



DOI: [10.71167/uaceg.2026.590112](https://doi.org/10.71167/uaceg.2026.590112)

Получена: 09.11.2025 г.

Приета: 09.12.2025 г.

ОСОБЕНОСТИ НА СТРУКТУРООБРАЗУВАНЕТО ПРИ СМЕСЕНИ ГИПСО-ЦИМЕНТО-ПУЦОЛАНОВИ СВЪРЗВАЩИ ВЕЩЕСТВА

Б. Симонов¹

Ключови думи: зелено свързващо вещество, рециклиран гипс, природен зеолит, коефициент на размекване, якост на натиск, XRD, DTA/TG

РЕЗЮМЕ

Смесените гипсо-цименто-пуцоланови свързващи вещества (ГЦПСВ) дават възможност за намаляване на екологичния отпечатък на строителството, особено при употребата на рециклиран гипс от строителни отпадъци. ГЦПСВ се характеризират с бързо свързване и втвърдяване, както и с повишена водоустойчивост, в сравнение с гипсовите състави. При ГЦПСВ има редица особености при структурообразуването, а използването на рециклиран гипс може да внесе допълнителна специфика. Настоящата разработка има за цел да изследва поведението на ГЦПСВ с подобрени свойства, при които гипсът е рециклиран от отпадъци от гипсокартон, циментовото съдържание не надхвърля 35 % и като пуцоланова добавка е използван природен зеолит без допълнителна обработка. Изследван е процесът на структурообразуване, кинетиката на якостта и водоустойчивостта на два състава с различно съотношение между цимент и зеолит (1:1 и 1:0,6), втвърдяващи във въздушно-суха среда и под вода. Използвани са стандартизирани методи за изпитване на свързващи вещества, рентгено-структурен (XRD) и диференциално-термичен анализ (DTA). Установено е, че процесът на структурообразуване зависи от състава и условията на отлежаване: съотношението 1:1 на цимента и зеолита е по-благоприятно за постигането на стабилност на системата във времето дори под вода и води до по-висока якост (до 30 МРа). Въз основа на строително-техническите показатели на изследваните състави гипсо-цименто-пуцоланови свързващи вещества на основата на рециклиран гипс могат да бъдат използвани без ограничения в среда с повишена влажност за строителни разтвори за мазилки и зидария, зидарийни тела и тънкостенни композитни елементи.

¹ Борислав Симонов, инж., Център за компетентност “Clean&Circie”, кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: simonov_fce@uacg.bg

1. Въведение

Сред двукомпонентните и трикомпонентните смесени свързващи вещества се открояват гипсо-цименто-пуцолановите свързващи вещества (ГЦПСВ). Те представляват комбинация от гипс, пуцоланова добавка и алкален активатор – цимент [1] или вар [2].

ГЦПСВ предлагат някои специфични предимства, като бързо свързване и втвърдяване, по-високи якостни характеристики и подобрена водоустойчивост в сравнение с конвенционалните гипсови разтвори. Това ги прави подходящи за замяна на гипсови и циментови свързващи вещества в определени случаи.

Основно предизвикателство при гипс-циментовата система с високо съдържание на гипс е да се предотврати образуването на еtringит (трисулфатна форма на калциев хидросулфоалуминат) в по-късна възраст, което може да доведе до разрушаване на системата, вследствие на напрежения, предизвикани от нарастването на еtringитовите кристали [3]. За стабилността на еtringита е необходимо достатъчно количество алуминати (от трикалциевия алуминат на клинкера) и високоосновна среда (осигурена от портландита). Пуцолановата добавка със своя активен SiO_2 , понижава концентрацията на калциевия хидроксид (СН) в течната фаза [1, 3], което води до трансформацията на еtringита от трисулфатната форма в моносулфатна форма. Кристалите на моносулфатната форма са с по-малък обем и по-висока плътност от тази на трисулфатната форма, което създава условия за стабилност на системата. Освен това, в резултат на пуцолановата реакция се образуват допълнителни калциеви хидросиликати (С-S-H) [4], които повишават якостта и водоустойчивостта на системата.

Съществува голямо разнообразие от пуцоланови добавки (ПД). Често използвани са високоактивни индустриални отпадъци, като летяща пепел [5] или ПД от естествен произход, като метакаолин [6], както и рециклирани строителни отпадъци, например мляна керамична тухла [7].

Допълнително, вместо природен гипс, може да се използва рециклиран гипс, това би допринесло за още по-голяма екологична устойчивост на тези свързващи вещества. Известно е, че рециклирането на гипс е сравнително лесен процес с нисък енергиен разход и малък екологичен отпечатък [8, 9], което превръща гипсовите отпадъци в ценен ресурс за повторна употреба в строителството.

2. Материали и методи

2.1. Материали

2.1.1. Рециклиран гипс (РГ)

Рециклираният гипс, използван в изследването, е получен чрез рециклиране на гипсокартонени строителни отпадъци (СО), събрани от строителен обект. Плоскостите са класифицирани като тип „А“ и са произведени от Knauf България в съответствие с БДС EN 520:2004+A1:2009 и БДС EN 520:2004+A1:2009/NA:2014. Като суровина за тяхното производство е използван изкуствен гипс от сероочистващата инсталация на ТЕЦ „Марица-Изток 3“.

СО от гипсокартонените плоскости са рециклирани по технология, описана в друго изследване [10], в лабораторията към катедра „Строителни материали и изолации“ при УАСГ.

Минералният състав на рециклирания гипс, който е определен с XRD анализ, показва, че кристалната фаза е съставена от басанит, т.е. гипс полухидрат, по подобие на конвенционалния строителен гипс [10]. При предишни изследвания [10] бе установено, че РГ се характеризира с по-висока водопотребност (съотношението вода/гипсов състав равно на 0,99), по-кратки времена на свързване (начало на свързване – 3 минути и 25 секунди, край на свързване – 7 минути и 36 секунди) и якост на натиск 11,8 МПа на 7-ия ден.

2.1.2. Цимент

В изследването е използван портландцимент (ПЦ) CEM I 52,5R, съгласно EN 197-1 [11]. Физико-механичните му характеристики са определени експериментално.

2.1.3. Природен зеолит

Зеолитът съдържа силициев диоксид (SiO_2) и алуминиев оксид (Al_2O_3). Той реагира с СН като образува допълнителни С-S-H (1), които уплътняват структурата и допринасят за по-добри механични свойства на смесените свързващи вещества.



Използваният в изследването природен зеолит е с български произход и търговска марка *Vivolith 85*, произведен от S&B Industrial Minerals SA. Зеолитът е допълнително смлян, като е постигната финост от $3960 \text{ cm}^2/\text{g}$, съгласно БДС EN 196-6 [12], съизмерима с тази на използвания цимент. Използваният зеолит съдържа над 85 % финокристални алумосиликати с голяма специфична повърхност от типа на клиноптилолит, който се характеризира с голяма реактивоспособност.

Пуцолановата активност на зеолита е $178,8 \text{ mg/g}$, определена по БДС 166 [13], въз основа на количеството СаО [mg], което се свързва от 1 g зеолит след 30-дневен период. Съгласно стандарт БДС 16720 [14], използваният зеолит се класифицира като високоактивна пуцоланова добавка.

2.1.4. Химична добавка

За подобряване на обработваемостта на смесите е използвана суперпластифицираща химична добавка на основата на поликарбоксилат – Sika ViscoCrete-GL 3070.

2.2. Проектиране на състава на ГЦПСВ

Количеството на РГ в смесите на гипсо-цименто-пуцоланови свързващи вещества е 45 %, това количество е избрано въз основа на предишни изследвания [1, 2]. Поради нестабилността на системата е необходимо да се определи точното съотношение между количествата на цимента и зеолита. Съгласно методика ТУ 21-31-62-89 [15] съотношението зависи от концентрацията на калциев оксид в състави, които представляват водна суспензия от полуводен гипс, цимент и пуцоланова добавка (зеолит). Приготвят се две еднакви партии, като във всяка партида има три различни състава с различно съотношение на ПД:ПЦ и избраното количество на гипс. Първата партида се изпитва на 5-ия ден, а втората на 7-ия ден. Системата се счита за стабилна, когато концентрацията на СаО на 5-ия ден не надвишава $1,1 \text{ g/l}$, а на 7-ия – $0,85 \text{ g/l}$. Съгласно методиката, за ПД с активност от 75 до 200 mg/g , се препоръчва съотношението на ПД:ПЦ да бъде 0,6, 1,2 и 1,8. Концентрацията на СаО във филтрирания разтвор на съответната възраст се определя чрез титруване с $0,1 \text{ N}$ разтвор на солна киселина, в присъствието на фенолфталеин. Формулата за изчисляване на количеството на калциев оксид (СаО, g/l) е следната:

$$\text{CaO} = \frac{768 \cdot A \cdot T}{B}, \quad (2)$$

където A е количеството солна киселина, използвано за титруване в ml;

T – титърът на солната киселина (съдържание на HCl в g/ml);

B – количеството разтвор, подложен на титруване, ml.

От получените резултати (табл. 1) се построява графика на изменението на концентрацията на CaO при различните съотношения на ПД:ПЦ. От графиката се отчита при кое съотношение, както на 5-ия, така и на 7-ия ден, концентрацията на калциев оксид не надвишава граничните стойности.

Таблица 1. Концентрацията на CaO при различни съотношения зеолит:портланд цимент

Съотношение на цимент към зеолит (З:ПЦ)	Концентрация на CaO, g/l	
	5-и ден	7-и ден
0,6	0,89	0,83
1,2	0,51	0,29
1,8	0,23	0,06

От проведените изпитвания със използваните материали се установи, че системата гипс-цимент-зеолит е стабилна при съотношение на зеолит към цимент, равно на 0,6 (т.е. зеолитът е 60 % от масата на цимента) – табл. 1. Тъй като други автори препоръчват оптимално съотношение на пуцоланова добавка към цимента, равно на 1,0 [5], бяха изготвени замеси със съотношение на З:ПЦ, равно на 0,6 и 1,0, представени в табл. 2.

Таблица 2. Състав на смесените свързващи вещества

Означение	Рециклиран гипс, % от общата маса	Цимент, % от общата маса	Зеолит, % от общата маса	Съотношение вода/свързващо в-во	Хим. добавка, % от свързващото в-во
ГЦПСВ-1,0	45,0	27,50	27,50	0,7	1,2
ГЦПСВ-0,6	45,0	34,37	20,63	0,7	0,8

С цел да се постигне сравнима обработваемост на различните състави, предварително бяха проведени изпитвания за определяне на съотношението на водата към свързващото вещество и количествата на пластифициращата добавка.

2.3. Подготовка и условия на пробите

От всеки състав (табл. 2) са изготвени по 12 броя призми с размери 4×4×16 cm. На следващия ден пробите се декофрират и се разделят на две половинки. Едната половина отлежава във въздушно-суха среда (23±2 °C и RH-50±5 %), а другата отлежава под вода (20±1 °C). Пробите, отлежавали във вода, имат в означението си добавена буква В (напр. ГЦПСВ-1,0-В).

След изпитване на пробните образци за якост на натиск те се изсушават във вентилируема сушилня при температура +60 °C в продължение на 4 часа. От средната част

на изсушените образци се взема проба за изпитване на XRD и DTA/TG анализите. Пробата се стрива до прахова фракция.

2.4. Методи

2.4.1. Рентгено-структурен анализ (XRD)

Рентгено-фазов анализ (XRD) е направен на отделни компоненти – гипс и зеолит, както и на смесените свързващи вещества на възраст 7, 28 и 90 дена за проследяване на новообразуванията и промените в минералния състав.

Анализът е извършен в Геолого-географския факултет на Софийския университет с прахов рентгенов дифрактометър Bruker D8 Advance, притежаващ следните технически характеристики: детектор LynxEye с Co K α радиация, вертикален θ/θ гониометър и размер на стъпката от 0,02 (2θ). За структурните данни и полуколичествения фазов анализ е използван софтуерът DiffraPlus EVA, използващ кристалографска база данни ICDD-PDF2 [16].

2.4.2. Комбиниран диференциално-термичен и гравиметричен анализ (DTA/TG)

Процесът на структурообразуването на ГЦПСВ е проследен и чрез диференциално-термичен (DTA) и гравиметричен анализ (TG).

Анализите са извършени в Института по обща и неорганична химия към БАН. Изследванията са направени с помощта на апарат Labsys Evo 1600 на фирма Setaram, Франция. Пробите са термично третирани в температурен интервал от стайна температура до 1000 °C. Измерването е извършено при скорост на нагриване 10 °C/min в поток на въздуха с коригиране на базова линия за ДТА и термогравиметричен анализ от нулева празна проба.

2.4.3. Якост на натиск

Якостта на натиск на втвърдените разтвори от ГЦПСВ е определена на 2, 7, 28 и 90-дневна възраст, съгласно БДС EN 196-1 [17].

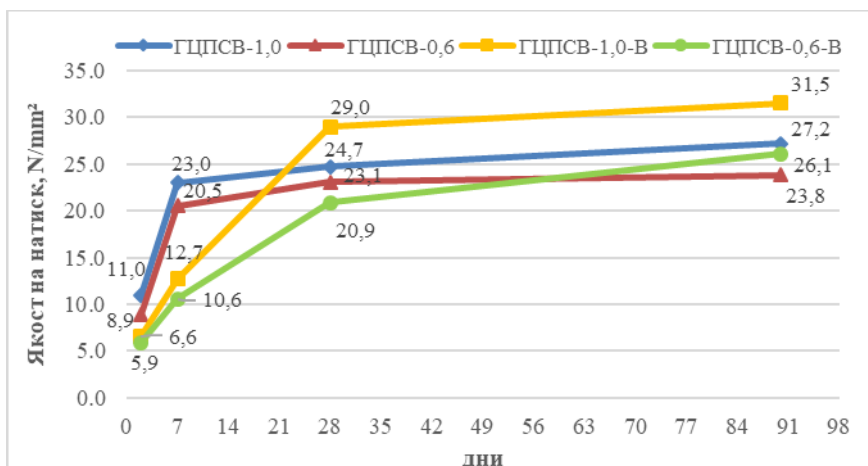
2.4.4. Водоустойчивост (коефициент на размекване)

Коефициентът на водоустойчивост е определен като отношение на якостта на проба, отлежавала под вода (вж. т. 2.2.2), към якостта на проба, отлежавала във въздушно суха среда (вж. т. 2.2.2). Прието е като водоустойчиви да се класифицират онези разтвори, при които стойността на този коефициентът е над 0,8.

3. Резултати и дискусии

3.1. Развитие на якостта на натиск

Якостта на натиск е макропараметър, който отразява структурообразуването при св. в-ва. На фиг. 1 е илюстриран процесът на развитие на якостта на ГЦПСВ в периода от 2-ия до 90-ия ден. Оказва се, че условията на отлежаване определят в голяма степен кинетиката на якостта на натиск – фиг. 1.



Фиг. 1. Развитие във времето на якостта на натиск на двата състава ГЦПСВ, отлежавали в различна среда (на въздух и под вода)

При съставите, отлежавали на въздух, процесът на структурообразуване е най-интензивен в ранна възраст и се наблюдава: на 2-и ден около 10 МРа, а на 7-ия ден достигат 21 – 23 МРа (фиг. 1), което се дължи на втвърдяването на гипса.

При съставите, отлежавали под вода, показват значително по-ниски якости в ранна възраст: около 6 МРа на 2-ия ден и около 10 МРа на 7-ия ден (фиг. 1). Според [5], това се дължи на малкото време за образуване на достатъчно калциеви хидросиликати (C-S-H), които да защитят гипса от разтварянето във водата.

В периода от 7-ия до 90-ия ден съставите, отлежавали на въздух, показват бавно нарастване на якостта. На 28-ия ден якостта на двата състава е сходна (около 24 МРа), а на 90-ия ден има малко повишаване на якостта, единствено при състав ГЦПСВ-1,0, където стойността е 27,2 МРа (фиг. 1).

Пробните образци, отлежавали под вода, набират най-интензивно якост от 7-ия до 28-ия ден, но само якостта на състава с по-високо съдържание на зеолит (ГЦПСВ-1,0-В) – 29,0 МРа, превишава якостта, постигната при отлежаване във въздушно-суха среда (ГЦПСВ-1,0) – 25 МРа. Подобни резултати са докладвани и от други автори [5], които за ГЦПСВ със сходни пропорции са използвали летяща пепел като пуцоланова добавка.

От резултатите на 90-ия ден става ясно, че пуцолановата реакция е по-интензивна при отлежаване във вода и допринася към якостта в по-късна възраст. Съставите, отлежавали под вода, показват по-високи якости с около 10 – 15 % в сравнение с тези, отлежавали на въздух, като най-добри резултати постига съставът с по-голямо съдържание на зеолит (ГЦПСВ-1,0-В) – 31,5 МРа, при който се получават повече продукти от пуцолановата реакция, уплътняващи структурата на ГЦПСВ и осигуряващи водоустойчивостта им.

3.2. Водоустойчивост

Поради факта, че в ранния период (7-ия ден) на структурообразуване доминират процесите, свързани с хидратацията на гипса, водоустойчивостта (табл. 3) на ГЦПСВ до този момент остава сравнително ниска: коефициентът на размекване е едва 0,55 при ГЦПСВ-1,0 и още по-нисък – 0,52 при състава с по-малко количество зеолит (ГЦПСВ-0,6) – табл. 3.

Таблица 3. Коэффициент на размекване

Състав	7-и ден	28-и ден	90-и ден
ГЦПСВ-1,0	0,55	1,17	1,16
ГЦПСВ-0,6	0,52	0,90	1,10

На 28-ия ден, обаче, коефициентът на размекване е вече над 0,8, което ги определя като водоустойчиви свързващи вещества. По-висок резултат има съставът с по-голямо съдържание на зеолит (ГЦПСВ-1,0) – 1,17. На по-късна възраст (90-ия ден), двата състава имат почти еднакви стойности на коефициента на размекване.

3.3. Рентгено-фазов анализ (XRD) на новообразуванията в ГЦПСВ

Данни за минералния състав на рентгено-кристалната фаза на новообразуванията на различните състави ГЦПСВ и влиянието върху тях на условията на отлежаване са систематизирани в табл. 4.

Установено е, че и при двата състава най-голямо е съдържанието на калциев сулфат дехидрат, получен от хидратацията на рециклирания гипс. При състава с по-малко зеолит ГЦПСВ-0,6 количеството на гипса дехидрат е сравнително по-ниско, тъй като част от гипса участва в образуването на еtringит.

Условията на отлежаване имат съществено влияние върху минералния състав: втвърдяването под вода благоприятства образуването на еtringит, като количеството му в пробите ГЦПСВ-1,0-В и ГЦПСВ-0,6-В е по-голямо от тези, отлежавали във въздушно-суха среда (ГЦПСВ-1,0 и ГЦПСВ-0,6). Количеството на зеолита също оказва съществено влияние при образуването на еtringит. Когато количеството на зеолита е по-голямо, еtringитът е системно по-малко и обратно.

Таблица 4. Минерален състав на кристалната фаза

Състав		Минерален състав, %						
		Гипс	Еtringит	Хуангит	Портландит	Тоберморит	Калцит	Клиноптилолит
7-и ден	ГЦПСВ-1,0-В	50,0	20,0	–	–	7,5	9,9	12,6
	ГЦПСВ-0,6-В	49,9	23,3	7,7	–	4,3	4,7	10,2
	ГЦПСВ-1,0	56,1	15,0	7,5	–	3,6	3,2	14,7
	ГЦПСВ-0,6	45,9	10,9	11,9	–	16,5	3,7	11,1
28-и ден	ГЦПСВ-1,0-В	56,7	23,7	–	–	3,8	5,1	10,7
	ГЦПСВ-0,6-В	54,4	28,1	–	–	4,1	4,5	8,9
	ГЦПСВ-1,0	52,5	15,6	9,4	–	3,1	3,6	15,8
	ГЦПСВ-0,6	48,6	15,7	–	15,7	3,7	4,2	12,0
90-и ден	ГЦПСВ-1,0-В	60,4	15,4	–	–	6,9	4,7	12,5
	ГЦПСВ-0,6-В	53,0	33,2	–	–	2,6	4,0	7,2
	ГЦПСВ-1,0	61,4	7,1	8,6	–	–	6,6	16,3
	ГЦПСВ-0,6	60,0	8,8	–	6,4	3,7	7,8	13,3

Портландитът липсва в изследваните ГЦПСВ, с изключение на състава с по-малко количество зеолит, втвърдявал на въздух (ГЦПСВ-0,6), което показва по-интензивната пуцоланова реакция при по-голямо съдържание на зеолит. Допълнително доказателство

за по-добра пуцоланова реакция е по-високото съдържание на С-S-H в пробите с повече зеолит на 90-ия ден (табл. 4).

Липсата на портландит не означава, че той е изцяло консумиран в пуцоланова реакция, а по-скоро, че в процеса на пробоподготовка портландитът е взаимодействал с въглеродния диоксид от въздуха и се е превърнал в калцит. При все това, количеството на калцита е по-високо при пробите, отлежавали на въздух (около 6 %), докато при пробите, отлежавали под вода, то е около 4 %, което потвърждава, че пуцолановата реакция се развива в по-голяма степен във влажна среда.

3.4. Диференциално-термичен и гравиметричен анализ (DTA/TG) на ГЦПСВ в различни етапи на структуриране

Характерните процеси, наблюдавани в структурирането на ГЦПСВ, при изследвания с DTA/TG, са показани в табл. 5.

Таблица 5. Характерни процеси, наблюдавани при DTA/TG изследванията на ГЦПСВ

Характерни процеси	Температурен интервал	Наличие на пик
Отделяне на физически свързаната вода	от 30 °С до 110 °С	да, около 95 °С
Дехидратация на еtringита	от 110 °С до 140 °С	да, около 120 °С
Дехидратация на гипс двухидрат и преминаването в басанит, и след това в анхидрит	от 140 °С до 340 °С	да, около 160 °С
Разпадане на портландита	от 420 °С до 480 °С	да, около 460 °С
Разпадане на калцита	от 660 °С до 760 °С	да, около 730 °С

Основните структурни минерали и техните количества, установени в различните етапи на втвърдяване на ГЦПСВ са обобщени в табл. 6.

Таблица 6. Съдържание на продуктите на хидратация в пробите, определени чрез TG анализ

	Състав	TG, %		
		Еtringит	Портландит	Калцит
7-и ден	ГЦПСВ-1,0-В	4,1	–	0,7
	ГЦПСВ-0,6-В	5,6	0,5	0,8
	ГЦПСВ-1,0	4,9	0,4	0,7
	ГЦПСВ-0,6	4,6	0,8	1,0
28-и ден	ГЦПСВ-1,0-В	3,9	–	0,8
	ГЦПСВ-0,6-В	6,7	–	0,8
	ГЦПСВ-1,0	3,9	0,5	0,9
	ГЦПСВ-0,6	4,3	0,9	1,2
90-и ден	ГЦПСВ-1,0-В	4,9	–	0,8
	ГЦПСВ-0,6-В	6,3	–	0,9
	ГЦПСВ-1,0	3,5	0,7	2,4
	ГЦПСВ-0,6	3,4	0,9	3,0

Потвърдено е, че отлежаването във водна среда благоприятства образуването на еtringит, като при съставите с по-малко съдържание на зеолит съдържанието на еtringит е системно по-високо.

Подобно на установеното с XRD анализа, пробите, отлежавали във въздушно-суха среда, съдържат малко количество портландит (табл. 6), докато при съставите, отлежавали под вода, той липсва, с изключение на състава с малко зеолит (ГЦПСВ-0,6-В) на 7-ия ден.

Калцит е установен при всички пробни образци. При пробите, отлежавали на въздух, количеството на калцита нараства от 7-ия до 90-ия ден, около 3 – 3,5 пъти, което се дължи на карбонизацията, докато при пробите, отлежавали под вода, то остава постоянно. Това показва, че в пробите, отлежавали във въздушно-суха среда, има повече портландит, който да се трансформира в калцит, а не е бил изразходен в пуцоланова реакция (участие на портландита в образуване на C-S-H), както е при съставите, отлежавали под вода.

4. Изводи

Установено е, че е възможно създаването на гипсо-цименто-пуцоланови свързващи вещества на основата на рециклиран гипс от гипсокартон с използване на природен зеолит без допълнително термично активиране и с циментово съдържание под 35 %.

Условията на отлежаване и количеството зеолит имат съществено значение за структурообразуването. Структурообразуването във въздушно-суха среда е по интензивно в началото (до 7-ия ден) и се дължи главно на хидратацията на гипса. Отлежаването във водна среда благоприятства пуцолановата реакция, но и образуването на еtringит, особено в по-късна възраст. Това е причината якостта на ГЦПСВ, отлежавали под вода, на 90-ия ден да превишава якостта на съставите във въздушно-суха среда с около 10 – 15 %. Съотношението на цимент към зеолит, равно на 1,0, осигурява по-високи механични свойства и по-голяма водоустойчивост на ГЦПСВ.

В заключение, създадените гипсо-цименто-пуцоланови свързващи вещества на основата на рециклиран гипс се характеризират с висока водоустойчивост и са подходящи за строителни разтвори за мазилки и зидария, зидарийни тела и тънкостенни композитни елементи.

Благодарности

Настоящата публикация отразява научноизследователската работа по проект BG16RFPR002-1.014-0015 „Център за компетентност Чисти технологии за устойчива околна среда – води, отпадъци, енергия за кръгова икономика“ (Clean&Circle), финансиран по Програма за научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейските структурни и инвестиционни фондове.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. *Lesovik, V., Chernysheva, N. et al.* Optimization of fresh properties and durability of the green gypsum-cement paste. *Constr. Build. Mater.* 2021, 287, 123035, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123035.

2. *Scheinherrová, L., Doleželová, M. et al.* Fired clay brick waste as low cost and eco-friendly pozzolana active filler in gypsum-based binders. *J. Clean. Prod.* 2022, 368, 133142, doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133142.

3. *Волженский, А. В., Бузов, Ю. С. et al.* Mineral'nye vjzhashhie veshhestva (tehnologija i svojstva), 3-e izdanie, Moskva Strojizdat 1979, pp 458 – 461 (in Russian).

4. *Neville, A. M.* Properties of concrete, 5th Edition; Pearson Education Ltd., Edinburgh Gate, ISBN 978-0-273-75580-7, 2011, pp. 83 – 84.

5. *Wansom, S., Chintasonkro, P. et al.* Water resistant blended cements containing flue-gas desulfurization gypsum, Portland cement and fly ash for structural applications. *Cem. Concr. Compos.* 2019, 103, 134-148, doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.033.

6. *Morsy, M. S., Alsayed, S. H. et al.* Development of eco-friendly binder using metakaolin-fly ash–lime-anhydrous gypsum. *Constr. Build. Mater.* 2012, 35, 772 – 777, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.142.

7. *Marinova, F., Simonov, B., Zaharieva, R., Kandulkova, Y.* Prilozhenie na retsiklirana keramika za modifitsirane na varovi raztvori za restavratsia na zidarii ot rimskia period. *Godishnik na UASG*, 2024, 57 (4): 1503 – 1512.

8. *Weimann, K., Adam, C. et al.* Environmental Evaluation of Gypsum, Plasterboard Recycling. *Minerals* 2021, 11(2), 101, doi.org/10.3390/min11020101.

9. *Geraldo, R. H., Pinheiro, S. M. M. et al.* Camarini, G. Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *J. Clean. Prod.* 2017, 164, 288 – 300, doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188.

10. *Zaharieva, R., Simonov, B.* Vliyanie na tehnologichnite parametri pri retsiklirane na stroitelni otpadatsi ot gipsokarton varhu svoystvata na retsiklirania gips. *Godishnik na UASG*, 2023, 56 (3): 921 – 930.

11. BDS EN 197-1:2011; Ciment. Chast 1: Sastav, iziskvania i kriterii za saotvetstvie za obiknoveni cementi.

12. BDS EN 196-6:2019; Metodi za izpitvane na tsiment. Chast 6: Opredeleyane na finost.

13. BDS 166:1972; Dobavki aktivni mineralni kam svarzvashtite veshtestva.

14. BDS 16720:1987; Dobavki aktivni mineralni ot estestven proizvod za tsiment. Tehnicheski iziskvania. Metodi za izpitvane.

15. TU 21-31-62-89; Gipsotsementnopolutstsolanovoe vyazhushtee. Tehnicheskie uslovia. Moskovskiy inzhenerno-stroitelnyy institut im. V.V. Kuibysheva: Moskva, Rossia, 1989 (in Russian).

16. *Zaharieva, R., Evlogiev, D. et al.* Modification of Quaternary Clays Using Recycled Fines from Construction and Demolition Waste. *Processes* 2022, 10(6), 1062, doi.org/10.3390/pr10061062.

17. BDS EN 196-1:2016; Metodi za izpitvane na tsiment. Chast 1: Opredeleyane na yakost.

PECULIARITIES OF STRUCTURE FORMATION OF BLENDED GYPSUM-CEMENT-POZZOLAN BINDERS

B. Simonov¹

Keywords: *green binder, recycled gypsum, natural zeolite, softening coefficient, compressive strength, XRD, DTA/TG*

ABSTRACT

Gypsum-cement-pozzolan binders (GCPB) offer the potential to reduce the environmental footprint of construction, particularly through the use of recycled gypsum obtained from construction waste. GCPBs are characterised by rapid setting and hardening, as well as increased water resistance compared to gypsum compositions. The structure formation processes in GCPBs exhibit several specific features and the use of recycled gypsum may introduce additional particularities. The present study aims to investigate the behavior of GCPBs with improved properties, in which the gypsum component is recycled from gypsum plasterboard waste, the cement content does not exceed 35 %, and natural zeolite, used as a pozzolanic additive, is applied without any additional processing. The research focuses on the structure formation process, strength development kinetics, and water resistance of two binder compositions with different cement-to-zeolite ratios (1:1 and 1:0,6), cured under both air-dry and underwater conditions. Standardized testing methods for binders were employed, complemented by X-ray diffraction (XRD) and differential thermal analysis (DTA). The results indicate that the structure formation and system stability depend strongly on both the composition and curing conditions. It has been established that the process of structure formation depends on the composition and aging conditions: the 1:1 ratio of cement and zeolite is more favorable for achieving stability of the system over time even under water and leads to higher strength (up to 30 MPa). Based on the construction and technical indicators of the research compositions, gypsum-cement-pozzolan binders based on recycled gypsum can be used without restrictions in environments with increased humidity for plaster and masonry mortars, masonry units and thin-walled composite elements.

¹ Borislav Simonov, Civ. Eng., Centre of Competencies “Clean&Circle”, Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: simonov_fce@uacg.bg