

**СРАВНИТЕЛНИ ИЗПИТВАНИЯ НА ТОРКРЕТБЕТОНИ,
ПРЕДНАЗНАЧЕНИ ЗА РЕМОНТНО-ВЪЗСТАНОВИТЕЛНИ РАБОТИ
ЧРЕЗ СУХО И МОКРО ПОЛАГАНЕ
ЧАСТ I: ФИЗИКО-МЕХАНИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Валерий Найденов¹, Иван Ростовски²

**COMPARATIVE TESTS OF SPRAYED CONCRETE, INTENDED FOR
REPAIR AND RESTORATION WORKS BY DRY AND WET SPRAYING
PART I: PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS**

Valeriy Naidenov¹, Ivan Rostovsky²

Abstract:

The basic principles of sprayed concrete mix design are reviewed. The technological options for use of the material for repairs and restoration works, executed by “wet” and “dry” spraying methods, are analysed.

Widespread research program is developed and implemented for assessment of the main physical-mechanical and structural characteristics of sprayed concrete for repairs and restoration works. New (author’s) compositions are prepared for this purpose, which are subjected to series of tests, together with factory made products, in form of dry mixes, by leading producers. Two compositions of sprayed concrete are chosen after preliminary selection – conventional for “dry” spraying and specially designed hybrid fiber-reinforced high-tech sprayed concrete for “wet” application method. The numerous additional components are included in the composition of the latter – high range water-reducing admixture based on polycarboxylate ether, polymeric modifier for enhancing of fresh mix compactness and rebound decreasing and new generation deep capillary-crystalline admixture.

Original scientific results are obtained concerning the basic physical-mechanical and stress-strain characteristics of both compositions of sprayed concrete. The critical comparative analysis of the results is presented and the right options for the application of the compositions are suggested.

Keywords:

Sprayed Concrete, Dry Spraying, Wet Spraying, Fiber Reinforcement, Capillary Crystalline Admixture.

¹ Валерий Найденов, доц. д-р инж., направление „Физико-химична механика“, Институт по механика - БАН, 1113 София, ул. Акад. Г. Бончев, бл. 1; *e-mail*: valna53@mail.bg;

Valeriy Naidenov, Assoc. Prof., PhD, Eng., Physico-Chemical Mechanics, Institute of Mechanics – BAS, Acad. G. Bonchev st., bl. 1, 1113 Sofia, Bulgaria; *e-mail*: valna53@mail.bg.

² Иван Ростовски, доц. д-р инж., катедра „Строителни материали и изолации“, Строителен факултет, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, *e-mail*: i_rostovsky@abv.bg;

Ivan Rostovsky, Assoc. Prof., PhD, Eng., Department of Building Materials and Insulations, Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., 1046 Sofia, Bulgaria; *e-mail*: i_rostovsky@abv.bg.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Използването на пръскан бетон (торкрет) е ефективен за възстановяването на напречното сечение, респ. коравината и носещата способност, на бетонни и стоманобетонни конструкции [1,2]. При подходящо проектиран състав и спазване на технологичната дисциплина по време на изпълнение, пръсканият бетон се характеризира с висока якост, плътност и непроницаемост, което е от първостепенна значимост при осигуряване на дълготрайността на третираните конструкции или отделни конструктивни елементи.

В съвременната строителна практика се използват два метода на пръскане – сух и мокър (влажен). При сухия метод, съставните материали на пръскания бетон се подават разделно – от една страна сухите компоненти (цимент, добавки, добавъчни материали, влакна и др.), а от друга – водата. Смесването на компонентите става във въздуха, по време на движение – между дюзата за пръскане и повърхността, върху която се напластява бетона. Тази технология дава възможност за постигане на ниско водоциментно отношение, висока якост и оттам – редуцирано количество на цимента, необходимо за гарантиране на свойствата на втвърдения бетон. Обикновено, тази редукция е около 50 kg цимент за кубичен метър бетон – 350 – 450 kg за m^3 при сухия метод, срещу 400 – 500 kg – при мокрия [3]. За съжаление, при сухия метод е необходимо да се използват прецизни дозираци устройства, което води до намаляване на производителността. Алтернативата е да се работи със сухи смеси, произведени в заводски условия, които се доставят на обектите в торби с различна маса (обикновено 25 kg). В този случай се стига до значително оскъпяване на крайния продукт, като в зависимост от състава може да се стигне до цена 2,00 – 2,50 лв. за kg-суха смес.

2. СЪСТАВ НА БЕТОНА

Зърнометричният състав на добавъчните материали при пръсканите бетони се влияе от два основни фактора – физичен и технологичен.



Фигура 1. Препоръчителна зърнометрична крива на добавъчен материал за пръскан бетон, съгласно [3]

С цел постигане на максимална обемна концентрация на добавъчните материали, минимални обемни изменения, висок модул на еластичност, дълготрайност и пр., е необходимо да се използват добавъчни материали с непрекъснат зърнометричен състав

(виж фиг. 1). Казаното е в сила и за обикновените бетони. За гарантиране на висока адхезия с основата и минимален отскок е необходимо са се осигури минимално количество на фините частици, с размер до 0,25 mm, в диапазона от 11 до 26 %. По-ниската стойност се отнася за пръсканите бетони с по-ниска якост, при които и количеството на цимента е по-малка. Това съдържание на фини частици и значително по-високо, в сравнение с обикновените бетони, дори тези, предназначени за полагане с бетон-помпа. Завишеното съдържание на фини частици води до значително нарастване на специфичната повърхнина на добавъчните материали и до увеличена кохезия на бетонната смес.

Едрият добавъчен материал е в количество от 0 до 25 %, от общото количество на добавъчните материали, като едрината му не бива да надхвърля 16 mm. Най-често, ако се използва едър добавъчен материал, се прилага такъв от фракция 4/8 mm и то в ограничено количество, поради опасност от увеличаване на отскока (рикошета).

В настоящия случай, след предварителна селекция на съставните материали, е изготвен състав за мокро полагане (WS), т.е. във вид на готова бетонна смес. Това е напълно оправдано, тъй като на сравнително малко разстояние до обекта се намира бетонов възел, който е в състояние без проблеми да изготви необходимите количества бетонна смес. При това не се налага до обекта да се транспортират големи количества добавъчни материали и цимент, каквито са необходими за пръскане по сух способ. Спестяват се и дозиращите устройства за цимента и добавъчните материали. Постига се значително по-голяма производителност на труда.

На бетоновия възел лесно може да се гарантира постоянство и повторемост на състава.

Използван е сулфатоустойчив портландцимент – СЕМ I 42,5R SR-5, в количество 500 kg за кубичен метър бетон. Количеството на направната вода се редуцира значително чрез използване на силно-водонамаляваща химична добавка на основа поликарбоксилат естер, която в случая действа изключително ефективно, поради високото съдържание на фини фракции в сместа. Допълнително в състава е внесен полимерен модификатор за повишаване компактността на бетонната смес и понижаване на рикошета. Чрез добавяне на капилярен кристализатор от ново поколение се получава абсолютна водонепропускливост на втвърдения бетон. Влагането на влакна позволява да се подобри дуктилността, ударната жилавост, пукнатинната устойчивост и други важни свойства на втвърдения материал. Проведени са паралелни изпитвания и върху пръскан бетон, получен чрез сухо полагане (DS), като е използван търговски продукт, който се предлага във вид на готова смес в торби.

3. ОСНОВА

Условията, които трябва да бъдат спазени при изпълнение на пръскан бетон, за да се гарантира задоволително ниво на качество на пръскания бетон са разписани подробно в EFNARC European Specification For Sprayed Concrete и БДС EN 14487-2:2007 [4]. За конкретния случай, те могат да бъдат обобщени, както следва:

- ако се очаква околната температура да е под 0 °C по време на торкретирането или в периода на отлежаване, трябва да се планират мерки за предпазване на бетона от замръзване. В случая се работи на открито, по съоръжения със значителни габарити и такива мерки практически не могат да се вземат, поради това при отрицателни температури е уместно да се преустанови работа;

- торкрет бетонът трябва се полага върху напълно чиста, грапава и ненарушена повърхност. За почистване и награвяване на основата се препоръчват вода под високо налягане (хидробластиране) или песъкоструене;

- бетон с микропукнатини и разслоявания, включително такива, причинени от техниките на почистване, награвяване или отстраняване, който намалява сцеплението или структурната цялост, трябва да се отстрани или поправи след това;

- основата, върху която ще се извършва пръскането трябва да бъде предварително водонапита, но без по повърхността ѝ да има мокри петна или локви, тъй като това може да доведе до влошаване на здравината на връзката между основата и пръскания бетон. Поради това, че работата се извършва на открито, при валеж, работата трябва да се прекъсне до спирането му и оттичането на повърхностните води;

- тъй като обработването на повърхността на пресния торкрет бетон може да навреди на адхезията и на якостта, обикновено торкрет бетонът трябва да се остави, както е положен, освен ако характеристиките на торкретирания материал допускат друго и това е документирано.

Съгласувано между заинтересованите страни бе избрано място и бе подготвен опитен участък на кота 0,00 на силос за тежка сода за експериментално полагане на двата състава за торкретиране - този на база сух торкрет DS и дефинирания като ново техническо предложение WS - за торкретиране по "мокър" способ.

Апликаторът извършва подготовка на основата за полагане – осигуряване на параметри на повърхността за торкретиране, вкл. предварително позициониране и анкериране на заварена стоманена мрежа, както и нейната антикорозионна защита. По този начин се създават необходимите предпоставки за експерименталното полагане при еднакви за двата метода условия (фиг. 2).



Фигура 2. Подготвена повърхност с анкерирана стоманена мрежа

4. ПРОБНИ ТЕЛА

За целите на стандартизираното пробовземане, съгл. изискванията на БДС EN 14488-1, за доказване техническите характеристики на двата състава, предварително са осигурени необходимите кофражни форми - дървени сандъци за оформяне на т.н. "пити", върху които бе извършено пръскане, като от тях по-късно да бъдат изрязани чрез сондиране на необходимите пробни тела (ядки) за доказване техническите характеристики на двата състава. От получените „пити“ са изрязани сондажни ядки с диаметър 100 mm и височина, равна на положения слой торкретбетон – респ. 150 и 200 mm (фиг. 3 и фиг. 4).

От сондажните ядки, чрез нарязване и подравняване са получени цилиндрични пробни тела с диаметър на основата 100 mm и височина 100 mm и 200 mm. Пробните тела се съхраняват при лабораторни условия и се изпитват на две, предварително съгласувани възрасти – 7 денонощия и 28 денонощия.

Определени са показателите на основни механични характеристики на втвърдения бетон – якост на натиск, стабилизирания модул на еластичност при натиск, скорост на

разпространение на ултразуков импулс и др., които позволяват да се прогнозира поведението и дълготрайността на възстановената конструкция.



Фигура 3. Изрязване на сондажни ядки



Фигура 4. Ядки от състав DS (ляво) и WS (дясно) - визуално сравнение

5. РЕЗУЛТАТИ

Всички изпитвания са проведени в Университетската строителна изпитвателна лаборатория (УСИЛ), която притежава валиден сертификат за акредитация за съответните стандартизирани методи.

5.1. Якост на натиск

Тъй като якостта на натиск се определя чрез изпитването на ядки с различни размери, процедурата предвижда използването на корекционни коефициенти за размера на извадените ядки съгласно таблица NA.4 на БДС EN 206/NA:2017 (Табл. 1). Обемната плътност е изчислена, след измерване на точните размери на пробните тела.

Получените резултати са представени в табл. 1.

Таблица 1. Обемна плътност и якост на натиск (на 7- и 28-дневна възраст)

Състав	Обемна плътност (kg/m^3) на възраст на възраст, (дни)		Якост на натиск (MPa) на възраст, (дни)	
	7 дни	28 дни	7 дни	28 дни
DS	2236	2225	36,10	43,80
	2212	2220	32,20	45,90
	2237	2233	33,90	43,00
	Средно: 2230	Средно: 2230	Средно: 34,00	Средно: 44,20
WS	2322	2292	49,50	57,40
	2305	2306	55,30	60,60
	2316	2290	51,10	62,40
	Средно: 2320	Средно: 2300	Средно: 51,90	Средно: 60,10

5.2. Скорост на разпространение на ултразуков импулс

Определянето се извършва съгл. изискванията на БДС EN 12504-4:2005 – фиг.5. Ултразуковите трептения са механични трептения на материалната среда с честота от 20

до 200 Hz. Импулсният ултразвуков метод се основава на създаването на кратко механично трептене (импулс) от ултразвуков излъчвател, което се предава на бетона. След преминаването си през бетона ултразвуковите трептения достигат приемника на уреда. Методиката на изпитването е свързана основно с определяне на времето за преминаване на ултразвуковия импулс през бетонното сечение и определяне скоростта на неговото разпространение. Скоростта на разпространение на звука се явява в пряка зависимост от т.нар. динамичен модул на еластичност и плътността на бетона, която е определящ фактор за неговата якост на натиск – (1).

$$v = \sqrt{\frac{K \cdot E_d}{\rho}}, \quad (1)$$

v – скорост на ултразвуковия импулс, km/s;

E_d – динамичен модул на еластичност на бетона, МРа;

ρ – плътност на бетона, kg/m³;

K – корекционен коефициент

$$K = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}, \quad (2)$$

μ - коефициент на Поасон на бетона, равен на 0,2 (съгласно Еврокод 2);

Зависимостта между якостта на натиск на бетона и скоростта на ултразвука може да бъде изразена чрез тарировъчни криви, таблици или аналитични зависимости.



Фигура 5. Прозвучаване с ултразвуков апарат

Получените резултати от прозвучаването са представени в Табл. 2.

Таблица 2. Скорост на разпространение на ултразвук през бетона

Състав	Скорост на разпространение на ултразвук на възраст (дни), km/s	
	7 дни	28 дни
DS	4,184	4,292
	4,237	4,405
	4,184	4,301
	Средно: 4,202	Средно: 4,333
	4,619	4,684
WS	4,484	4,515
	4,246	4,329
	Средно: 4,450	Средно: 4,509

5.3. Стабилизиран статичен модул на еластичност при натиск

Определянето на стабилизирания статичен модул на еластичност при натиск, се извършва съгласно изискванията на БДС EN 12390-13 – метод „В“, който в тази част е практически идентичен с ISO 1920-10 (фиг. 6).

Използвани са цилиндрични пробни тела, изрязани от конструкцията с отношение диаметър на основата към височина, равно на 1:2.



Фигура 6. Опитна постановка за определяне на статичния модул на еластичност при натиск

Резултатите от изпитването са показани в таблица 3.

Таблица 3. Стабилизиран модул на еластичност при натиск

Състав	Стабилизиран модул (GPa) на възраст, дни	
	7 дни	28 дни
DS	24,20	29,60
	23,70	29,10
	24,10	27,60
	Средно: 24,00	Средно: 28,80
WS	36,40	37,60
	35,00	37,30
	35,90	36,80
	Средно: 35,80	Средно: 37,20

5.4. Дълбочина на проникване на вода под налягане

Изпитването е проведено съгласно БДС EN 12390-8.



Фигура 6. Определяне на дълбочина на проникване на вода под налягане

Използваните пробни тела са цилиндри, с диаметър и височина 150 mm. измерените дълбочини на проникване на водата, са показани в таблица 4.

Таблица 4 Дълбочина на проникване на вода под налягане

Състав	Дълбочина на проникване (mm) на вода под налягане на възраст, дни	
	7 дни	28 дни
DS	48	36
	38	32
	46	38
	Средно: 44	Средно: 35
WS	38	22
	38	16
	25	21
	Средно: 34	Средно: 20

5.5. Якост на опън при разцепване

Изпитването е проведено според БДС EN 12390-6 (фиг. 7) , а получените резултати са показани в таблица 5.



Фигура 7. Определяне на якост на опън при разцепване

Таблица 5 Якост на опън при разцепване на пръскания бетон

Състав	Якост на опън при разцепване (MPa) на възраст, дни	
	7 дни	28 дни
DS	2,09	3,51
	1,81	3,20
	2,15	2,83
	Средно: 2,02	Средно: 3,18
WS	2,82	3,43
	2,21	3,40
	2,15	3,34
	Средно: 2,39	Средно: 3,39

5.6. Мразоустойчивост по ускорен метод

Мразоустойчивостта е определяна съгл. изискванията на БДС EN 206:2015/NA:2017 NA.O.2 Ускорен метод за определяне на мразоустойчивостта на втвърден бетон чрез замразяване и размразяване в разтвор на натриев хлорид.

Пробните тела се насищат, замразяват и размразяват в среда от воден разтвор на натриев хлорид в хладилна камера с възможност да поддържа температура по-ниска от минус 35°C (-35°C), за препоръчване до минус 50°C. Масата на пробните тела се измерва с везна с точност $\pm 0,1g$ и обхват с не по-малко от 50% повече от масата на пробните тела;

Пробните тела се изсушават до постоянна маса, след което се насищат с 5% разтвор на натриев хлорид. В рамките на едно денонощие се изпълнява най-малко един цикъл замразяване и размразяване. Изпитването се изпълнява непрекъснато. При принудително прекъсване, пробните тела се съхраняват в 5% разтвор на натриев хлорид.

Таблица 6 Резултати от изпитване на мразоустойчивост по ускорен метод

Състав	Загуба на маса след, %	
	4 цикъла (еквивалентни на клас по мразоустойчивост $C_{fr} 150$)	5 цикъла (еквивалентни на клас по мразоустойчивост $C_{fr} 200$)
DS	1,00	3,10
	1,70	3,00
	0,80	3,20
	Средно: 1,20 < 2,00 (издържал изпитването за клас по мразоустойчивост $C_{fr} 150$)	Средно: 3,10 > 2,00 (не издържал изпитването за клас по мразоустойчивост $C_{fr} 200$)
WS	0,00	0,30
	0,00	0,30
	0,00	0,40
	Средно: 0,00 < 2,00 (издържал изпитването за клас по мразоустойчивост $C_{fr} 150$)	Средно: 0,30 < 2,00 (издържал изпитването за клас по мразоустойчивост $C_{fr} 200$)



Фигура 8 WS - общ вид на пробните тела след 5 цикъла – нулева загуба на маса



Фигура 9 DS - общ вид на пробните тела след 5 цикъла

6. КОМЕНТАР

Получените резултати от проведените стандартизирани изпитвания върху двата състава пръскан бетон дават възможност да се направят следните по-важни констатации и коментари:

- сравнен със състава за "сухо" пръскане DS предложеният състав WS притежава по-висока обемна плътност на 7- и 28-дневна възраст, като демонстрира и по-висока якост на натиск и якост на опън при разцепване на изследваните възрасти;
- предложеният състав за "мокро" пръскане WS показва по-висока скорост на разпространение на ултразвук на 7- и 28-дневна възраст, което е в пряка връзка с по-високите му якостни показатели на изследваните възрасти;
- предложеният състав WS показва значително по-високи стойности на изследвания стабилизиран модул на еластични деформации при натоварване на натиск на двете изследвани възрасти;
- предложеният състав за WS показва значително по-ниска проникваемост, за която се очаква да намалее допълнително (до 0) след периодично третиране с вода под налягане, поради наличието на капилярен кристализатор;
- сравнен със състава за "сухо" пръскане DS, предложеният състав WS демонстрира максимално висок клас по мразоустойчивост клас $C_{fr}200$ при доказана незначителна загуба на маса. В същото време съставът DS покрива по-ниските изискванията за клас по мразоустойчивост $C_{fr}150$. Последното не кореспондира със заявените претенции на производителя, описани в техническия лист на материала на български език..

Продължава в част 2.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ACI RAP Bulletin 12, Concrete Repair by Shotcrete Application
- [2] Austin S., Sprayed Concrete Technology, The Proceedings of the ACI/SCA International Conference on Sprayed Concrete/Shotcrete, ISBN 0-203-78536-3, Taylor & Francis e-Library, 2005;
- [3] European Specification For Sprayed Concrete – Guidelines for specifiers and contractors, EFNARC, 1999;
- [4] БДС EN 14487-2:2007 Торкретбетон. Част 2: Изпълнение;
- [5] БДС EN 14488-1:2006 Испитване на торкретбетон. Част 1: Вземане на проби от бетонна смес и втвърден бетон;