

XII МЕЂУНАРОДНА НАУЧНО-СТРУЧНА КОНФЕРЕНЦИЈА

САВРЕМЕНА ТЕОРИЈА
И ПРАКСА У ГРАДИТЕЉСТВУ

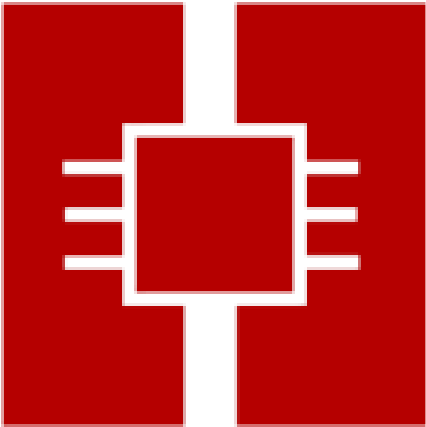
ЗБОРНИК РАДОВА

12th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PROFESSIONAL CONFERENCE ON

CONTEMPORARY THEORY
AND PRACTICE IN CONSTRUCTION

BOOK OF PROCEEDINGS





**XII МЕЂУНАРОДНА НАУЧНО-СТРУЧНА КОНФЕРЕНЦИЈА
САВРЕМЕНА ТЕОРИЈА И ПРАКСА У ГРАДИТЕЉСТВУ**

12th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PROFESSIONAL
CONFERENCE ON CONTEMPORARY THEORY AND
PRACTICE IN CONSTRUCTION

**ЗБОРНИК РАДОВА
BOOK OF PROCEEDINGS**

Издавач Универзитет у Бањој Луци
Publisher Архитектонско-грађевинско-геодетски
факултет

University of Banja Luka
Faculty of Architecture, Civil Engineering and
Geodesy

За издавача др Бранкица Милојевић, ванр. професор
On behalf of publisher Brankica Milojević, PhD, associate professor

Уредник др Биљана Антуновић, ванр. професор
Editor Biljana Antunović, PhD, associate professor

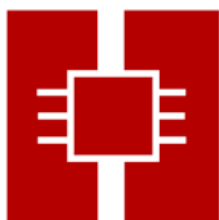
**ЕЛЕКТРОНСКО ИЗДАЊЕ –
ДИСТРИБУЦИЈА ПУТЕМ ПРЕНΟΣНЕ
УСБ МЕМОРИЈЕ И ИНТЕРНЕТ
СТРАНИЦЕ КОНФЕРЕНЦИЈЕ:
stepgrad16.aggfbl.org
DIGITAL PUBLICATION – DISTRIBUTION
THROUGH REMOVABLE USB MEMORY
AND CONFERENCE WEB SITE:
stepgrad16.aggfbl.org**

Бања Лука, 2016.
Banja Luka, 2016

ISBN 978-99976-663-3-8
UDK 69:71/72(082)(0.034.2)
624(082)(0.034.2)
COBISS.RS-ID 6240024

ISBN 9789997666338





**XII МЕЂУНАРОДНА НАУЧНО-
СТРУЧНА КОНФЕРЕНЦИЈА
САВРЕМЕНА ТЕОРИЈА И
ПРАКСА У ГРАДИТЕЉСТВУ**

12th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
PROFESSIONAL CONFERENCE ON
CONTEMPORARY THEORY AND
PRACTICE IN CONSTRUCTION

**ЗБОРНИК РАДОВА
BOOK OF PROCEEDINGS**

Бања Лука, 7-8. децембар 2016.
Banja Luka, December 7-8, 2016

1 |

оригинални научни рад
original scientific paper

ФИЗИЧКО – МЕХАНИЧКА СВОЈСТВА МИКРОАРМИРАНИХ БЕТОНА ВИСОКИХ ЧВРСТОЋА

Dragica Jevtić, *dragica@imk.grf.bg.ac.rs*, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering
Dimitrije Zakić, *dimmy@imk.grf.bg.ac.rs*, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering
Aleksandar Savić, *savic.alexandar@gmail.com*, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

Резиме:

У првом делу рада приказују се могући начини добијања бетона високих чврстоћа. Други део рада посвећен је сопственим експерименталним испитивањима, која су обухватила чврстоћу при притиску, чврстоћу при затезању, адхезију, брзину простирања ултразвучних таласа, модул еластичности, као и трајност композита.

Приказане су различите рецептуре бетона, справљених са цементом, силикатном прашином, дробљеним агрегатом – дијабазом, кварцним песком, хемијским додацима, као и са два типа микроарматуре.

Кључне речи: бетон, цемент, силикатна прашина, микроарматура, висока чврстоћа, хемијски додаци.

PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER REINFORCED HIGH STRENGTH CONCRETE

Summary:

Possible ways of obtaining high strength concrete are presented in the first part of the paper. The second part deals with experimental research, which consisted of testing of compressive strength, tensile strength, adhesion, ultrasonic pulse velocity, modulus of elasticity, as well as the durability of composites.

Different concrete mix designs are presented, based on cement, silica fume, crushed aggregate – diabase, quartz sand, chemical admixtures and two types of fibers.

Key words: concrete, cement, silica fume, fibers, high strength, chemical admixtures.

1. УВОД

Бетони високих чврстоћа се дефинишу само на основу њихових механичких својстава - чврстоће при притиску у одређеној (најчешће 28–дневној) старости, при чему се бројна вредност те чврстоће мењала током времена. Тако је, на пример, 70-тих година прошлог века чврстоћа при притиску од 40 МПа називана високом, док је каснијих година, са интензивним развојем теорије и технологије бетона, преовладао став да је та чврстоћа она преко 60 МПа (на пример, према Правилнику БАБ-87). Наравно, да би се постигла ова чврстоћа било је потребно темељно познавање структуре бетона, фактора који на њу утичу, као и самог процеса хидратације цемента и његове кинетике, с једне стране. С друге стране, пак, сам развој бетона високих чврстоћа поспешила је и синергија хемијске индустрије и грађевинарства тј. прогресивни развој хемијских додатака бетону, посебно пластификатора и суперпластификатора.

Усвајањем структуралистичког концепта, по коме структура композита у највећој мери опредељује његова својства (а која се код бетона састоји из макроструктуре, микроструктуре и прелазне зоне између агрегата и цементног камена), основни задатак инжењера технологије и грађевинарства је изналажење начина да се утиче на порозност бетона, његову нехомогеност и микропрслине - како у хидратисаној цементној пасти, тако и у прелазној зони [2, 5].

Основни начини деловања, уколико се жели постизање високих механичких чврстоћа бетона, подразумева следећа деловања:

- физичко деловање, које се састоји у примени ниских водоцементних фактора, уз коришћење додатака бетону типа пластификатора и суперпластификатора,
- израда бетона са додатком тзв. силикатне чађи, или силикатне прашине (silica fume), која делује како на физичкој, тако и на хемијској основи,
- израда бетона аутоклавним очвршћавањем, уз примену силикатне прашине и суперпластификатора.

Првим начином могу се добити чврстоће при притиску између 60-80 МПа, другим

80-110 МПа, а трећим и преко 150 МПа [7].

Поред овога, важно је истаћи да је одабир компонентних материјала веома важан корак за справљање бетона високих чврстоћа. То пре свега значи да врста, класа и количина цемента играју важну улогу, па се тако за ову намену углавном користи цемент ознаке СЕМ I (без минералних додатака), а његова количина износи преко 400 kg/m^3 . Класа цемента такође игра улогу у смислу да виша класа (нпр. 52,5) даје и веће чврстоће, према познатом закону Скрамтајева. Минералошки састав цемента такође је важан, посебно количина присутног вештачког минерала C_3A , јер генерално важи став да нижи садржај C_3A даје боља реолошка својства свежег бетона (пре свега, мањи пад "слампа") [3].

Што се тиче агрегата, и ту се мора водити рачуна о његовом квалитету, величини максималног зрна, а посебно о физичко-механичким својствима. Најбољи резултати добијају се употребом агрегата типа кварца, кварцита или гранита, са чврстоћом при притиску већом од 200 МПа. Ако се говори о величини максималног зрна, важи правило да, што су захтеване чврстоће бетона више, величину максималног зрна агрегата треба пропорционално смањивати. Тако на пример, за бетоне чврстоће преко 125 МПа, препоручено максимално зрна агрегата треба да се креће између 10-14 mm. У циљу добијања бољих перформанси бетона упутно је коришћење већег броја фракција агрегата.

Како чврстоће бетона зависе, између осталог, и од количине цемента, водоцементног фактора и степена хидратације, низак водоцементни фактор може се постићи употребом додатака бетону типа пластификатора и суперпластификатора.

Силикатна прашина (силикатна чађ) која се јавља под различитим називима ("condensed silica fume", "silica fume", "microsilica", итд.), представља аморфни силицијум-диоксид (SiO_2), који настаје при производњи силикатних и феросиликатних легура. Специфична површина овог финог материјала, одређена ВЕТ методом, износи од 11-40 m^2/g . Зрнца силикатне прашине су сферног облика и могу бити и до 100 пута мања од зрна цемента. Просечна величина ових честица је 0,1 μm што значајно повећава њихову специфичну површину и омогућава њихово "густо паковање" између зрна цемента (физичко деловање). У принципу, силикатна прашина се додаје бетонима високих чврстоћа у релативно малом проценту (8-12% у односу на масу цемента), при чему се значајно повећава неопходна количина воде – па се практично увек овим композитима додаје и нека врста хемијског додатка типа суперпластификатора [1, 11].

Поред физичког деловања, силикатна прашина као пуцолански додаток делује и на хемијској основи – тиме што везује калцијум-хидроксид настао током хидратације алита и белита. Додатком SiO_2 у продуктима хидратације смањује се величина пора и дебљина граничног слоја (прелазне зоне) између цементне пасте и агрегата. Такође, остварује се и боља адхезија цементног гела за агрегат и присутну арматуру у бетону.

Овакви системи се у литератури често означавају као DSP ("Densified systems containing homogenously arranged ultrafine particles") или у директном преводу: "згуснути системи који садрже хомогено распоређене врло fine честице". У предметним системима, остварена микроструктура је знатно компактнија и хомогенија у односу на класичне бетоне уобичајених чврстоћа. Такође, контактни слој (прелазна зона) је смањене дебљине и повећане компактности услед формирања већег броја ситнијих кристала $\text{Ca}(\text{OH})_2$ хаотичне оријентације [12].

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

У Лабораторији за материјале Института за материјале и конструкције на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, вршена су бројна испитивања бетона високих чврстоћа, затим бетона високих перформанси,

ултра-високих чврстоћа, као и микроармираних бетона високих чврстоћа и самозбијајућих бетона високих чврстоћа. У овом раду биће приказани резултати истраживања новијег датума, која обухватају испитивања вршена на микроармираним бетонима високих чврстоћа справљеним са додатком полипропиленских и челичних влакана [13].

За потребе предметних испитивања справљено је пет серија бетона, од којих прва серија представља еталон – бетон високе чврстоће без додатка влакана, друга и трећа серија справљене су са додатком различитих количина челичних влакана савијених на крајевима (произвођача ИРИ д.д., Словенија), а четврта и пета серија са додатком различитих количина полипропиленских влакана (произвођача Сика, Швајцарска). Својства примењених влакана приказана су у табели 1.

Свих 5 серија бетонских мешавина садржале су исте количине цемента (СЕМ I 52,5N) и минералног додатка (силикатне чађи). Што се тиче агрегата, коришћен је ситан кварцни песак (крупноће до 3 mm), као и крупан дробљени агрегат – дијабаз (крупноће 4-11,2 mm). Чврстоћа при притиску стенске масе (у сувом стању), од које је добијен предметни дробљени агрегат износила је сса 160 МПа. Количине агрегата и њихов гранулометријски састав били су константни код свих бетонских мешавина. Такође, коришћена су и два хемијска додатка (произвођача Сика, Швајцарска). Усвојене рецептуре су приказане у табели 2.

Табела 1 - Технички подаци о полипропиленским влакнима "Sika® Fibers" и челичним влакнима савијеним на крајевима "ИРИ дд", Љубљана

Својство	Полипропилен	Челик
Специфична маса	0,91 g/cm ³	7,85 g/cm ³
Дужина влакана (l)	12 mm	16 mm
Пречник влакана (d)	0.037 mm	0.4 mm
Фактор облика (l/d)	324	40
Абсорпција воде	ниска	-
Тачка топљења	160°C	1500 °C
Тачка паљења	640°C	-
Топлотна проводљивост	ниска	висока
Електрична проводљивост	ниска	висока
Отпорност на киселине	висока	-
Отпорност на алкалије	100 %	-

Затезна чврстоћа	360 N/mm ²	1100 N/mm ²
Издужење при лому	80-120 %	-
Модул еластичности	~ 4000 N/mm ²	~ 200000 N/mm ²

Табела 2 – Усвојене рецептуре бетонских мешавина

Компонента	Серија I (kg/m ³)	Серија II (kg/m ³)	Серија III (kg/m ³)	Серија IV (kg/m ³)	Серија V (kg/m ³)
Цемент 52,5 N (Lafarge)	500	500	500	500	500
SikaCrete® – AR	40	40	40	40	40
Вода	163	163	163	163	163
ViscoCrete 20 HR	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
Plastiment 20 R	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Полипропиленска влакна	-	-	-	0,6	0,9
Челична влакна	-	40	80	-	-
Кварцни песак	0,3 – 1,2 mm	433	433	433	433
	0,8 – 2,0 mm	79	79	79	79
	1,0 – 3,0 mm	276	276	276	276
Агрегат Дијабаз	4,0 – 8,0 mm	330	330	330	330
	8,0 – 11,2 mm	714	714	714	714

Резултати испитивања предметних серија бетона у свежем стању дати су у табели 3.

Табела 3 – Резултати испитивања свежих бетонских мешавина

Својство	Серија I	Серија II	Серија III	Серија IV	Серија V
Слегање (cm)	21	17	9	18	18
Температура (°C)	20,2	21,4	21,0	20,6	21,5
Увучени ваздух (%)	2,6	3,0	3,2	3,3	3,4
Запреминска маса (kg/m ³)	2462	2470	2489	2394	2404

Резултати испитивања бетона у очврслом стању (при старости од 7, 28 и 90 дана), дати су у табели 4. Свака од наведених вредности представља аритметичку средину, добијену на бази три резултата независних мерења.

Табела 4 – Резултати испитивања очврслог бетона ($t = 7, 28$ и 90 дана)

t = 7 дана					
Својство	Серија I	Серија II	Серија III	Серија IV	Серија V
Запреминска маса (kg/m ³)	2473	2487	2517	2464	2458
Чврстоћа при притиску (MPa)	68,9	73,9	75,3	70,1	71,5
Брзина ултразвука (m/s)	4824	4893	4984	4804	4820
t = 28 дана					
Својство	Серија I	Серија II	Серија III	Серија IV	Серија V
Запреминска маса (kg/m ³)	2465	2473	2512	2455	2456
Чврстоћа при притиску (MPa)	76,7	85,8	92,4	83,3	84,9
Чврстоћа при затезању цепањем (MPa)	4,19	4,84	5,55	4,53	4,76
Атхезија "Pull off" (MPa)	3,80	4,53	3,73	3,96	4,13
Модул еластичности (GPa)	41,25	43,50	40,56	43,62	39,68
Брзина ултразвука (m/s)	4903	4948	4995	4857	4865
t = 90 дана					
Својство	Серија I	Серија II	Серија III	Серија IV	Серија V
Чврстоћа при притиску (MPa)	85,6	90,2	94,4	88,4	85,9

Испитивање трајности предметних композита, у смислу отпорности на симултано дејство мраза и соли за одмрзавање, показало је да су губици масе и оштећења испитиване површине занемарљиви. Што се тиче испитивања водонепропустљивости, регистровани су максимални продори воде који су се кретали између 16 и 24 mm.

3. ЗАКЉУЧАК

На основу свега претходно наведеног, може се закључити да се повећана чврстоћа, у односу на класичне бетоне, може остварити справљањем бетона мање порозности, а то значи употребом довољно ниских количина воде. Висока хомогеност бетона, врло висок ниво механичких чврстоћа, као и висок степен водонепропустљивости могу се постићи правилним избором агрегата и гранулометријске композиције, избором врсте и оптималне

количине цемента, повећањем степена хидратације, ефикасним уграђивањем, као и применом различитих хемијских додатака бетону - путем којих се делује на микроструктуру бетона.

Хемијски додаци бетону типа суперпластификатора, као и евентуално додаци типа заптивача и додаци са симултаним ефектом аерирања и пластифицирања, директно ће утицати на моделирање порног простора и распоред пора у структури бетона. Свакако, при овоме треба водити рачуна о компатибилности хемијских додатака са употребљеним цементом. Применом минералних додатака типа силикатне прашине и других материјала пуцоланских својстава, може се такође утицати на микроструктуру бетона, али исто тако и на побољшање трајности ових композита. Наведени додаци утичу и на побољшан квалитет прелазне зоне између зрна агрегата и цементног камена [4, 5].

Што се тиче микроармираних бетона високе чврстоће, варирањем врсте и количине влакана добијени су композити задовољавајућих перформанси. Тако на пример, чврстоће при притиску у старости од 7 дана крећу се у границама од 69 МПа до 75 МПа, док се исте чврстоће у старости од 28 дана крећу у границама од 77 МПа до 92 МПа, а на 90 дана од 86 МПа до 95 МПа. Као што се из табеле 4 може видети, однос чврстоћа при притиску на 7 и 28 дана износи између 0,82 и 0,89. Такође, може се уочити да се додатком челичне микроарматуре чврстоћа при притиску повећава (у односу на еталон) између 12 и 20%, а додатком полипропиленских влакана између 9-11%. Што се тиче чврстоће при затезању цепањем, она је испитивана само при старости од 28 дана, а добијени резултати се крећу у границама 4,2-5,6 МПа. При томе, као и у случају чврстоће при притиску, и овде већа количина влакана даје већу чврстоћу композита. Измерене брзине простирања лонгитудиналних ултразвучних таласа кретале су се у границама 4800-5000 m/s, што указује на високу остварену компактност испитиваних бетона. Ова, као и нека ранија испитивања, показала су да се, у принципу, боља механичка својства постижу употребом челичне микроарматуре, у односу на синтетичку [6, 8, 9, 10, 11].

Овде треба напоменути да би се, свакако, добили још повољнији резултати, да су на тржишту били доступни агрегати виших механичких својстава (на пример: кварц или кварцит, са чврстоћом при притиску већом од 200 МПа).

ЗАХВАЛНОСТ

У раду је приказан део истраживања које је помогло Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у оквиру технолошког пројекта ТР 36017 под називом: "Истраживање могућности примене отпадних и рециклираних материјала у бетонским композитима, са оценом утицаја на животну средину, у циљу промоције одрживог грађевинарства у Србији".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jevtić, D.: Osnovni aspekti trajnosti betona, Konferencija "Saradnja istraživača različitih struka na području korozije i zaštite materijala"

- povodom 50. godišnjice Saveza inženjera i tehničara za zaštitu materijala Srbije, Tara, (uvodno izlaganje), str. 31-41., Zbornik radova, 2005.
- [2] Swamy, R.N.: The nature of the strength of concrete, Progress in Concrete technology, energy, mines and resources, Ottawa, 1980.
- [3] Jevtić, D.: Osnovni principi zaštite betonskih konstrukcija, VIII YUCORR Korozija i zaštita materijala u industriji u građevinarstvu, Tara 09-12.05.2006., plenarno predavanje str. 79-90. ISBN 86-82343-07-X., Zbornik radova.
- [4] Ačić M., Jevtić D.: Trajnost betonskih konstrukcija u uslovima koroziione sredine, IV naučno-stručni skup "Savremena teorija i praksa u graditeljstvu", Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju RS, AGF Banjaluka, Privredna komora RS, Zavod za izgradnju a.d. Banjaluka, Zbornik radova, Banjaluka, str. 75-96, 2008.
- [5] Jevtić D.: Svojstva svežeg i očvrsllog betona u funkciji termohigrometrijskih parametara sredine, Monografija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, ISBN 86-80049-40-9, 1996.
- [6] Muravljov M., Jevtić D., Zakić D.: Primeri poboljšanja performansi betona i maltera putem mikroarmiranja, Godišnja konferencija "Savremeni problemi u građevinarstvu", Građevinski fakultet u Subotici, str. 225-235, YU ISSN 0352-6852, 2005.
- [7] Muravljov M, Jevtić D.: Građevinski materijali 2, Akademska misao, Beograd, ISBN 978-86-7466-527-5, 2014.
- [8] Jevtić D., Zakić D.: Uticaj vrste i količine polipropilenskih vlakana na mehanička svojstva kompozita tipa maltera i betona, Metalurgija No 1, Vol. 8, , str. 39-51, 2002.
- [9] Jevtić D., Zakić D.: Mikroarmirani malteri i betoni - mogućnost poboljšanja fizičko-mehaničkih svojstava, Časopis Materijali i konstrukcije 3-4/2006, str. 35-44, YU ISSN 0543-0798, 2006.
- [10] Jevtić D., Zakić D. A. Savić, Steel Fiber Reinforcement Analysis in Cement Composite Materials, 1st International Congress of Serbian Society of Mechanics, pp. 293-298 Kopaonik, ISBN 978-86-909973-0-D, 2007.
- [11] Jevtić, D. Zakić, A. Savić, Steel Fiber Reinforcement and Silica Fume Addition in Cement Composite Materials, 7th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI 2007, Proceedings, Beograd, pp. 819-825, CD-ROM, ISBN 978-86-83803-22-4, 2007.
- [12] Karamoozian A., Karamoozian M., Ashrafi H.: Effect of Nano Particles on Self Compacting Concrete: An Experimental Study, Life Science Journal, Vol. 10, Issue 2, pp. 95-101, 2013.
- [13] Jevtić D., Zakić D., Okrajnov-Bajić R., Luković V.: High strength concrete – influence of component materials on created structure and physical-mechanical properties, 23. Slovenski kolokvij o betonih "Betoni visokih trdnosti", Zbornik gradiv in referatov, Ljubljana, Slovenija, pp. 49-60, ISBN 978-961-93671-2-4, 2016.