

# CEMENTY CSA

oparte na siarczanoglinianach wapnia



**mgr inż. Roman Zimka**  
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Stanisława Pigionia w Krośnie  
**mgr inż. Dariusz Hajto**  
**mgr inż. Karol Marcinkiewicz**  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Betony wykonywane z cementu CSA, osiągające wysoką wczesną wytrzymałość, posiadają duży potencjał do wykorzystania zarówno w pracach remontowych, jak i przy wznoszeniu nowych obiektów w niezwykle szybkim tempie i przy obecnie nieosiągalnym, niskim nakładzie robocizny.

Pierwsze prace nad wykorzystaniem reakcji powstawania ettringitu do produkcji cementów ekspansywnych były prowadzone w latach 30. ubiegłego wieku. W 1966 r. w Stanach Zjednoczonych Klein opatentował technologię wytwarzania betonu opartego na zmieszaniu cementu portlandzkiego z cementem ekspansywnym bazującym na siarczanoglinianie wapnia.

W początkowej fazie po zarobieniu odpowiednią ilością wody w cemencie CSA następuje szybka reakcja między siarczanoglinianem wapnia, gipsem i wodorotlenkiem wapnia, w której efekcie powstaje ettringit, minerał pozwalający osiągnąć dużą wczesną wytrzymałość betonu.

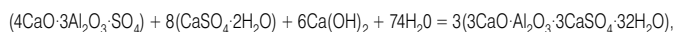
## Charakterystyka cementu opartego na CSA

Cement CSA jest mineralnym spoiwem hydraulicznym cechującym się: małym skurczem, wysoką wytrzymałością wczesną oraz odpornością na siarczany. Głównymi składnikami cementu CSA jest bezwodnik siarczanoglinianu wapnia ( $4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4$ ) odpowiadający za wczesny przyrost wytrzymałości, krzemian dwuwapniowy (belit) ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), dzięki któremu beton po 28 dniach uzyskuje znaczną wytrzymałość, oraz gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Cementy CSA wypala się w temperaturze  $1250^\circ\text{C}$ , co w znacznym stopniu zmniejsza zużycie energii podczas jego produkcji [14]. Otrzyma-

ny klinkier CSA jest bardziej miękki niż klinkier cementu portlandzkiego i wobec tego jego mielenie wymaga mniejszego nakładu energii.

Reakcja tworzenia ettringitu przebiega podczas procesu twardnienia według uproszczonego schematu:



powodując końcową ekspansję objętości surowców początkowych [7].

W przypadku małego nasycenia siarczanami w wyniku reakcji powstaje monosiarczan glinianu wapnia ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) o znacznie mniejszej ekspansji. Struktury obu związków są podobne, dlatego bardzo trudno jest je rozróżnić [2].

Prace badawcze z różnymi proporcjami w trójkącie materiałów: siarczanoglinian wapnia ( $4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4$ ), gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) i krzemian dwuwapniowy ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) wyodrębniły proporcje mieszanek dla cementów szybkotwardniejących, ekspansywnych i słabo ekspansywnych. Jak można prześledzić na rys. 1, przy użyciu proporcjonalnie mniejszej ilości gipsu uzyskujemy cementy szybkowiązące [2].

## Właściwości dostępnych cementów CSA

Skład chemiczny głównych składników cementów szybkowiązących opartych na CSA, a produkowanych przez różne firmy pokazano w tabeli 1.

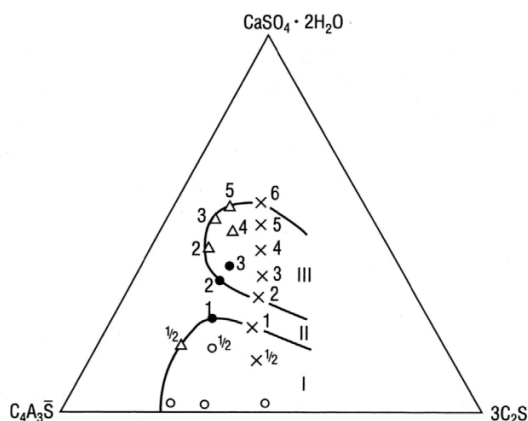
Wapno w CSA jest silnie związane, stąd beton ma zasadowość zwykle w przedziale 10,5 pH do 11 pH [13,14,16], dostępny jest na rynku cement, którego pH wynosi 12 [12].

Beton CSA ma dużą odporność na zamarzanie, przekraczającą 200 cykli. Wynika to z faktu dużej szczelności, gdyż pod ciśnieniem  $30\text{kg}/\text{cm}^2$  nie stwierdzono przepuszczalności. Z tego też względu beton CSA posiada odporność na kontakty z solami magnezu i chlorku sodowego [16]. Beton z CSA nie jest za to odporny na działanie kwasów i wysokich temperatur przekraczających  $150^\circ\text{C}$ .

Cementy CSA na świecie są produkowane w sześciu klasach (42,5; 52,5; 62,5; 72,5; 82,5 i 92,5), które oznaczają wytrzymałość na ściskanie osiąganą w ciągu siedmiu dni.

Skład kruszywa dobierany jest na podobnych zasadach jak przy betonach zwykłych, zalecana minimalna ilość cementu to  $300\text{kg}/\text{m}^3$  mieszanki betonowej [16]. Przygotowanie i układanie betonu na bazie cementu CSA powinno przebiegać w temperaturze zewnętrznej od  $7^\circ\text{C}$  do  $32^\circ\text{C}$ . W temperaturze  $20^\circ\text{C}$  początek wiązania rozpoczyna się po 15 min [12] lub 25 min [16].

Rozwój wytrzymałości w czasie dla CSA Rapid pokazano w tabeli 2.



Rys. 1. Wpływ cech trzech głównych faz na właściwości cementów:  
I – pole cementów szybkotwardniejących  
II – pole cementów słabo ekspansywnych  
III – pole cementów ekspansywnych

Tab. 1. Skład chemiczny cementów CSA produkowanych przez różnych producentów, opracowanie na podstawie [12,14,15,16]

Składnik	Zawartość %
CaO	40–50
SiO <sub>2</sub>	5–10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15–25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1–5
SO <sub>3</sub>	15–25
MgO	0,5–3,5

Tab. 2. Rozwój wytrzymałości betonu na bazie cementu CSA Rapid – opracowanie na podstawie [12]

Czas od zarobienia cementu z wodą	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1 dzień	20,0
2 dni	40,0
7 dni	48,0
28 dni	62,0

Stwierdzono, że po kolejnych sześciu latach wytrzymałość zwiększa się jeszcze o 30%. Proporcja wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie kształtuje się podobnie jak w cementach portlandzkich. Wytrzymałość na rozciąganie po siedmiu dniach wynosi 4,1 MPa, a wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu 5 MPa [16].

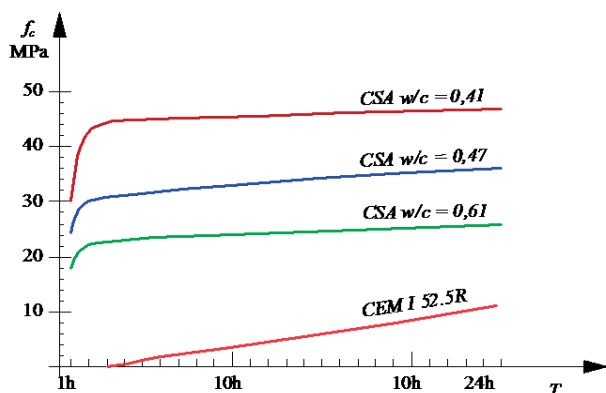
### Badanie wczesnej wytrzymałości na ściskanie betonu z CSA

Do badania zastosowano gotową mieszankę z cementem szybkowiążącym CSA, produkowaną przez firmę Korodur z cementu CSA firmy Rapid. Producent w informacji wskazał, że do 25 kg suchej mieszanki można dodawać wodę o objętości od 3,0 l do 4,5 l.

Przedmiotem sprawdzenia była wytrzymałość na ściskanie betonu  $f_c$  ze względu na wartość zastosowanego wskaźnika wody do cementu. Wykonano 30 próbek po pięć sztuk, dla każdej objętości dodawanej wody, w litrach na 25 kg suchej mieszanki w zakresie od 2,5 do 5,0. Wartości te odpowiadają wartościom w/c w zakresie od 0,34 do 0,68 (tab. 3). Temperatura wody, mieszanki suchych składników oraz otoczenia wynosiła 20°C. Po ułożeniu mieszanki w formach o wymiarach w mm 100x100x100 umieszczono w pojemniku termoizolacyjnym. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po godzinach: jednej, dwóch i 24 od chwili zarobienia mieszanki wodą. Wyniki badań ujęto w tab. 3 i na rysunku 2.

Tab. 3. Wytrzymałości  $f_{c60}$  – średnie na ściskanie betonu z CSA po jednej godzinie dojrzewania, dla wybranych wartości wskaźnika w/c

Ilość wody, l/25kg suchej mieszanki	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Wskaźnik w/c, -	0,34	0,41	0,47	0,54	0,61	0,68
Wytrzymałość na ściskanie						
(średnia dla 3 próbek) $f_{c60}$ , MPa	38,4	30,1	24,5	22,8	18,1	16,7
odchylenie standardowe s, MPa	4,60	1,20	0,70	0,96	0,50	0,64



Rys. 2. Wytrzymałości na ściskanie betonu z CSA Rapid dla wybranych wartości wskaźnika w/c i porównanie z wytrzymałością na ściskanie dla cementu CEM I 52,5R

Wręcz ze zwiększaniem ilości dodawanej wody, w przedziale wskazanym przez producenta, tj. przy wartościach w/c od 0,41 do 0,61, po jednej godzinie od zarobienia składników wodą średnie wytrzymałości betonu na ściskanie  $f_{c60}$  wynosiły odpowiednio od 30,1 MPa do 18,1 MPa

(zmniejszenie o 40%) oraz po dwóch godzinach wytrzymałości  $f_{c120}$  wynosiły od 36,8 MPa do 22,4 MPa (zmniejszenie o 39%), natomiast po 24 godzinach wartości  $f_{c24h}$  osiągnęły od 46,3 MPa do 25,9 MPa (zmniejszenie o 44%). Badania przeprowadzono również po dwóch i 24 godzinach, oznaczając wytrzymałości,  $f_{c120}$ ,  $f_{c24h}$ . Wyniki przedstawiono na rysunku 2. Dla porównania pokazano także odpowiednie wartości dla próbek kontrolnych wykonanych z betonu z zastosowaniem cementu CEM I klasy 52,5R o wskaźniku w/c wynoszącym 0,5.

Przy stosowaniu w/c z zalecanego przedziału przez producenta konsystencja mieszanki umożliwiała bezproblemowe układanie i zagęszczanie. Jednakże, przy w/c wynoszącym 0,41 układanie i zagęszczanie było wyraźnie trudniejsze, skutkujące nieco większą wartością odchylenia standardowego,  $s = 1,2$ , niż przy dozowaniu większej ilości wody. Mieszanki z jeszcze większymi ilościami wody, o w/c  $\geq 0,54$ , po zarobieniu z mocno widocznym nadmiarem wody, przy niewystępowaniu syden-tacji składników, były bardzo łatwe w układaniu i zagęszczaniu. Mieszanka z w/c = 0,34 (o 0,5 l wody mniej niż zalecenie producenta) już była bardzo trudna do ułożenia i zagęszczenia przy równoczesnym występowaniu dużych rozrzutów wyników, odchylenie standardowe wzrosło do  $s = 4,6$  (wynik nieumieszczony na wykresie).

Jak można odczytać z załączonego wykresu, wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego z cementu portlandzkiego jest nawet po 24 godzinach dużo mniejsza niż betonu wykonanego z cementu CSA. Potwierdza to dużą przydatność cementu opartego na siarczanoglinianie wapna CSA do wykonywania wszelkich prac wymagających uzyskania dużej wytrzymałości wczesnej na ściskanie. Największy przyrost wytrzymałości jest osiągany w pierwszej godzinie. W drugiej godzinie przyrost wytrzymałości spada. W ciągu następnych godzin przyrost się stabilizuje podobnie jak w cemencie portlandzkim.

### Aspekty praktyczne zastosowania betonów na bazie cementów CSA

Jeśli porównać wartości pH betonu z cementem CSA do betonu opartego na cemencie portlandzkim (pH 13), wartość ta jest niższa. W początkowym okresie może powodować, że na powierzchni stali mogą się pojawiać ślady korozji, jednakże obserwacje prętów stalowych w dłuższym okresie nie potwierdziły dalszego rozwoju korozji. Powstający na powierzchni dwutlenek żelaza wchodzi w reakcję z siarczanami tak jak gliny, tworząc warstwę ochronną, co z kolei w połączeniu z większą szczelnością prowadzi do wyeliminowania zjawiska korozji [16]. Jedną z konsekwencji większej szczelności jest wysoka mrozoodporność.

Zalecana proporcja dodanej wody do cementu w/c powinna zawierać się w przedziale  $0,41 \div 0,61$  [18] ( $0,36 \div 0,65$  wg [16]), co znajduje odzwierciedlenie w zaleceniach producentów produkujących suche mieszanki betonowe na bazie cementu CSA.

Mieszanki betonowej na bazie tego cementu po ułożeniu i rozpoczęciu wiązania nie wolno wibrować. Odstoniętą powierzchnię należy przykryć folią lub prowadzić pielęgnację wodą do dwóch godzin. W morskich obszarach pływowych beton lub zaprawa z cementu CSA może być zainicjowana bezpośrednio w wodzie morskiej bez wpływu na jej jakość. Zainicjowanie w wodzie morskiej poprawia jej długotrwale wytrzymałość. Jest to szczególnie przydatne do stosowania na morskich nabrzeżach, gdzie praca może być wykonana w czasie odpływu.

Z uwagi na szybko następujący proces wiązania wynoszący nawet 15 min stosuje się jako opóźniacz kwas cytrynowy. Pozwala to wydłużyć do 30 min lub o jeszcze więcej [20] rozpoczęcie wiązania. W początkowym okresie nawodnienia następuje rozwój 80% ettringitu jeszcze przed fazą hydratacji i dlatego cementy CSA nie wykazują silnej ekspansji i można je zakwalifikować jako beton bezskurczowy (po 28 dniach skurcz w środowisku suchym wynosi około 0,2 mm/m, a w środowisku mokrym wykazuje pęcznienie ok. 0,1 mm/m). Do pełnego nawodnienia niezbędne jest natomiast uzyskanie minimalnej proporcji wody do cementu w/c powyżej 0,36 [15].

Na podstawie przeprowadzonych badań beton zawierający cement CSA już po godzinie od zmieszania z wodą może osiągnąć wytrzymałość 20 MPa, a pełną wytrzymałość gwarantowaną przez producenta

# Główne zastosowanie betonów opartych na cemencie CSA:

- naprawa i konserwacja dróg, mostów, wiaduktów, pasów startowych, kiedy konieczne jest szybkie wznowienie ruchu,
- posadzki samopoziomujące o dużej wczesnej wytrzymałości,
- produkcja prefabrykatów wymagających szybkiego wyjęcia z formy,
- wykonywanie kanałów, rur, zbiorników wymagających wysokiej odporności na siarczany i niskiej przepuszczalności,
- wykonywanie stuków, tynków dekoracyjnych, zapraw i betonów do wtryskiwania i torkretowania,
- wykonywanie betonu szybkoztwardniejącego w niskiej temperaturze.

osiąga w ciągu siedmiu dni. W dalszym okresie, podobnie jak w przypadku cementów portlandzkich, wytrzymałość ciągle wzrasta.

Główne zastosowanie betonów opartych na cemencie CSA to związane z opisanymi wcześniej właściwościami:

- naprawa i konserwacja dróg, mostów, wiaduktów, pasów startowych, kiedy konieczne jest szybkie wznowienie ruchu,
- posadzki samopoziomujące o dużej wczesnej wytrzymałości,
- produkcja prefabrykatów wymagających szybkiego wyjęcia z formy,
- wykonywanie kanałów, rur, zbiorników wymagających wysokiej odporności na siarczany i niskiej przepuszczalności,
- wykonywanie stuków, tynków dekoracyjnych, zapraw i betonów do wtryskiwania i torkretowania,
- wykonywanie szybkoztwardniejącego betonu w niskiej temperaturze.

Występujący na ogół już po kilkunastu minutach początek wiązania cementu CSA wymaga niestandardowego wykonawstwa prac betoniariskich. Cementy CSA wymagają dużego doświadczenia wykonawczego, gdyż wszystkie operacje technologiczne należy wykonać w bardzo krótkim czasie określonym rozpoczęciem procesu wiązania.

Miejsce układania mieszanki powinno zastać wcześniej odpowiednio przygotowane. W przypadku wykonywania napraw konstrukcji zaleca się usunięcie przez groszkowanie słabych fragmentów. Bezpośrednio przed aplikacją powierzchnia powinna być zwilżona wodą do stanu matowo-wilgotnego. W przypadku materiałów bardzo suchych lub o wysokiej chłonności czynności te trzeba kilkakrotnie powtórzyć, ponieważ może to w sposób istotny zmniejszyć przyczepność.

Przy stosowaniu produktów bazujących na cemencie CSA nie zaleca się wykonywania warstwy szczepnej, ponieważ jej funkcję pełni penetrujący odpowiednio przygotowane podłoże ettringit stanowiący produkt hydratacji. Dlatego powierzchnia mająca kontakt z mieszanką betonową powinna być czysta i nie zawierać materiałów, które mogą hamować wiązanie, takie jak ropa naftowa, asfalt, kwas i inne zabrudzenia.

Szczególny problem techniczny wykonawstwa konstrukcji z betonu z cementu na bazie CSA jest problemem jego pompowalności. Poza odpowiednim składem mieszanki betonowej istotny jest bardzo wczesny początek wiązania mieszanek z zastosowaniem cementu CSA. Brak informacji w literaturze na temat przypadków pompowania tego typu mieszanek skłonił do przeprowadzenia odpowiednich badań przy współpracy firm Korodur GmbH oraz MAI International GmbH. W tym wypadku konieczne okazało się przeprowadzenie jednocześnie procesu mieszania oraz pompowania. Przeprowadzone badania potwierdziły nieporo-

szanie wytrzymałości na ściskanie po dwóch godzinach oraz po 24 godzinach. Potwierdzona została zatem możliwość pompowania betonu na bazie cementu CSA. Możliwość pompowania mieszanki betonowej pozwala na wznoszenie elementów o znacznych rozmiarach przy zastosowaniu suchych mieszanek betonowych.

Zarabianie suchych składników wodą musi być realizowane w bezpośredniej bliskości miejsca wbudowania. Są one znacznie bardziej wrażliwe na temperaturę, proporcję w/c czy mieszanie. Jeśli prace prowadzi się w temperaturze znacznie przekraczającej 20°C, wiązanie może się zacząć już po kilku minutach.

## Podsumowanie

Betony wykonywane z cementu CSA mają duży potencjał do wykorzystania w pracach remontowych oraz przy wznoszeniu nowych obiektów. Wysoka wczesna wytrzymałość pozwala na prowadzenie remontów obiektów pozostających w ciągłej eksploatacji lub z możliwością krótkiego wyłączenia z użytkowania. Nie bez znaczenia pozostaje tu fakt bardzo niskiego skurczu, gdyż w przypadku wykonywania napraw konstrukcji betonowych można wykonać naprawę jedną warstwą mieszanki zamiast kilkanaście warstwami, które są konieczne w przypadku tradycyjnych zapraw naprawczych.

Wznoszenie nowych obiektów przy pomocy przedmiotowego materiału może się okazać niezwykle szybkie. Beton osiąga wytrzymałość pozwalającą na rozdeskowanie już po kilku godzinach. Pozwala to na szybką rotację deskowań oraz możliwość szybkiego obciążenia wykonywanej konstrukcji. Z uwagi na szybkie tempo prac beton ten wymaga dobrze prowadzonej pielęgnacji ze względu na wilgotność i temperaturę.

Możliwość pompowania oraz zastosowanie coraz powszechniejszej automatyzacji i robotyzacji mogą stanowić milowy krok w rozwoju budownictwa. Obiekty będą mogły być wykonywane w niezwykle szybkim tempie przy obecnie nieosiągalnym, niskim nakładzie robocizny. ■

**Abstract. CSA Cements based on calcium sulfoaluminates.** *CSA cement mixed with calcium sulfoaluminate is the material whose major qualities are connected with chemical reactions between calcium sulfoaluminate, gypsum and calcium hydroxide. Ettringite, which is the product of this reaction, makes an early compressive strength of concrete. Concrete containing cement CSA is characterized by: high resistance to freeze-thaw, high leakproofness and chloride corrosion resistance. This paper includes a result of an early compressive strength tests of concrete with CSA cement and presents benefits of using concrete with CSA cement in building construction.*

## Literatura

- [1] Giergiczyński Z., Malolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J. *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2002.
- [2] Kurdowski W., *Chemia cementu i betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu – Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków-Warszawa 2010.
- [3] Jamroz Z., *Beton i jego technologie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2015.
- [4] Malolepszy J., *Trwałość betonu-cementy z dodatkami mineralnymi*, Konferencja: Beton i zrównoważony rozwój, CEMEX Polska, Sulejówek 2006.
- [5] Neville A.M., *Właściwości betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2012.
- [6] Nocuń-Wczelik W., Konik Z., Stok A., Malolepszy J., *Spoiva o kontrolowanych zmianach objętości do prac naprawczych i uszczelniających*, XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna, Szczecin-Międzyzdroje, 26–29 maja 2009.
- [7] Nocuń-Wczelik W., *Cement. Metody badań. Wybrane kierunki stosowania*, Wydawnictwo AGH, Kraków 2015.
- [8] Rusin Z., *Technologia betonów mrozoodpornych*, Polski Cement, Kraków 2002.
- [9] Szeląg H., *Czynniki determinujące naprężenia powstające w cemencie ekspansyjnym*, praca doktorska, AGH 2008.
- [10] PN-EN 197-1:2012 *Cement Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*.
- [11] PN-EN 206-04:2014 *Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.
- [12] CTS Cement – Rapid Set Construction Cement.
- [13] [www.concretecountertopinstitute.com/csa-cements-rapid-strength-with-a-low-carbon-footprint/](http://www.concretecountertopinstitute.com/csa-cements-rapid-strength-with-a-low-carbon-footprint/), The Concrete Countertop Institute.
- [14] [www.bluey.com](http://www.bluey.com), Bluey CSA Cement. Product Information.
- [15] [www.csa-cement.com](http://www.csa-cement.com), Polar Bear CSA Cement. Product Information.
- [16] [www.csacement.com](http://www.csacement.com), Oreworld Cement Manufactured. Product Information.
- [17] [www.buzziunicemusa.com](http://www.buzziunicemusa.com), Buzzi Unicem CSA Cement. Product Information.
- [18] Korodur International GmbH. Product Information.
- [19] Klein A., *Expansive and shrinkage-compensated cements*, Patent US3,251,701.
- [20] „Raport z badań pompowalności betonu”, praca niepublikowana, Korodur GmbH, MAI International GmbH.