WYBRANE PROBLEMY PROJEKTOWANIA BETONÓW O NISKIM STOSUNKU WODNO-SPOIWOWYM

Agnieszka Grzybowska[1]

1. WPROWADZENIE

Powszechnie stosowaną grupą kompozytów cementowych są betony wysokowartościowe (BWW), (m.in. [Aïtcin 1998, Bentzi in. 2001, Czarnecki 2007, Acalski i in. 2015]). Zgodnie z definicją Aïtcina, betonem wysokowartościowym określa się taki, w którym jedna lub więcej cech charakterystycznych zostało udoskonalonych poprzez dobór i zastosowanie odpowiednich proporcji składników. Na podstawie tego można zatem, stwierdzić że nie ma jednego rodzaju betonu wysokowartościowego [Aïtcin 2000], a więc nie są tożsame określenia betonu wysokowartościowego i wysokiej wytrzymałości. Zauważyć można więc, że betony wysokowartościowe wywodzą się wprost z tradycyjnego betonu zwykłego i stanowią efekt wprowadzonych w nim modyfikacji [Jasiczak i in. 2008], ukierunkowanych na redukowanie jego mankamentów. Wiodącą właściwością mechaniczną betonu jest wytrzymałość na ściskanie, a proces kształtowania struktury prowadzący do otrzymania betonu o wysokiej wytrzymałości zwiększa szanse na to, że również inne cechy charakterystyczne (np. mrozoodporność, nasiąkliwość, moduł sprężystości, ścieralność i inne) będą polepszone w stosunku do analogicznych, typowych parametrów betonu zwykłego. Według Eurokodu 2, beton wysokowartościowy klasyfikowany jest powyżej C50/60. O odporności betonu na mróz decyduje stopień nasiąkliwości. Im komponent ma większą nasiąkliwość, tym jest mniej odporny na mróz, ponieważ objętość porów jest w dużej mierze zajęta przez wodę. W przypadku betonów zwykłych porowatość sięga 12-16%, natomiast dla BWW wynosi ona 9-12% [Ajdukiewicz 2008, Jasiczak 2008]. Jeżeli chodzi o mrozoodporność, według testu CIF (ang. *Capilary Suction, Intreal Demage and Freeze-thaw Test*) ocena betonów następuje zarówno na podstawie ubytku po 28 cyklach, jak również za pomocą wewnętrznych uszkodzeń. Decydująca tutaj jest liczba cykli, które beton przetrwa, do momentu, gdy względny moduł dynamiczny E spadnie o więcej niż 25%. Dla betonów zwykłych ilość ubytków waha się w granicach 150-1300 $g \cdot m^{-2}$, podczas gdy dla BWW 50-200 $g \cdot m^{-2}$ [Jasiczak 2008]. Odporność na ścieranie ma istotne znaczenie przy nawierzchniach intensywnie eksploatowanych (istnieją 3 klasy tej odporności). BWW są wykonywane z nowoczesnych spoiw cementowych wysokiej jakości. Dodatkowymi wyróżnikami tych betonów są małe wartości stosunku wodno-spoiwowego i nierozłącznie z tym związana konieczność stosowania nowoczesnych domieszek plastyfikujących lub upłynniających. W przypadku betonów o najwyższej wytrzymałości konieczne jest także zastosowanie dodatków mineralnych, zwłaszcza pyłu krzemionkowego [Bhanja 2003, Freidin 2007, Zhou 2015] oraz stosowanie specjalnych metod zagęszczania, takich jak np. wibroprasowanie, prasowanie, odwadnianie próżniowe. W literaturze przedmiotu [Jasiczak 2008] stwierdzono, że beton wysokowartościowy nie jest materiałem rewolucyjnym, lecz wyrazem rozwoju innych grup betonów. Podkreślić należy, że

[1] Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-769 Bydgoszcz, e-mail: grzybowska.utp@gmail.com

obiekty betonowe stają się trwałym elementem krajobrazu, bowiem beton jest najstarszym sztucznym materiałem spośród obecnie stosowanych w technice. Za przyszłością betonu przemawia długa, sięgająca ponad 8000 lat historia, w tym blisko 200 lat w czasach nowożytnych. Naturalny zatem wydaje się postęp w materiałach, wyprzedzający rozwój konstrukcji. Beton jest obecnie najczęściej stosowanym (ok. 6 mld m^3 rocznie) materiałem spośród wytwarzanych przez człowieka, a drugim po wodzie w całym zbiorze stosowanych materiałów [Czarnecki i Kurdowski 2007]. Technologia betonu jest dziedziną, która rozwija się w bardzo szybkim tempie. Liczne modyfikacje składu (np. stosowanie domieszek, dodatków czy włókien stalowych) oraz wpływanie na strukturę betonu powodują znaczną poprawę jego parametrów, czego efektem są betony wysokowartościowe, stale ulegające modyfikacjom. Produkcja BWW ma zatem na celu uzyskanie polepszonych właściwości mechanicznych i użytkowych, co można uzyskać poprzez obniżenie stosunku wodno-spoiwowego (rozumianego jako stosunek wody i dowolnej kombinacji cementu ze składnikami mineralnymi, w literaturze oznaczanego jako ω), bowiem BWW otrzymuje się przy bardzo niskich stosunkach wodno-spoiwowych: poniżej 0,35 często około 0,25, a sporadycznie nawet 0,20 [Aïtcin 2000, Jasiczak i in. 2008, Neville 2012]. W niniejszej pracy taki właśnie rodzaj betonu (o niskim stosunku wodno-spoiwowym) będzie rozważany, bowiem jest to ważna grupa betonów, prężnie rozwijająca się, o szerokim zastosowaniu [Czarnecki 2003] na przykład: w konstrukcjach wysokich, mostownictwie czy drogownictwie. W oparciu o przedstawione cechy BWW można zdefiniować korzyści wynikające ze stosowania BWW [Grupa Górażdże 2015]: wyższa wytrzymałość, prowadząca do smuklejszych i lżejszych konstrukcji; szybsza stabilizacja strat sprężenia i tolerancji montażowych; nowe możliwości konstrukcyjne, zwłaszcza w ustrojach zespolonych i obiektach pracujących w środowisku agresywnym; wysoka wytrzymałość „młodego" betonu umożliwiająca wczesne obciążanie konstrukcji, a zarazem przyspieszenie realizacji obiekt; możliwość dobierania urabialności i czasu przerobu mieszanki stosownie do wymagań transportu i układania betonu; zmniejszenie zużycia materiałów i wysoka estetyka obiektów; wysoka trwałość wznoszonych obiektów. Przede wszystkim zaznaczyć należy, że betony o niskim stosunku wodno-spoiwowym wykorzystywane są między innymi do produkcji wyrobów wibroprasowanych. Ze względu na szeroką dostępność tego typu wyrobów, producenci zwracają szczególną uwagę na jakość oferowanych produktów. Oczekiwania stawiane wobec wyrobów wibroprasowanych generują potrzebę eliminacji wystąpienia możliwych defektów, rozpoczynając już etapu projektowania. Staranny dobór jakościowy komponentów jest bowiem konieczny do uzyskania pożądanych właściwości betonu [Mrozik 2012].Warto więc podkreślić wagę procesu kształtowania struktury betonów wysokowartościowych o niskim stosunku wodno-spoiwowym w celu otrzymania kompozytu o założonej wytrzymałości. W przypadku betonów zwykłych wystarczająco dokładne okazują się tradycyjne metody opierające się na prostym bilansie objętościowym składników (np. metoda trzech równań [Śliwiński 1999]), umożliwiając stosunkowo dokładne oszacowanie wytrzymałości. W odniesieniu do betonów o niskim stosunku wodno-spoiwowym metody te dają zbyt duże rozbieżności pomiędzy wartością wytrzymałości na ściskanie obliczoną a otrzymaną w rzeczywistości (m.in. [Śliwiński 2003, Mrozik 2012]). Dlatego uznano aktualny stan wiedzy w tym zakresie za niewystarczający, co jest podstawą do rozpoczęcia studiów literaturowych z tematyki betonów o niskim stosunku wodno-spoiwowym. Uzyskane wnioski generujące problemy badawcze posłużyły jako składowe stanowiące fragment analizy teoretycznej przygotowywanej rozprawy doktorskiej.

2. CHARAKTERYSTYKA BETONU O NISKIM STOSUNKU WODNO-SPOIWOWYM

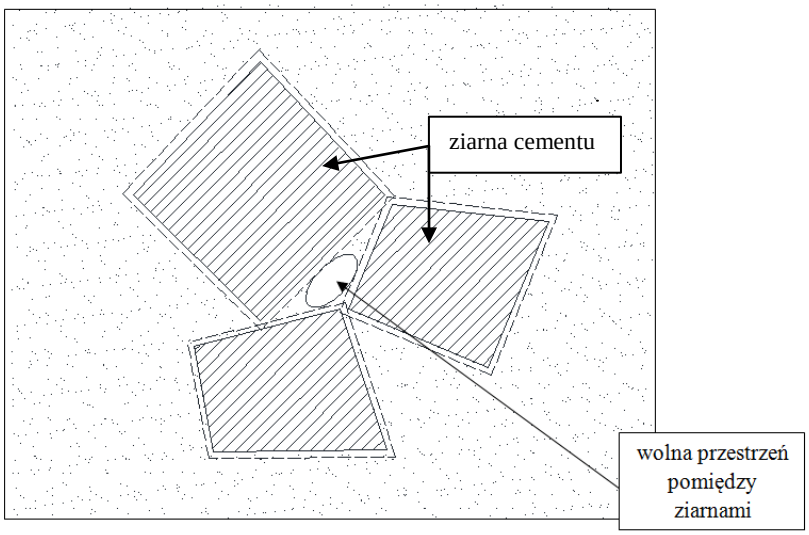
Poznanie właściwości zaczynu umożliwia racjonalne projektowanie mieszanki betonowej, którą można rozpatrywać jako zawiesinę kruszywa w zaczynie. W mieszance tej, poddanej naprężeniom (mieszania), ziarna kruszywa przemieszczają się w środowisku złożonym z zaczynu. W okresie późniejszym zaczyn decyduje o szybkości przyrostu wytrzymałości, cieple twardnienia, skurczu wysychania i pęcznienia przy nawilżaniu. Ostatecznie skład fazowy zaczynu ma duży wpływ na odporność betonu na czynniki agresywne i trwałość konstrukcji betonowych. W początkowym okresie zaczyn cementowy jest gęstą zawiesiną ziaren cementu w wodzie. Struktura tej zawiesiny zależna jest od stosunku wodno-spoiwowego i uziarnienia cementu [Kurdowski 2010]. Powszechnie przyjmuje się, że niski stosunek wodno-spoiwowy gwarantuje uzyskanie betonu wysokiej jakości, natomiast wysoki wskaźnik (ilość wody przekracza wynikającą z hydratacji cementu) wpływa niekorzystnie na podstawowe właściwości betonu. Wraz ze wzrostem ilości wody w betonie spada mrozoodporność, warunki ochrony stali oraz zachodzą przyspieszone procesy korozji [Deja 2002]. Wskaźnik wodno-spoiwowy pozostaje zatem jednym z fundamentalnych parametrów betonu. Ponadto struktura zaczynu cementowego zależy także od sił działających między ziarnami cementu a cząsteczkami wody, na co z kolei ma wpływ ładunek powierzchniowy, stężenie jonów w roztworze i zjawiska adsorpcji [Kotwica 2005 i in.]. Dla betonów zwykłych w/s kształtuje się na poziomie 0,4. Z uwagi na fakt, że do roztworu przechodzą głównie kationy, ziarna cementu ładują się ujemnie [Kurdowski 2010]. Na powierzchni ziaren cementu tworzy się ciągła warstewka wody, wynikająca z silnego przyciągania wody przez powierzchnię ziarenek. Przy energicznym mieszaniu (oddziaływania od mieszania są dominujące) woda ta wykazuje tendencję do tworzenia warstewek o jednakowej grubości. Wobec powyższego powstaje tzw. elektryczna warstwa podwójna, składająca się ze sztywno związanych z powierzchnią ziarna jonów dodatnich (tzw. warstwa Sterna) oraz warstwy dyfuzyjnej zawierającej jony luźniej związane (elektryczna warstwa podwójna) [Łukowski 2008]. Przy założonych parametrach jakościowych komponentów, cechy stwardniałego betonu zależą nie tylko od składu ilościowego, ale także od stopnia rozdrobnienia poszczególnych komponentów, a w szczególności spoiwa. Jest to parametr ściśle powiązany ze strukturą zaczynu. Powietrze znajdujące się w stwardniałym kompozycie cementowym może mieć różne pochodzenie. Najczęściej występującymi w betonie pustkami powietrznymi są [Deja 2002]: pory kapilarne i żelowe; porowatość strefy kontaktowej zaczyn – kruszywo; zamknięte pory powietrzne wprowadzone celowo przy zastosowaniu domieszki napowietrzającej lub spieniającej; pustki wynikające z niedostatecznego zagęszczenia, tzw. raki.

Stwardniały zaczyn cementowy składa się z gęsto ułożonych produktów hydratacji, pomiędzy którymi występują wolne przestrzenie zwane porami (im mniej porów, tym bardziej szczelna jest struktura). Zawartość i kształt porów mają decydujące znaczenie dla wytrzymałości i trwałości zaczynu cementowego. Niewielkie pustki (pory żelowe) nie mają dużego znaczenia, jednak większe pory kapilarne powodują znaczne obniżenie jakości betonu. Pustki kapilarne i żelowe wynikają bezpośrednio z przebiegu przemian fazowych zachodzących w twardniejącym zaczynie cementowym. Pory żelowe są wzajemnie połączonymi przestrzeniami pomiędzy cząstkami żelu, przyjmującymi kształty: igiełkowy, płytkowy lub płatkowy. Mają one średnicę do 3 nm, tak więc są o rząd wielkości mniejsze od cząsteczki wody [Deja 2012]. Pory kapilarne są przede

wszystkim wynikiem stosowania większej ilości wody niż wynika to z rzeczywistego zapotrzebowania mieszanki betonowej. Na każdym etapie hydratacji pory kapilarne zajmują tę część całkowitej objętości zaczynu, która nie została wypełniona przez produkty hydratacji. Ponieważ same produkty zajmują ponad dwukrotną objętość pierwotnej fazy stałej (cementu), objętość kapilar maleje wraz z postępem hydratacji. Przy stosunkach wodno-spoiwowych powyżej 0,38 objętość żelu jest za mała, aby móc wypełnić całą dostępną przestrzeń tak, że nawet po zakończeniu hydratacji pewna objętość porów kapilarnych pozostaje niewypełniona. Porów kapilarnych nie można zmierzyć w sposób bezpośredni, lecz oszacowano ich wielkość (za pomocą pomiaru ciśnienia pary) na około 0,13 μm [Kurdowski 2010, Deja 2012]. Dlatego tak bardzo ważnym czynnikiem jest odpowiedni stosunek ilości wody do spoiwa, którego wartość wpływa bezpośrednio na jakość betonu. Niska wartość wskaźnika wodno-spoiwowego pozwala zatem uzyskać betony wysokiej jakości poprzez minimalizowanie samorzutnego powstawania ciągłych porów kapilarnych. Istota jest przy tym również właściwa pielęgnacja betonu na mokro [Aïtcin 2014] (jako czynnik powodujący zmniejszenie samorzutnego powstawania rys), a jako przykład posłużyć może zjawisko skurczu (kontrakcji) zaczynu cementowego, tj. zmniejszenia objętości układu wskutek wzajemnego fizykochemicznego oddziaływania składników zaczynu cementowego [Kurdowski 2010]. Skutki tego zjawiska są szczególnie widoczne w przypadku betonów o wysokich wytrzymałościach, w których – oprócz dobrej jakości kruszywa i cementu – konieczne jest zwykle zastosowanie dużej ilości spoiwa oraz niskiej względnej ilości wody. W przypadku gdy wysokowartościowy beton o wskaźniku 0,30 (stosunku wodno-spoiwowym ω) nie jest właściwie pielęgnowany wodą przed związaniem, może pojawić się w nim od 200 do 300 samoistnych mikroodkształceń skurczowych w ciągu pierwszych 24 godzin [Aïtcin 1998]. Te mikroodkształcenia prowadzą (przy braku środków zaradczych, np. zbrojenia rozproszonego) do powstania mikrodefektów w postaci bardzo drobnych i licznych rys chaotycznie rozmieszczonych w objętości betonu [Chen 2013 i in.]. To w oczywisty sposób degraduje strukturę i w efekcie obniża m.in. ścieralność oraz szeroko pojętą trwałość betonu. Właściwie ukształtowany beton wysokowartościowy charakteryzuje niska przepuszczalność, bowiem stanowi on szczególnie gęstą mikrostrukturę uwodnionego zaczynu cementowego z nieciągłym układem porów kapilarnych) [Zhou 2015 i in.]. Właściwości betonu pojmowanego jako materiału heterogenicznego zależą od strefy kontaktowej dwóch faz: zhydratyzowanego zaczynu cementowego i kruszywa [Śliwiński 2003 i inni]. Przy małym stosunku, tj. w/s < 0,35, nie tworzy się także porowata strefa przejściowa wokół kruszywa [Kurdowski 2010].

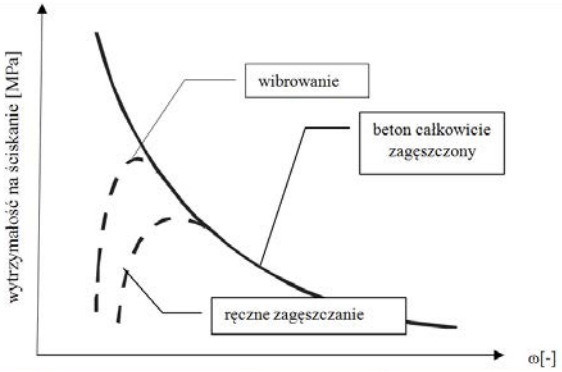
Zaczyn o ilości wody przekraczającej wodożądność normową spoiwa ($\omega >> \omega_n$, gdzie ω_n oznacza w/s, przy którym zaczyn ma konsystencję normową) jest ośrodkiem, w którym ziarna fazy stałej zawieszone są w fazie ciekłej. Wobec tego elektryczna warstwa podwójna kształtuje się swobodnie. Opisana sytuacja dotyczy betonów zwykłych. Zaczyn o ilości wody wynikającej z wodożądności normowej spoiwa ($\omega = \omega_n$) jest ośrodkiem, w którym osiągnięto maksymalną szczelność upakowania ziaren fazy stałej. Sytuacja ta odpowiada całkowitemu wypełnieniu przestrzeni międzyziarnowych wodą, zaś grubość warstwy wodnej otoczki na ziarnach osiąga minimalną wartość wynikającą z sił oddziaływania elektrostatycznego [Mrozik 2012]. Gdy stosunek wodno-spoiwowy jest mniejszy od wodożądności normowej ($\omega < \omega_n$), elektryczna warstwa podwójna zaczyna na siebie zachodzić, co uniemożliwia przedostanie się wody pomiędzy ziarna cementu. Dochodzi do powstania wolnych (wypełnionych powietrzem) przestrzeni międzyziarnowych. Sytuację tę zaprezentowano na rysunku 1. Ze względu na to, że stosu-

nek wodno-spoiwowy jest zdefiniowany jako $\omega < \omega_n$, rozważany jest zaczyn, który posłuży do wykonania BWW.

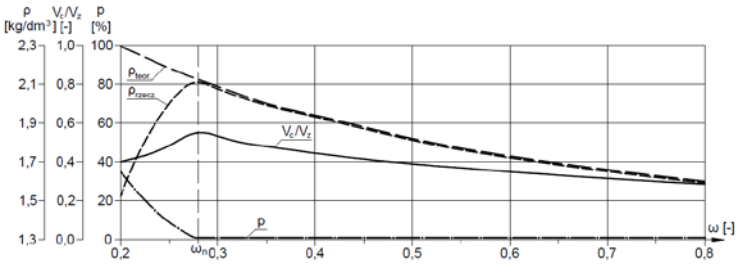


Rys. 1. Struktura ziaren cementu przy $\omega < \omega_n$, gdzie ω oznacza stosunek wodno-spoiwowy, a ω_n – wodożądność normową spoiwa (stosunek wodno-spoiwowy, przy którym zaczyn ma konsystencję normową badaną aparatem Vicata) [opracowane na podstawie [Mrozik 2012]]

Ze względu na niedobór fazy ciekłej, w sytuacji przedstawionej na rysunku 1 dochodzi do występowania niezhydratyzowanych ziaren cementu. Jak stwierdzono w literaturze przedmiotu [Aïtcin 2000 i inni], cement, który nie uległ hydratacji, nie wpływa szkodliwie na wytrzymałość, bowiem wśród zaczynów cementowych o stosunku żelu do objętości równym 1,0 większą wytrzymałością charakteryzują się zaczyny o wyższej zawartości cementu niezhydratyzowanego (tj. o niższym stosunku wodno-spoiwowym). Istnienie takich niezhydratyzowanych ziaren cementu, w betonach o niskich stosunku wodno-spoiwowym, okazuje się zatem zjawiskiem korzystnym, gdyż umożliwia samoleczenie betonu w obliczu mikrodefektów. Wówczas powstała rysa (pod wpływem wody) wypełniana jest produktami hydratacji. Ponadto nakreślone na rysunku 1 wolne przestrzenie między porami wpływają na obniżenie oczekiwanej wytrzymałości BWW. Determinuje to również zmniejszenie gęstości pozornej zaczynu, wyrażającej stosunek masy do objętości, wraz z zawartymi w spoiwie (cemencie) pustkami powietrznymi. Obniżenie wytrzymałości spowodowane obniżeniem gęstości pozornej zaczynu przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Ze względu na to, że stosunek wodno-spoiwowy jest zdefiniowany jako $\omega < \omega_n$, rozważany jest zaczyn, który posłuży do wykonania BWW. Na rysunku 2, zgodnie ze źródłem literaturowym [Jasiczak 2008], nie podano mian na osiach pionowych i poziomych, aby zachować uniwersalność rysunku, bowiem przedstawione trzy krzywe pochodzące od betonu wibrowanego, całkowicie zagęszczonego oraz ręcznie zagęszczonego, odnoszą się do wysokowartościowego betonu jednej klasy.



Rys. 2. Obniżenie wytrzymałości spowodowanie niedostatecznym zagęszczeniem mieszanki betonowej [Jasiczak 2008]; na osi pionowej zaprezentowano wytrzymałość na ściskanie, a na poziomej stosunek wodno-spoiwowy ω

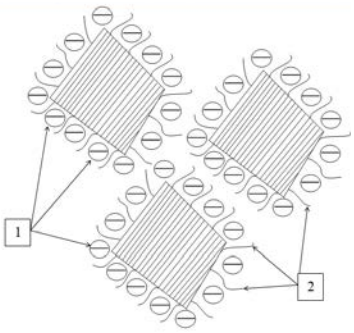


V_c – objętość cementu, dm^3,
V_z – objętość zaczynu cementowego, dm^3,
ρ – gęstość zaczynu cementowego, $kg \cdot dm^{-3}$,
$\rho_{teor.}$ – gęstość teoretyczna zaczynu cementowego, $kg \cdot dm^{-3}$,
$\rho_{rzecz.}$ – gęstość rzeczywista zaczynu cementowego, $kg \cdot dm^{-3}$,
ω – stosunek wodno-spoiwowy,
ω_n – wodożądność normowa spoiwa,
p – porowatość zaczynu, %.

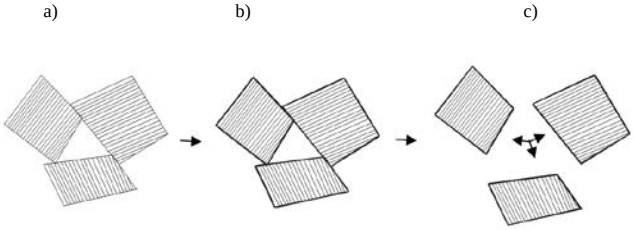
Rys. 3. Graficzna interpretacja zestawienia parametrów struktury zaczynu cementowego [Mrozik 2012]

Produkcja BWW wiąże się ze stosowaniem cementów wysokich klas (np. CEM I 42,5R; CEM II/B-S 42,5N CEM III/A 32,5N- LH/HSR/NA [Grupa Górażdże 2015]), mikrowypełniaczy (np. mikrokrzemionka [Jasiczak 2008]), domieszek chemicznych w postaci superlastyfikatorów (np. modyfikowane lignosulfoniany [Deja 2008]) oraz specjalnych metod zagęszczania (np. wibroprasowanie, odwadnianie próżniowe [Jasiczak 2008]). Poza starannym doborem składników, dążąc do uzyskania wysokiej wytrzymałości na ściskanie, należy również osiągnąć jak największy (na miarę dostępnej technologii) stopień zagęszczenia mieszanki, minimalizując w ten sposób porowatość betonu i jednocześnie poprawiając właściwości strefy przejściowej kruszywo – zaczyn. Konieczne jest więc stosowanie specjalnych metod zagęszczania mieszanki betonowej w celu usunięcia jak największej ilości niechcianego powietrza. Wymienić tutaj można: wibroprasowanie, prasowanie, wirowanie, odwadnianie próżniowe. Domieszki nato-

miast wprowadza się w celu modyfikacji cech technologicznych mieszanki betonowej lub zaprawy, a także zaczynu [Łukowski 2008 i in.]. Domieszkę określa się jako produkt chemiczny dodawany w relatywnie niewielkich ilościach (maksymalnie 5%) w porównaniu z masą cementu. Udział objętościowy tego składnika jest więc tak mały, iż uznawany za pomijalny przy ogólnym bilansie objętościowym elementów mieszanki betonowej. W ogólności cel stosowania domieszek stanowi uzyskanie pożądanych modyfikacji, stanowiących ulepszenie, parametrów mieszanki betonowej i/lub stwardniałego betonu [Jasiczak 2008]. Superplastyfikatory (domieszki upłynniające) umożliwiają osiągnięcie ciekłej konsystencji mieszanki, przy wykorzystaniu ilości wody zaborowej zbliżonej do tej, która wynika zminimum niezbędnego do pełnej hydratacji cementu. Poprawiają one urabialność mieszanki betonowej przy stałym stosunku wodno-spoiwowym lub pozwalają na zmniejszenie stosunku wodno-spoiwowego przy stałej urabialności. Cząsteczki superplastyfikatora ulegają adsorpcji na ziarnach cementu, nadając im jednoimienny ładunek elektryczny, co powoduje ich dyspersję w wyniku odpychania coulombowskiego. Tym samym neutralizują one działanie występujących na cząsteczkach cementu różnoimiennych ładunków powodujących ich agregację [Kurdowski 2010]. Zachodzi tzw. efekt steryczny (współdziałający z elektrostatycznym, który został przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Współdziałanie mechanizmów: 1) elektrostatycznego i 2) sterycznego [Stryczek 2011]



Rys. 5. Mechanizm smarny; a) zaglomerowane ziarna cementu, b) ziarna cementu pokryte warstewkami smarnymi, c) rozproszone ziarna cementu [Stryczek 2011]

Jednocześnie tworzona jest bardzo cienka (jednomolekularna) warstwa „smarująca” (rys. 5), ułatwiająca wzajemny poślizg stałych cząstek mieszanki, co umożliwia obniżenie tarcia wewnętrznego. Woda wykorzystywana w tym procesie ma obniżone napięcie powierzchniowe. Poprzez wyżej opisany proces mieszanka betonowa uzyskuje ciekłą konsystencję przy lepszym wykorzystaniu cementu. Domieszki upłynniające ma-

ją jednak ograniczoną efektywność, co nie zostało w literaturze przedmiotu w sposób ilościowy określone.

Przedstawiając aktualny stan wiedzy na temat modelowania struktury betonu, należyniecoprzybliżyćwybranepodejściadoanalizytegokompozytu. Pierwszym podejściem jest stosowanie analityczno-doświadczalnych i doświadczalnych metod projektowania składu mieszanki betonowej. Wykorzystuje się tutaj empiryczne zależności pomiędzy składem ilościowym (i niekiedy jakościowym) a takimi cechami, jak wytrzymałość czy konsystencja. Metody te pozwalają zaprojektować beton o zadanych cechach, lecz nie umożliwiają prowadzenia analizy i optymalizacji przestrzennej konfiguracji składników, jak również nie dają możliwości prognozowania zachowania tego kompozytu w konstrukcji (bądź próbce) pod obciążeniem. Drugim podejściem jest modelowanie struktury betonu polegające na budowie układów modelowych, których parametry są dobierane w sposób możliwie najlepiej opisujący ośrodek rzeczywisty. Metody te nadają się szczególnie do adaptacji komputerowej. Wyróżnić można dwa przykłady, tj. klasyczny model struktury Reniusa oraz jeden z bardziej zaawansowanych modeli opracowany przez Zublewicza [Zublewicz 1983]. Modele te pozwalają określić sposób zachowania się kompozytu w konstrukcji pod obciążeniem (m.in. jego odkształcenie, mechanizm zniszczenia), a ponadto umożliwiają również zaprojektowanie składu mieszanki betonowej. Występuje jednak szereg problemów, z których najważniejszym jest utrudnione wykorzystanie takich parametrów, jak: klasa cementu, stosunek wodno-spoiwowy czy uziarnienie kruszywa. W pierwszym etapie należy bowiem dokonać sformułowania zależności (zwykle empirycznych) pomiędzy powyższymi parametrami a parametrami modelu mechanicznego. Wymaga to czasochłonnej analizy i badań eksperymentalnych [Aïtcin 2000]. Metody komputerowe mogą opierać się również na klasycznych równaniach służących do projektowania mieszanki betonowej. Biorąc pod uwagę powyższą ogólną charakterystykę, do komputerowych metod stosowanych w projektowaniu składu betonu można zaliczyć: metody będące komputerową adaptacją metod klasycznych oraz metody bazujące na mechanicznych modelach betonu. Należy podkreślić, że liczna grupa modeli mechanicznych betonu nie uwzględnia dostatecznie dobrze niejednorodnej struktury tego kompozytu, traktując go jako ośrodek quasi-jednorodny. Bazują one na wynikach obserwacji doświadczalnych, pozwalających na budowę zazwyczaj złożonych modeli, których matematyczny opis jest uogólnieniem wyniku poznania w granicach obszaru obserwacji [Majewski 2003]. Charakteryzując tę grupę można stwierdzić, że opracowywane na przestrzeni lat modele pozwalają z dobrą zgodnością opisać pracę betonu i żelbetu w elementach konstrukcyjnych. Brak uwzględnienia faktycznej niejednorodności struktury, wynikającej m.in. z obecności kruszywa i pustek powietrznych na poziomie makroskopowym oraz zróżnicowania struktury krystalicznej, uniemożliwia jednak bezpośrednie wykorzystanie tych modeli do projektowania jakościowego i ilościowego mieszanki betonowej. Z kolei modele fizykochemiczne opisujące przemiany zachodzące w zaczynie cementowym nie pozwalają na projektowanie składu mieszanki betonowej oraz opisanie zachowania się tego kompozytu w konstrukcji. Stwarzają one jednak możliwość analizy i wyjaśnienia procesów i zjawisk wpływających na strukturę betonu dojrzałego.

Z powodu dużej różnorodności składników współczesnych kompozytów cementowych, wykorzystywanych jednocześnie i w różnych ilościach, związki między tymi składnikami a właściwościami mechanicznymimateriałów wykraczać mogą poza możliwości prostego opisu inżynierskiego. Modele opisujące właściwości materiałów, zapisane w formie empirycznej, korzystają ze znanych powszechnie zależności matema-

tycznych obarczonych niekiedy dużymi uproszczeniami. Na przykład: analizując wpływ dodatków popiołowych na wytrzymałość czy trwałość betonu pomija się na ogół wpływ zmiennej konsystencji mieszanki lub zmiennej zawartości domieszek uplastyczniających, przyjmując, że jest pomijalnie mały [Marks 2010]. Zagadnienie wyznaczania parametrów betonu komplikuje się w przypadku mnogości parametrów jego składu (różnych właściwości cementu i jego zawartości, różnych właściwości i zawartości domieszek chemicznych, włókien, ziaren kruszywa), warunków wykonania i pielęgnacji, a także agresywnych oddziaływań środowiskowych. Sformułowanie modelu empirycznego w takiej wielowymiarowej przestrzeni parametrów składu i właściwości kompozytu może okazać się zbyt skomplikowane. W takiej sytuacji do obiektywnego rozpoznania związków między składem a właściwościami kompozytu można wykorzystać metody komputerowe, zwane niekiedy metodami sztucznej inteligencji [Marks 2010]. Zaletą wykorzystania technik komputerowych w postaci sztucznych sieci neuronowych do rozwiązania tak postawionego problemu jest to, że nie ma konieczności wyprowadzania jawnych zależności matematycznych, bowiem sieci w procesie uczenia przypisują kolejnym zmiennym adekwatne wagi, dążąc do podanego im wzorca (wykreowanego w procesie badań empirycznych). Zagadnienie takie jest rozpatrywane w ramach rozprawy doktorskiej. W tym celu prowadzone są badania betonów o niskich stosunkach wodno-spoiwowych. Wyniki badań eksperymentalnych, obejmujące 870 próbek, zostaną wykorzystane do symulacji za pomocą sztucznych sieci neuronowych.

4. PODSUMOWANIE

W przypadku betonów zwykłych wystarczająco dokładne okazują tradycyjne metody projektowania składu mieszanki. W przypadku betonów o niskim stosunku wodno-spoiwowym występują dodatkowe problemy: znaczny spadek urabialności, wprowadzenie dużej ilości niechcianego powietrza. Istnieje wiele dodatkowych zmiennych, których zwyczajowo nie bierze się pod uwagę podczas procesu projektowania. Na przykład pomija się na ogół wpływ zmiennej konsystencji mieszanki lub zmiennej zawartości domieszek uplastyczniających, przyjmując zwyczajowo, że jest pomijalnie mały. Należy zaznaczyć, że badania eksperymentalne znacznie wyprzedziły rozważania teoretyczne. Praktyczne spostrzeżenia są niezwykle ważne, jednak pełne zrozumienie istoty procesu kształtowania struktury wymaga wnikliwej analizy teoretycznej tego problemu. Z tego względu należy podkreślić wyższość metod analityczno-doświadczalnych nad doświadczalnymi. Kalibracja modeli teoretycznych jest niezbędna przy każdorazowej zmianie parametrów wejściowych,jak również wprowadzeniu nowych zmiennych. Proces ten wymaga przeprowadzenia niezbędnych badań laboratoryjnych próbnych serii betonów. Te czynności badawcze wymagają najczęściej określonych nakładów czasowych i finansowych, co może zostać ograniczone dzięki zastosowaniu metod sztucznej inteligencji.

LITERATURA

Acalski P., Grzybowska A., Piekarski P., Mrozik M., 2015. Wybrane problemy nowoczesnej technologii betonu. Materiały Budowlane 5, 73-74.

Aïtcin P.C., 1998. Modern concrete technology 5: High performance concrete. E&FN SPON London.

Aïtcin P.C., 2000. Trwały wysokowartościowy beton – sztuka i wiedza. Konferencja Beton na progu nowego milenium. Wydawnictwo Polski Cement Kraków.

Aïtcin P.C., 2014. The problems with high strenght and low w/c ratio concretes. Cement Wapno Beton 2, 127-137.

Ajdukiewicz A., Mames J., 2008. Konstrukcje z betonu sprężonego. Wydawnictwo Polski Cement Kraków.

AppaRao G., 2001. Role of water-binder ratio on the strength development in mortarsincorporated with silicafume. Cement and Concrete Research 31(3), 443-447.

Bentz D.P., Contway J.T., 2001.Comuter modeling of thrreplacement of "coarse" cement particles by in inert fillers in low w/c ratio concretes. Cement and ConcreteResearch 31, 503-506.

Bhanja S., Senguptab B., 2003. Modified water-cement ratio law for silica fume concretes. Cement and Concrete Research 33(03), 447-450.

Chen H., Wyrzykowski M., Scrivener K., Lura P., 2013. Prediction of self-desiccation in low water- to-cement ratio pastes based on pore structure evolution. Cement and Conctere Research 49, 38-47.

Czarnecki L., 2003. Domieszki do betonu. Budownicwo, Technologie, Architektura, Zeszyt specjalny: Domieszki do betonu 2003, 4-6.

Czarnecki L., Kurdowski W., 2007. Tendencje kształtujące przyszłość betonu. Budownicwo, Technologie, Architektura 1, 50-55.

Deja J., Kijowski P., 2002. ABC Betonu. Wydawnictwo Polski Cement Kraków.

Freidin C., 2007. Cementless pressed blocks from waste products of coalfiringpowerstation. Cement and Concrete Research 21(1), 12-18.

GrupaGórażdże, 2015. Cement, kruszywa, beton – rodzaje, właściwości, zastosowanie. Poradnik przygotowany pod kierunkiem: Z. Giergicznego, Wydawnictwo Grupa Górażdże.

Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T., 2008. Betony ultrawysokowartościowe. Właściwości, technologie, zastosowania. Stowarzyszenie Producentów Cementu Kraków.

Kolias S., Georgiou C., 2005. The effect of pastevolume and watercontent on the strenght and waterabsorption of concrete. Cement and Concrete Composites 27, 211-216.

Kotwica Ł., 2005. Podwójna warstwa elektryczna i jej znaczenie w chemii tworzyw cementowych. Materiały ceramiczne 57, 97-94.

Kurdowski W., 2010. Chemia cementu i betonu. Wyd. Polski Cement Kraków, Wyd. Nauk. PWN Warszawa.

Kurdowski W., Szeląg H., Bochenek A., 2013. Czynniki wpływające na odporność betonu na działanie mrozu. XXVI Konferencja Awarie Budowlane 2013, Szczecin.

Łukowski P., 2008 Domieszki do zapraw i betonów. Stowarzyszenie Producentów Cementu Kraków.

Majewski S., 2003. Mechanika betonu konstrukcyjnego w ujęciu sprężysto-plastycznym. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice.

Marks M., 2010. Wykorzystanie metod uczenia maszynowego do rozpoznania związków między składem betonu modyfikowanego dodatkami popiołowymi a jego właściwościami. Drogi i Mosty 3, 39-54.

Mrozik Ł., 2012. Model struktury i wytrzymałość betonu wysokowartościowego. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, rozprawa doktorska.

Mrozik Ł., Kaczmarek A., Doering M., Gajewski J., 2014. Defekty wibroprasowanych elementów betonowych. Materiały budowlane 12, 42-44.

Neville A.M., 2012. Właściwości betonu. Stowarzyszenie Producentów Cementu Kraków.

Rahman M., Hakansson U., Wiklund J., 2015. In-line rheological measurments of cement grouts: Effects of water/cement ratio and hydration. Tunnelling and Underground Space Technology 22, 1087-1095.

Stryczek S., 2011. Wpływ superplastyfikatorów na właściwości reologiczne zaczynów cementowych. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne 6, 60-62.

Śliwiński J., 1999. Beton zwykły. Projektowanie i podstawowe właściwości. Wydawnictwo Polski Cement Kraków.

Śliwiński J., 2003. Zasady projektowania składu betonów wysokowartościowych. Cement Wapno Beton 6, 317-325.

Świtoński A., 2004. Struktura i wytrzymałość betonów wysokowartościowych. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Koszalińskiej.

Zivica V., 2009. Effects of the verylowwater/cement ratio. Construction and Building Materials 29, 573-580.

Zhou J., Ge L., 2015. Effect of strain rate and water to cement ratio on compressive mechanical behavior of cement mortar. Journal of Central South University 22, 1087-1095.

Zubelewicz A., 1983. Propozycja nowego modelu strukturalnego betonu. Archiwum Inżynierii Lądowej 29(4).