

SiO₂ MIKRODULKIŲ POVEIKIS DUJŲ CEMENTBETONIO, SU MIŠRIA RIŠAMĄJA MEDŽIAGA, STIPRUMINĖMS SAVYBĖMS

Giedrius Balčiūnas¹, Lina Lekūnaitė², Antanas Laukaitis³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: giedrius.balciunas@vgtu.lt;

Santrauka. Autoklavinių aktytųjų betonų (AAC) gamybos metu naudojant tam tikras gamybos atliekas galima pagerinti jo stiprumines savybes. Gamybos atliekos naudojamos pakankamai mažais kiekiais ir jų kaina nėra didelė, todėl galima pagerinti AAC stiprumines savybes pakankamai mažomis išlaidomis.

Šiame darbe tirtas SiO₂ mikrodulkių (SM) poveikis AAC, su mišria rišamąja medžiaga, stipruminėms savybėms. Tirti keturių sudėčių bandiniai: kontrolinis (be SM priedo), su 0,5 % SM, su 1,0 % SM ir su 1,5 % SM. Darbe aprašyta sudėties skaičiavimo bei bandinių formavimo metodika. Pateikti gniuždymo stiprio rezultatai, gauti atlikus gniuždymo stiprio bandymą (buvo gniuždomi 70x70x70 mm bandiniai) presu. Pagal standartą LST 1469, naudojant gautus gniuždymo stiprio rezultatus, pagal empirines lygtis, apskaičiuotos lenkimo stiprio bei tempimo stiprio reikšmės. Gauti eksperimentiniai rezultatai apdoroti programa „STATISTICA“ ir gauta gniuždymo stiprio priklausomybė nuo tankio bei SM priedo kiekio.

Reikšminiai žodžiai: SiO₂ mikrodulkės, stipruminės savybės, aktytasis betonas, dujų cementbetonis.

Išvadas

Autoklavinis aktytasis betonas (AAC) universali statybinė medžiaga, pasižyminti pakankamai geromis tiek stipruminėmis, tiek ir termoizoliacinėmis savybėmis. AAC gniuždymo stipris gali siekti iki 4 MPa. Ši savybė leidžia jį naudoti individualių pastatų statyboje kaip konstrukcinę medžiagą, taip pat AAC tinkamas daugiaaukščių karkasinių pastatų atitvarinėms konstrukcijoms mūryti (Šarka 2008). Dėl uždaroporės struktūros aktytasis betonas taip pat pasižymi pakankamai geromis šiluminėmis savybėmis. Priklausomai nuo tankio šilumos laidumo koeficientas gali kisti nuo 0,080 W/m·K iki 0,26 W/m·K (Gnip *et al.* 1996).

Pagrindinė aktytųjų betonų, kurių gamyboje nenaujami pluoštiniai priedai stipruminė savybė yra gniuždymo stipris, nes kitas savybes pagal jį galima prognozuoti naudojant standartą LST EN 1469. Gniuždymo stiprį galima padidinti naudojant tokius pucolanius priedus, kaip SiO₂ mikrodulkes arba opokos miltelius. Šiame darbe naudotos SiO₂ mikrodulkės. SiO₂ mikrodulkės yra šalutinis silicio arba ferosilicio gamybos produktas (Goberis, Antanovič 2007). Jos gaunamos redukuojant kvarcinį smėlį arba kvarcitą anglimi lankinėje elektros krosnyje 2000°C temperatūroje. Reakcijos metu susidaro lakusis SiO, kuris krosnies dūmtraukyje kondensuojasi ir oksiduojasi, virsdamas amorfinės struktūros SiO₂ mikrodulkėmis (Myhre 2005). SiO₂ mikrodulkės gali būti sutankintos arba nesutankintos. Nesutankintos mikrodulkės turi mažesnį piltinį tankį

200–450 kg/m³ ir dažnai būna grumstuotos. Sutankintųjų SiO₂ mikrodulkių piltinis tankis 500–600 kg/m³ ir jos atrodo kaip laisvai tekančios dulkės. Mikrodulkės sutankinamos oru, kai susidaro sferiniai dulkių aglomeratai (Skripkiūnas *et al.* 2000). SiO₂ mikrodulkės yra ultradispersinės sferos formos vidutinio 0,14 μm dydžio, tačiau jose yra ir nano dydžio dalelių. Azoto adsorbcijos metodu (BET) nustatytas mikrodulkių paviršiaus dydis artimas 20·10³ m²/kg. Dėl tokio didelio savitojo paviršiaus jos yra higroskopiškos (higroskopiškumas – medžiagos geba sugerti ore esančius vandens garus). Įmonė „Elkem“ (didžiausia pasaulyje SiO₂ mikrodulkių gamintoja) nurodo, kad jas saugoti vėdinamoje ir sausoje patalpoje galima neribotai (Goberis, Antanovič 2007). Kadangi SiO₂ mikrodulkės telpa tarp cemento dalelių, jos pagerina cemento granulimetrinę sudėtį, padidina cementinio akmens tankį, santykinai sumažina vandens poreikį, skaičiuojant pagal dispersinės fazės kiekį (Deltuva 1998).

Lietuvos mokslininkų tirti SiO₂ mikrodulkių įmaišymo būdai. Buvo išbandyti keli įmaišymo variantai: permalant cementą su SiO₂ mikrodulkėmis rutuliniame malūne, įmaišant sausas mikrodulkes į cementą, ruošiant SiO₂ mikrodulkių suspensiją vandenyje, o po to malant ją su cementu ir ruošiant SiO₂ mikrodulkių suspensiją plastiklio tirpale ir po to maišant ją su cementu. Nustatyta, kad efektyviausias SiO₂ mikrodulkių įmaišymo būdas yra ruošiant jų suspensiją plastiklio tirpale (Skripkiūnas *et al.* 2000). Pastarasis įmaišymo būdas yra pasirinktas SM įmaišymui į formavimo mišinį.

Žaliavos ir tyrimų metodika

Bandinių formavimui buvo naudojamos žemiau aprašytos žaliavos. Kaip užpildas buvo naudojama UAB „Matuizų dujų silikatas“ maltas smėlis kuris buvo sumaltas rutuliniame malūne. Kadangi sumalus smėlį nebuvo žinomas jo santykinis paviršius, tai ši savybė buvo nustatyta pagal standarte LST EN 196-6:1996 aprašytą oro pralaidumo (Bleino) metodą, tai yra nustačius žinomo oro kiekio perejimo trukmę t per žinomo poringumo smėlio sluoksnį. Smulkumo nustatymui buvo naudojamas Bleino prietaisą.

Gautas smėlio santykinis paviršius $S_{vid} = 1756 \text{ cm}^2/\text{g}$. Tirtas dujų cementbetonis su mišria rišamąja medžiaga, kurią sudaro du komponentai: AB „Akmenės cementas“ portlandcementis CEM I 42,5 R ir AB „Naujasis kalcitas“ orinės kalkės. Skaičiuojant mišinio sudėtį reikia žinoti tikslų kalkių aktyvumą, todėl jis buvo nustatomas pagal standarte EN 459-2:2001 aprašytą metodiką. Kalkės persijojamos per sietą Nr. 63, atsveriamas 1 g bandinys ($\pm 0,1\text{g}$), suberiamas į kolbą, įpilama 150 ml distiliuoto vandens ir kaitinama 5-7 min, kol suspensija užverda. Tirpalas atšaldomas iki 20-30 °C. Įlašinama 2 - 3 lašai indikatoriaus (fenolftaleino) ir titruojama 1N druskos rūgštimi, kol tirpalas tampa bespalvis. Kalkių aktyvumas gautas 87 %.

Kaip dujodaris buvo naudojama aliuminio pudra „Alboschlenk“ DEG 4508/70, kurios savitasis paviršius $18000 \text{ cm}^2/\text{g}$ gryno aliuminio kiekis ne mažesnis kaip 70 %, taip pat, kad formavimo mišinyje geriau pasiskleisėtų SiO_2 mikrodulkės buvo naudojama paviršių aktyvinanti medžiaga „Ultrapore TCO“. Darbe naudotos Kinijoje pagamintos SiO_2 mikrodulkės. Tyrimams naudotų žaliavų cheminė sudėtis pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. Žaliavų cheminė sudėtis

Table 1. Chemical composition of raw materials

Žaliava	Sudėtis, %										Kiti elementai, %
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	R_2O	C	
Portlandcementis	20,76	6,12	3,37	63,50	1,00	1,00	1,00	0,80	-	-	4,15
Kalkės	4,05	2,21	0,88	89,24	2,38	-	-	-	0,37	-	0,87
Smėlis	87,03	3,51	0,71	4,05	0,49	-	-	-	1,40	-	2,79

2 lentelė. Mišinių sudėtys

Table 2. Compositions of mixtures

Mišinio sudėties Nr.	Cemento kiekis, g	Kalkių kiekis, g	Smėlio kiekis, g	Vandens kiekis, g	Al pudros kiekis, g	SiO_2 kiekis, g
1. Kontrolinis (be SM)	146	221	799	630	2,1	0,00
2. Su 0,5 % SiO_2	146	221	795	630	2,1	4,00
3. Su 1,0 % SiO_2	146	221	791	630	2,1	7,99
4. Su 1,5 % SiO_2	146	221	787	630	2,1	11,99

Bandinių sudėtys buvo skaičiuojamos remiantis lietuvių mokslininkų pateikta metodika (Laukaitis 2000), dalį smėlio pakeičiant ultradispersiniu priedu SiO_2 mikrodulkėmis, vandens kietų dalelių santykis (V/C) buvo pasirinktas naudoti vienodas visuose bandiniuose, t. y. 0,54. Buvo formuojami keturių tipų bandiniai, tai yra kontrolinis (be SiO_2 mikrodulkių), 0,5 % smėlio pakeičiant SiO_2 mikrodulkėmis, 1,0 % smėlio pakeičiant SiO_2 mikrodulkėmis ir 1,5 % smėlio pakeičiant SiO_2 mikrodulkėmis. Mišinių sudėtys pateiktos 2 lentelėje. Paskaičiuotus sudėtį buvo ruošiamos žaliavos. Visų pirma laboratorinėmis svarstyklėmis pasveriami reikalingi žaliavų kiekiai, kurie sandariai uždaryti, paliekami 24 valandoms kondicionavimo patalpoje, kur palaikomas temperatūrinis režimas $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ tam, kad susivienodėtų visų žaliavų temperatūra. Suvienodėjus medžiagų temperatūroms buvo ruošiamos Al pudros - vandens bei SiO_2 mikrodulkių - PAM-vandens suspensijos, disperguojant SiO_2 ir Al pudros dalelės ultragarsiniu dispergatoriumi UZDN-2T, kurio dispergavimo dažnis 22 kHz, o galia 480 W. Paruoštos maišymui medžiagos buvo maišomos laboratorinėje 4 litrų talpos maišyklėje, maišoma 400 aps./min. greičiu. Medžiagų maišymo trukmė bei maišymo seka pateikta 3 lentelėje. Išsimačius mišiniui jis pilamas į formas (70x70x70 mm) ir laukiama, kol masė iškils bei sustings, t.y. įgaus pakankamą plastiškąjį stiprį (kiekvienos sudėties suformuota po 8 bandinius). Masei iškilus ir sustingus, plonu metaliniu lynu nupjaunamas kaupis ir bandiniai dedami į 100 litrų talpos autoklavą kietinimui. Autoklave išlaikomas režimas: 5+6+5 h, (5 valandos reikiamai maksimaliai temperatūrai autoklave pasiekti, 6 valandos išlaikomas maksimalus režimas ir 5 valandos ataušti autoklavui) 1,1 MPa (11 atm) slėgyje, 204 °C temperatūroje.

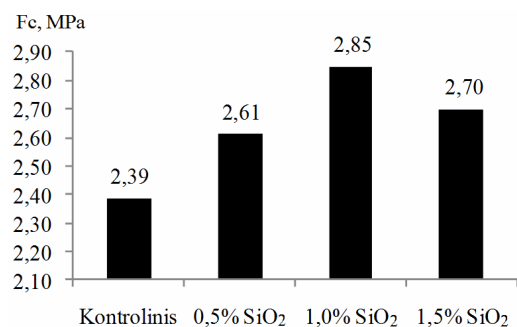
3 lentelė. Komponentų maišymo trukmės

Table 3. Mixing time of components

Komponentai	Maišymo trukmė, min.
1. Vanduo +smėlis	5
2. Vanduo +smėlis +cementas	1
3. Vanduo +smėlis +cementas +kalkės	1
4. Vanduo +smėlis +cementas +kalkės +Al pudra +SiO ₂ mikrodulkės su PAM	1
Viso:	8

Po kietinimo autoklave bandiniai išimami iš formų ir džiovinami elektrinėje krosnyje. Džiovinama 24 val. 105 ±5 °C temperatūroje. Išdžiovinus, išmatavus (0,1 mm tikslumu), pasvėrus (0,1 g tikslumu) bandinius bei apskaičiavus jų tankius buvo atrinkti gniuždymo stiprio nustatymui bandiniai, kurių tankis buvo vienodžiausias. Gniuždymo stiprio nustatymas buvo atliekamas laboratoriniu presu Tinius Olsen H200 KU, gniuždymo greitis 250 N/s. Gniuždomasis stipris apskaičiuojamas ardančiąją jėgą padalinus iš gniuždomo bandinio ploto.

Atlikus gniuždymo stiprio bandymą, gauti rezultatai parodė, jog bandiniai, kurių formavimo mišinyje buvo 1 % smėlio pakeista SiO₂ mikrodulkėmis turėjo didžiausią gniuždymo stiprį (1 paveikslas).



1 pav. Bandinių gniuždymo stipris

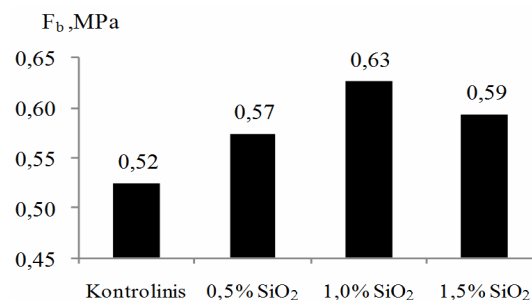
Fig. 1. Compressive strength of samples

Lyginant su kontroliniu bandiniu, bandinio, kurio sudėtyje buvo pakeista 1 % smėlio SiO₂ mikrodulkėmis, gniuždymo stipris padidėjo 19,3 %, atitinkamai su 0,5 % mikrodulkių gniuždymo stipris padidėjo 9,2 %, o su 1,5 % gniuždymo stipris padidėjo 13,0 %. Gniuždymo stiprio padidėjimas gaunamas dėl to, kad SiO₂ mikrodulkės pagerina betono komponavimo sistemą, užpildydamos tarpus tarp stambesnių cemento ir užpildo grūdelių, taip pat smulkios SiO₂ mikrodulkės yra labai aktyvios pucolaninės medžiagos, tai yra aktyviai reaguoja su šalutiniu cemento hidratacijos produktu kalcio hidroksidu (Ca(OH)₂) jau įprastinėse temperatūrose sudarydamos kalcio silikato hidratą (C-S-H), nuo kurių kiekio bandi-

niuose priklauso betono stipruminės savybės. Naudojant standartinę metodiką pagal gniuždymo stiprį apskaičiuoti gniuždymo bei lenkimo stipriai. Gauti rezultatai pateikti atitinkamai 2 ir 3 paveiksluose. Gauti rezultatai buvo apdoroti programa „Statistica“. Eksperimentinių duomenų pagrindu buvo nustatytas ryšys tarp bandinių gniuždymo stiprio (MPa) ir SM kiekio (%) bei tankio (kg/m³), kurio empirinė regresinė lygtis išreiškiama:

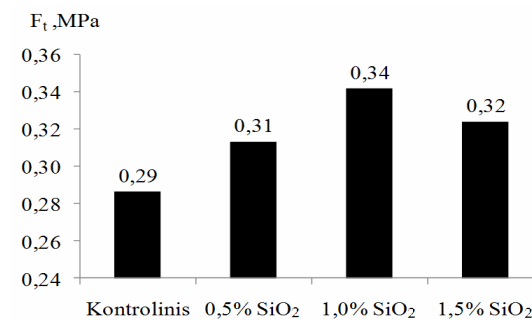
$$\sigma_c = (-0.3422) \cdot SM^2 + (0.945 \cdot 10^{-5}) \cdot \rho^2 + (0.00153) \cdot SM \cdot \rho \quad (1)$$

su vidutiniu kvadratinu nuokrypiu $S_r=0,089 \text{ MPa}$ ir determinacijos koeficientu ($R^2=0,838 \text{ MPa}$), kuris rodo, kad gniuždymo stiprio vertės variacija vidutiniškai 83,8 % priklauso nuo tankio (ρ , kg/m³) ir SiO₂ mikrodulkių kiekio (SM, %) kiekio ir tik 16,2 % nuo kitų faktorių. Tokiu būdu galima teigti, kad yra stiprus sąryšis tarp bandinių gniuždymo stiprio ir tankio bei SM kiekio.



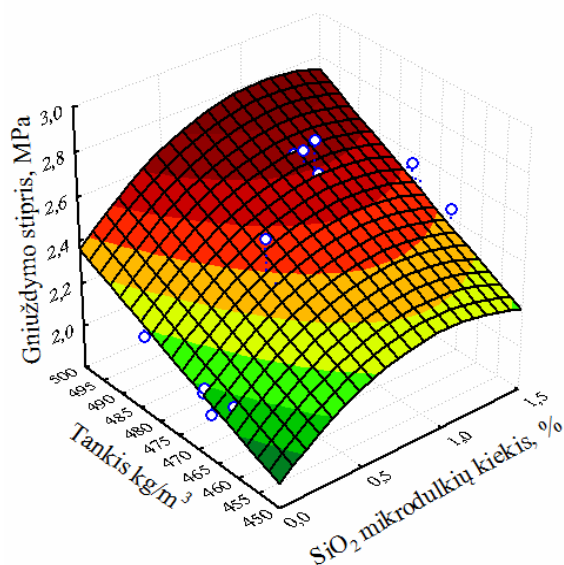
2 pav. Bandinių lenkimo stipris

Fig. 2. Bending strength of samples



3 pav. Bandinių tempimo stipris.

Fig. 3. Tensile strength of samples



4 Pav. Gniuždymo stiprio priklausomybė nuo tankio bei SiO₂ mikrodulkių kiekio

Fig. 4. Compressive strength dependence on the density and amount of SiO₂ microsilica

Tai leidžia prognozuoti gniuždymo stiprį su pakankamai dideliu tikslumu. Lygtis galioja kai SiO₂ mikrodulkių kiekis svyruoja nuo 0 % iki 1,5 %, o AAC tankis svyruoja nuo 460 kg/m³ iki 490 kg/m³. Pagal gautus eksperimentinius duomenis grafiškai pavaizduota gniuždymo stiprio priklausomybė nuo tankio bei SiO₂ mikrodulkių kiekio (4 paveikslas). Kaip matome iš 4 paveikslas, didėjant tankiui, gniuždymo stipris taip pat didėja. Pakeitus nuo 0,5 % iki 1,0 % smėlio SiO₂ mikrodulkėmis matomas gniuždymo stiprio padidėjimas. Dedant daugiau kaip 1 % SM gniuždymo stipris, lyginant su kontroliniu, gaunamas didesnis, tačiau mažesnis nei bandinių, kuriuose buvo pakeista 1 % smėlio SiO₂ mikrodulkėmis. Taip yra todėl, kad skaičiuojant sudėtį formavimo mišiniams visose sudėtyse buvo naudojamas tas pats vandens/kietųjų dalelių (V/C) santykis. Vandens poreikis padidėjo dėl didelio SiO₂ mikrodulkių savitojo paviršiaus bei dėl vandens panaudojimo kalcio silikato hidratų (C-S-H) susidaryme, todėl galėjo jo nepakakti visiškai cemento hidratacijai.

Išvados

1. SiO₂ mikrodulkės teigiamai įtakoja stiprumines dujų cementbetonio, su mišria rišančiąja medžiaga, savybes.
2. Optimalus SiO₂ mikrodulkių kiekis yra 1 % (stipris padidėja 19,3 %). Pakeitus 0,5 % ar 1,5 % smėlio SiO₂ mikrodulkėmis stipris padidėja atitinkamai 9,2 % ir 13,0 %. Įdėjus daugiau nei 1 % SM gniuždymo stipris sumažėja dėl to, kad skaičiuojant bandinių sudėtis buvo naudotas toks pat vandens ir kietųjų dalelių santykis.

Dėl šios priežasties bei dėl didelio SM savitojo paviršiaus pritrūko vandens visiškai cemento hidratacijai.

3. Statistiškai apdorojus duomenis gauta netiesinė lygtis:

$$F_c = (-0.3422) \cdot SM^2 + (0.945 \cdot 10^{-5}) \cdot \rho^2 + (0.00153) \cdot SM \cdot \rho,$$

kurią naudojant galima prognozuoti dujų cementbetonio gniuždymo stiprį pagal įdėtą SiO₂ mikrodulkių kiekį bei bandinio tankį. Ši lygtis galioja, kai SM kiekis kinta nuo 0 iki 1,5 %, bandinių tankis kinta nuo 460 kg/m³ iki 490 kg/m³.

Literatūra

- Deltuva J. 1998. *Heterogeninių statybinių mišinių sandara ir savybės*, Kaunas, Technologija; 264 p.
- Gnip, I.; Keršulis, V.; Laukaitis, A. 1996. *Beautoklavio putbetonio šiluminių techninių savybių tyrimai*. Statyba. ISSN 1392-1525, Vilnius: Technika, (1): 43-48p.
- Goberis S. Antanovič V. 2007. *Kaitrai atsparūs šamotbetonai. Monografija*. Vilnius, Technika, 360 p.
- Laukaitis, A. 2000. *Akytųjų betono formavimo mišinių ir gaminių savybės*. Vilnius: Technika. 232 p.
- Myhre, B. 2005. Microsilica in refractory castables. How does microsilica quality influence performance?, in *9-th Biennial Worldwide Congress of refractories*, 191-195p.
- Skipkiūnas, G.; Midveris, V.; Vaitkevičius, V. 2000. SiO₂ mikrodulkių įtaka cementinio akmens ir betono savybėms, iš konferencijos *Betonas ir gelžbetonis*, Kaunas.
- Šarka, V. 2008. *Sprendimų paramos sistema statyboje taikant daugiakriterinius sintezės metodus*. Vilnius: Technika. 97p. ISBN 978-9955-28-333-1.
- EN 459-2:2001 *Statybinės kalkės*. 2 dalis. Bandymo metodai
- LST 1469:2000 *Autoklavinis akytasis betonas. Bendrieji techniniai reikalavimai ir atitikties įvertinimas*.

INFLUENCE OF SiO₂ MICRODUST TO GAS CEMENT CONCRETE WITH MIXED BINDING MATERIAL STRENGTH CHARACTERISTICS

Giedrius Balčiūnas, Lina Lekūnaitė, Antanas Laukaitis

Abstract

Using certain production wastes can be improved strength characteristics of autoclaved cellular concrete (AAC). Since production wastes are used in sufficiently small quantities and their price is not high, it is possible to improve strength characteristics of AAC in sufficiently low cost.

In this work the impact of silica fume on strength characteristics of AAC with composite binder material was investigated. There were samples of four compositions: comparative (without ANS), with 0,5% ANS, with 1,0% ANS and with 1,5% ANS. In this article composition calculation and formation methods of samples are described. Compressive strength results obtained by compressing samples (70 mm x 70 mm x 70 mm).

Bending strength and tension strength values were calculated according to standard LST 1469 using received compressive strength results. Results were processed with programme STATISTICA and it was obtained the dependence on compressive strength of density and amount of ANS supplement.

Keywords: SiO₂ micro dust, strength characteristics, porous concrete, gas cement.