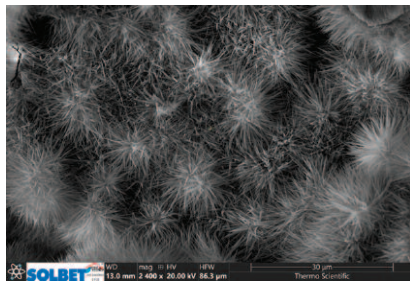
Rys. 4. Układ $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ w warunkach hydrotermalnych

warunkach hydrotermalnych, można zauważyć, że główny produkt hydratacji – tobermoryt ma mniejszy stosunek C/S niż standardowe fazy C-S-H. Jako podstawowa faza obecna w matrycy betonu komórkowego jest on fazą krystaliczną o stosunku molowym $\text{CaO/SiO}_2 = 0,83$. W związku z tym, że produkty powstające w trakcie reakcji w warunkach hydrotermalnych są fazami dobrze wykrystalizowanymi, to można je łatwo interpretować za pomocą analizy rentgenowskiej. Ilość powstałych produktów wpływa na właściwości produkowanych materiałów, co było przedmiotem badań Dyczka [5], a ich zależność pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Zależność wytrzymałości na ściskanie od ilości tobermorytu i fazy C-S-H

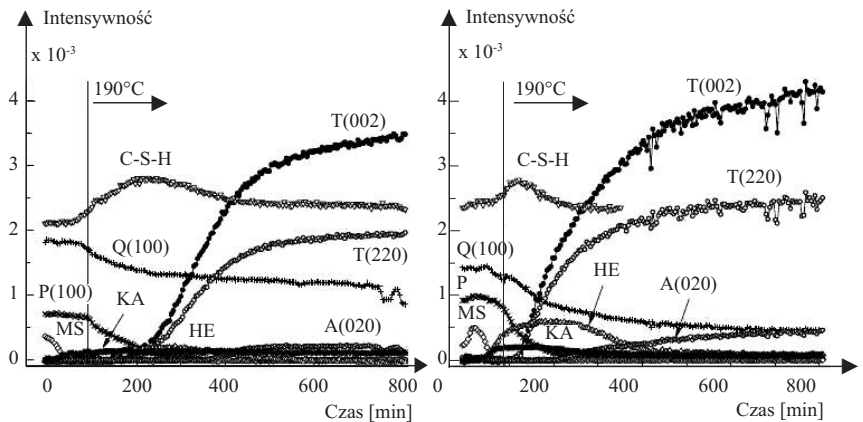
Tobermoryt jest fazą bardzo dobrze wykrystalizowaną i w związku z tym można go zaobserwować pod elektronowym mikroskopem skaningowym SEM. W zależności od ilości zastosowanego spoiwa obserwuje się nie tylko zmianę ilości tobermorytu, ale również jego kształtu. Na fotografii pokazano tobermoryt o różnym kształcie kryształów zależnym od różnego stosunku C/S [6]. W procesie autoklawizacji duże znaczenie ma nawet najmniejsza ilość dodat-



Zdjęcia SEM tobermorytu o różnym kształcie kryształów [6]

ków, co wykazały badania mające na celu określenie wpływu gipsu na szybkość powstawania tobermorytu za pomocą analizy rentgenowskiej (rysunek 6).

Większa ilość jonów siarczanowych pochodzących z gipsu prowadzi do powstania większej ilości ettringitu i monosulfatu przed procesem autoklawizacji, a to z kolei powoduje szybsze powstawanie większej ilości tobermorytu i fazy C-S-H. Przez wiele lat nie tylko jony siarczanowe były przedmiotem badań hydratacji w warunkach hydrotermalnych. W ostatnich latach można zauważyć dynamiczny rozwój produkcji ABK



Rys. 6. Wpływ dodatku gipsu na hydratację tobermorytu w warunkach hydrotermalnych [7, 8]

na świecie, a w efekcie coraz więcej publikacji naukowych jest poświęconych procesowi autoklawizacji. Ponadto regularnie organizowana jest światowa konferencja na temat autoklawizowanego betonu komórkowego. Podczas ostatniej, która odbyła się w Pradze w 2023 r., zaprezentowano ponad siedemdziesiąt referatów przygotowanych przez naukowców z całego świata.

mniejszy skurcz przy wysychaniu, a także większą trwałość w czasie.

Literatura

- [1] PN-ISO 13788: 2003 Ciepło-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa – Metody obliczania.
- [2] Paprocki A. Betony komórkowe. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1966 r.

Wnioski

Dzięki procesowi autoklawizacji powstają produkty hydratacji cementu, głównie tobermoryt, który jest postrzegany jako najstabilniejsza forma uwodnionych krzemianów wapnia z punktu widzenia termodynamiki. Duże ciśnienie i temperatura powodują, że dotąd niereaktywny piasek staje się „spoiwem” i bierze aktywny udział w reakcjach chemicznych. W efekcie spoiwo może w pełni przereagować i w porównaniu z reakcją w zwykłych warunkach obserwuje się oszczędność surowców naturalnych, większą wytrzymałość na ściskanie,

- [3] Gundlach H. Dampfgehärtete Baustoffe. Bauverlag GmbH, 365, Wiesbaden 1973 r.
- [4] Taylor HFW. The Chemistry of Cements. Academic Press, London 1997 r.
- [5] Dyczek J. Zeszyty Naukowe AGH. Ceramika, Z. 42, Kraków 1979 r.
- [6] Drobiec Ł, et. Projektowanie konstrukcji murowych z betonu komórkowego wspomaganie badaniami. PWN, 2022 r.
- [7] Matsui K, Kikuma J, Tsunashima M, Ishikawa T, Matsuno S, Ogawa A, Sato M. Cement and Concrete Research. 2011; Vol. 41, s. 510.
- [8] Matsui K i inni. Influence of addition of Al compound and gypsum on tobermorite formation in autoclaved aerated concrete studied by in situ x-ray diffraction. V International Conference of Autoclaved Aerated Concrete, s. 147, Bydgoszcz 2011.

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

www.s-p-b.pl



ROK ZAŁOŻENIA 1994