

Университет по Архитектура, Строителство и Геодезия,  
София, България  
Катедра „Строителни материали и изоляции”

Университет Артоа,  
Бетюн, Франция  
Лаборатория по геоматериали

# Дисертация

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА РЕЦЕПТУРНИ И  
ТЕХНОЛОГИЧНИ ФАКТОРИ ВЪРХУ МЕХАНИЧНИТЕ  
СВОЙСТВА НА СУПЕРВИСОКОЯКОСТНИТЕ БЕТОНИ (СВЯБ)

.....  
инж. Емануела Емануилова Манолова



февруари, 2014

# ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА РЕЦЕПТУРНИ И ТЕХНОЛОГИЧНИ ФАКТОРИ ВЪРХУ МЕХАНИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА СУПЕРВИСОКОЯКОСТНИТЕ БЕТОНИ (СВЯБ)

дисертационен труд за придобиване на научна и образователна степен „доктор“ по научна специалност 02.15.05 „Строителни материали, изделия и технология на производството им“

докторант:

инж. Емануела Емануилова Манолова

научни ръководители:

доц. д-р инж. Румяна Захариева

Университет по Архитектура, Строителство и Геодезия, България

и

проф. д-р инж. Ерик Виркен

Университет Артоа, Франция



## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторът иска да изрази своята благодарност към научния си ръководител доц. д-р инж. РУМЯНА ЗАХАРИЕВА за целия период на ръководене, напътствия и подкрепа по време на дисертационната работа. Също така изразява своята признателност и към проф. д-р инж. ЕРИК ВИРКЕН, като негов втори научен ръководител, за оказаната помощ, разбиране и насърчаване.

Авторът изказва благодарност на всички преподаватели от катедра „Строителни материали и изолации“ към УАСГ за безценните напътствия, професионален опит и кураж, които са му дали по време на дисертацията. Специална признателност към всички лаборанти от катедра „Строителни материали и изолации“, както и от „Масивни конструкции“ и „Метални, дървени и пластмасови конструкции“ към УАСГ, за безрезервната помощ при провеждането на експерименталната част от разработката.

Специални благодарности на доц. В. Найденов и доц. Р. Кръстев от Института по Механика към БАН, на проф. А. Караманов, инж. Е. Караманова, доц. Б. Рангелов и ас. С. Атанасова-Владиминова от Института по Физикохимия към БАН и ас. А. Гилова от Института по Електрохимия и Енергийни системи към БАН.

Авторът иска да изкаже благодарност на Лабораторията по Геоматериали (ЛГУА) към Université D’Artois, за съгласието да е приемаща френска страна, при осъществяването на съвместна докторантура между УАСГ, София и Université D’Artois, Франция.

Признателност към Фонд „Научни изследвания“, благодарение на който бяха финансирани голяма част от експериментите в дисертационния труд, като част от голям научно-приложен проект (по договор ДДВУ 02/86 от 20.12.2010г.), с работно заглавие „Супервисокоякоостни бетони – алтернатива за изграждане на високи сгради и транспортни съоръжения в Р. България“. Проектът има за цел да послужи за основа при внедряването на този специален бетон, като нов конструкционен материал в българската строителна практика.

Авторът оценява помощта и изпратените материали от фирма BASF© и по-специално на Таня Кралова и Емил Демирев. Също така благодари и на фирмите: SIKА©, Don Construction©, MAREI©, JBI©, циментовите заводи – „Девня цимент“, „Титан АД“ и „Холсим България АД“.

Последно, но не по важност, авторът благодари на семейството си и всички близки хора, без които настоящата дирестационна работа не би била реализирана.

Емануела Манолова  
София, Януари, 2014



## СЪДЪРЖАНИЕ

ИЗПОЛЗВАНИ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	12
I ГЛАВА <a href="#">ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР И АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩОТО СЪСТОЯНИЕ</a> .....	16
<b>1. Същност на СВЯБ и мястото му сред бетоните със специално предназначение.....</b>	<b>18</b>
1.1. Историческа справка върху създаването на СВЯБ.....	18
1.2. Класификация на високотехнологичните бетони.....	19
1.3. Области на приложение на СВЯБ.....	20
1.4. Пред-история на създаването на СВЯБ в България.....	21
<b>2. Особенности на състава на СВЯБ в сравнение с този на обикновените бетони .....</b>	<b>22</b>
2.1. Критерии за избор на съставните материали за направата на СВЯБ.....	24
2.1.1. Свързващи вещества и активни минерални добавки.....	24
2.1.2. Добавъчен материал.....	26
2.1.3. Химически добавки.....	27
2.1.4. Влакнеста армировка.....	29
2.2. Граници на вариране на водо-циментно и водо-свързващо отношения.....	32
2.3. Начини за постигане на максимална плътност на СВЯБ.....	34
2.3.1. Метод чрез пространствено уплътняване.....	34
2.3.2. Метод чрез използване на референтни зърнометрични криви.....	35
<b>3. Технологични особености на СВЯБ .....</b>	<b>37</b>
<b>4. Изследвания върху макро- и микроструктурата на СВЯБ .....</b>	<b>39</b>
4.1. Макроструктура на СВЯБ.....	39
4.2. Микроструктура на СВЯБ.....	40
4.2.1. Физическа структура .....	41
4.2.1.1. Особенности на поровото пространство .....	41
4.2.1.2. Структура на гела.....	44
4.2.1.3. Контактни зони .....	45
4.2.2. Химична структура .....	47
4.2.2.1. Степен на хидратация.....	47
4.2.2.2. Екзотермия .....	49
4.2.2.3. Съсъхване .....	51
<b>5. Механични свойства на втвърдения СВЯБ .....</b>	<b>53</b>
5.1. Якости при краткотрайни статични натоварвания .....	53
5.1.1. Якост на натиск.....	53
5.1.1.1. Влияние на състава на матицата и технологични параметри.....	53
5.1.1.2. Влияние на методите за изпитване .....	53
5.1.1.3. Влияние на влакнестата армировка.....	54

5.1.1.4	Влияние на топло-влажностната обработка.....	54
5.1.2	Якост на опън .....	54
5.1.3	Якост на опън при огъване .....	57
5.2	Якости при краткотрайно динамично натоварване .....	59
5.3	Деформационни характеристики .....	60
5.3.1	Модул на линейни еластични деформации .....	60
5.3.2	Коефициент на Поасон .....	62
5.4	Енергия на разрушението .....	64
5.4.1	Ударна жилавост ( <i>Fracture toughness (<math>G_f</math>)</i> ) .....	64
5.4.1.1	Методика за изчисляване .....	64
5.4.1.1.1	Първа пукнатина .....	65
5.4.1.1.2	Надлъжна деформация в опънна зона.....	66
5.4.1.1.3	Фиксирано максимално провисване .....	68
5.4.1.1.4	Фиксирани стойности на остатъчното натоварване .....	68
5.4.1.2	Параметри за оценка .....	72
5.4.1.2.1	Индекси на пластично разрушение .....	72
5.4.1.2.2	Фактор на остатъчна якост .....	73
5.4.1.2.3	Характеристична дължина ( $l_{ch}$ ) и дуктилна дължина ( $D_l$ ) .....	74
5.4.1.2.4	Необходима енергия за пукнатинообразуване ( $G_{ci}^*$ ) .....	75
5.4.2	Енергия на разрушението ( <i>Fracture energy (<math>G_f</math>)</i> ).....	76
5.4.3	Абсорбционна способност ( <i>Energy absorption (<math>I_t</math>)</i> ).....	77
	Използвана литература I-ва глава.....	78
	II ГЛАВА <a href="#">ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА</a> .....	94
	III ГЛАВА <a href="#">МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА</a> .....	1000
<b>1.</b>	<b>Подход</b> .....	102
<b>2.</b>	<b>Предварителни изследвания</b> .....	103
<b>3.</b>	<b>Характеризация на избраните материали</b> .....	106
2.1	Цимент.....	108
2.2	Микросилициев прах (МСП) .....	108
2.3	Пясък .....	109
2.4	Кварцово брашно .....	110
2.5	Едър добавъчен материал (ЕДМ) .....	110
2.6	Суперпластифицираща химическа добавка (СП).....	111
2.7	Вода.....	112
2.8	Дисперсна армировка.....	112
2.8.1	Стоманени влакна.....	112
2.8.2	Полипропиленови влакна.....	113

<b>3</b>	<b>Планиране на експеримента</b> .....	114
<b>4</b>	<b>Изследвания върху пресния бетон</b> .....	118
4.1	Приготвяне на бетонната смес.....	118
4.2	Обработваемост.....	119
4.2.1	Определяне на консистенцията чрез стръскваща масичка по БДС EN 1015-3:2001/A2:2008.....	119
4.2.2	Определяне на консистенцията чрез уреда на Vebe по БДС EN 12350-3:2009.....	119
4.3	Съдържание на въздух.....	120
4.4	Време за структуриране.....	121
4.5	Калориметрия.....	121
<b>5</b>	<b>Изготвяне, отлежаване и третиране на пробни тела</b> .....	122
5.1	Пробни тела.....	122
5.2	Режими на отлежаване на пробни тела.....	123
5.2.1	Суха среда.....	123
5.2.2	Въздушно-суха среда.....	123
5.2.3	Влажна среда.....	124
5.2.4	Под вода.....	124
5.3	Топло-влажностна обработка.....	124
5.3.1	Пропарване.....	124
5.3.2	Автоклавиране.....	125
<b>6</b>	<b>Микроструктурни изследвания</b> .....	125
6.1	Диференциално Термичен Анализ (ДТА).....	126
6.2	Термогравиметричен Анализ/ Диференциален Термогравиметричен Анализ (ТГА/ДТГА).....	127
6.3	Порьозиметрия.....	127
6.4	Сканираща електронна микроскопия (СЕМ).....	129
<b>7</b>	<b>Определяне на някои хидрофизични свойства на втвърдения бетон</b> .....	130
7.1	Физични свойства.....	130
7.1.1	Обемна плътност.....	130
7.1.2	Специфична плътност.....	131
7.1.3	Относителна плътност.....	131
7.1.4	Относителна порестост.....	132
7.2	Хидрофизически свойства.....	132
7.2.1	Водонапиване.....	132
7.2.2	Водонасищане.....	133
7.2.3	Коефициент на водонасищане.....	134
7.2.4	Капилярна водопопиваемост.....	134
7.2.5	Съсъхване и набъбване.....	135



<b>8</b>	<b>Определяне на механичните свойства на втвърдения бетон.....</b>	<b>136</b>
8.1	Якостни характеристики при краткотрайно статично натоварване.....	136
8.1.1	Якост на опън при огъване.....	136
8.1.2	Якост на натиск.....	137
8.1.3	Якост на опън при разцепване.....	138
8.2	Ударна якост/жилавост.....	138
8.3	Изтриваемост/Износоустойчивост.....	139
8.4	Деформационни характеристики при натоварване.....	141
8.4.1	Модул на линейни еластични деформации (Е-модул).....	141
8.4.2	Коефициент на Поасон.....	142
8.4.3	Провисване при огъване.....	143
8.4.4	Надлъжна деформация в опънна зона при изпитване на огъване.....	146
8.5	Енергия на разрушението .....	148
8.5.1	Определяне на индексите на жилавост по методиката на ASTM C 1018-97 и ASTM C 1609/C 1609M-10.....	148
8.5.2	Определяне енергията на разрушение $G_f$ при фиксирано максимално провисване, съгласно препоръките на RILEM 50-FMC.....	150
8.5.3	Определяне енергията на разрушение $G_f$ , съответстваща на фиксирана остатъчна носимоспособност.....	142
	Използвана литература III-та глава.....	153
<b>IV</b>	<b>ГЛАВА <a href="#">ОПТИМИЗИРАНЕ НА СЪСТАВА НА СВЯБ</a>.....</b>	<b>158</b>
1.	<b>Особености при проектиране на състава на СВЯБ.....</b>	<b>160</b>
2.	<b>Резултати от изследванията с предварителен характер.....</b>	<b>161</b>
3.	<b>Модифициране на скелета от зърнести материали на матрицата.....</b>	<b>164</b>
3.1	Метод чрез пространствено уплътняване.....	165
3.2	Метод чрез използване на референтна зърнометрична крива.....	168
4.	<b>Оптимизиране на състава на матрицата посредством прилагане на математическата теория на планиране на експеримента.....</b>	<b>171</b>
5.	<b>Влакнесто армирани композити от СВЯБ.....</b>	<b>175</b>
5.1	Особености при избора на влакнеста армировка с оглед постигане на желани свойства.....	175
5.2	Първоначални резултати от въвеждането на влакнеста армировка.....	177
	Използвана литература IV-та глава.....	182
<b>V</b>	<b>ГЛАВА <a href="#">СТРУКТУРИРАНЕ НА СВЯБ</a>.....</b>	<b>184</b>
1.	<b>Поведение на бетонната смес.....</b>	<b>186</b>

1.1	Влияние на рецептурни параметри .....	186
1.2	Влияние на технологични параметри.....	187
<b>2.</b>	<b>Кинетика на хидратацията.....</b>	<b>190</b>
2.1	Екзотермия .....	190
2.2	Структурни изменения в бетонната смес във времето.....	193
<b>3.</b>	<b>Особености на макроструктурата.....</b>	<b>194</b>
3.1	Параметри на състоянието.....	194
3.2	Хидро-физични свойства.....	196
3.2.1	Водонапиване и водонасищане на СВЯБ.....	196
3.2.2	Капилярна водопопиваемост.....	197
3.3	Линейни деформации .....	199
3.3.1	Влияние на рецептурни параметри .....	199
3.3.2	Влияние на технологични параметри.....	203
<b>4.</b>	<b>Изменение на микроструктурата във времето.....</b>	<b>205</b>
4.1	Влияние на рецептурни параметри .....	205
4.2	Влияние на технологичните параметри.....	211
4.2.1	Влияние на времето на отлежаване.....	211
4.2.2	Влияние на условията на отлежаване .....	215
	Използвана литература V-та глава.....	228
	VI ГЛАВА МЕХАНИЧНИ СВОЙСТВА.....	232
<b>1.</b>	<b>Поведение при натиск.....</b>	<b>234</b>
1.1	Якостни характеристики.....	234
1.1.1	Влияние на рецептурни параметри .....	234
1.1.2	Влияние на технологични параметри върху якостните свойства.....	243
1.1.3	Влияние на вида и размерите на пробните тела (тук се има предвид гредички 4/4/16 и кубчета 5/5/5).....	249
1.2	Деформационни характеристики .....	250
1.2.1	Модул на линейни еластични деформации (Е-модул).....	250
1.2.1.1	Влияние на рецептурни параметри .....	250
1.2.1.2	Влияние на технологични параметри .....	254
1.2.2	Коефициент на Поасон.....	255
1.2.2.1	Влияние на рецептурни параметри .....	255
1.2.2.2	Влияние на технологични параметри .....	256
<b>2.</b>	<b>Якост на опън при разцепване.....</b>	<b>257</b>

<b>3. Поведение при огъване.....</b>	<b>257</b>
3.1 Якоствни характеристики.....	258
3.1.1 Влияние на рецептурни параметри .....	258
3.1.2 Влияние на технологичните параметри .....	264
3.2 Особенности на работните диаграми при натоварване на огъване.....	265
3.2.1 Влияние на влакнестата армировка.....	265
3.2.1.1 Стоманени влакна.....	265
3.2.1.2 Микрополипропиленови влакна.....	271
3.2.1.3 Хибридна армировка.....	272
3.2.2 Влияние на технологичните параметри (топло-влажностна обработка - пропарване и автоклавиране).....	275
3.3 Енергия на разрушението.....	279
3.3.1 Влияние на вида на влакнестата армировка.....	279
3.3.1.1 Според провисването при първа пукнатина.....	279
3.3.1.2 При фиксирано максимално провисване.....	282
3.3.1.3 При фиксирана остатъчна носимоспособност.....	282
3.3.2 Влияние на технологичните параметри (пропарване и автоклавиране).....	283
3.3.2.1 При къси стоманени влакна.....	284
3.3.2.2 При дълги стоманени влакна.....	286
<b>4. Ударна жилавост.....</b>	<b>288</b>
4.1 При бетони с микрополипропиленови влакна.....	288
4.2 При бетони със стоманена влакнеста армировка.....	289
<b>5. Връзка между поведението на огъване и ударната жилавост.....</b>	<b>290</b>
<b>6. Устойчивост на износване.....</b>	<b>291</b>
Използвана литература VI-та глава.....	292
VII ГЛАВА <a href="#">ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА</a> .....	296
VIII ГЛАВА ЗАКЛЮЧЕНИЕ И НАСОКИ ЗА БЪДЕЩО РАЗВИТИЕ.....	304
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 РЕАЛИЗИРАНИ ОБЕКТИ ПРЕЗ ПОСЛЕДНИТЕ ПЕТНАДЕСЕТ ГОДИНИ.....	310
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 РЕЗУЛТАТИ ОТ ДТА/ТГ/ДТГ, ЖИВАЧНА ПОРЪОЗИМЕТРИЯ И СЕМ.....	330
Използвани фигури.....	354
Използвани таблици.....	360
Използвани снимки.....	363

## ИЗПОЛЗВАНИ ОЗНАЧЕНИЯ:

### СЪКРАЩЕНИЯ:

СВЯБ	супервисокоякоостен бетон, общоприето съкращение на български за УНРС;
В/Ц	водо-циментно отношение;
В/Св	водо-свързващо отношение;
МСП	микросилициев прах;
АМД	активна минерална добавка;
СП	суперпластификатор;
Ц	цимент;
ЕДМ	едър добавъчен материал;
$D_{max}$	максимална едрина на добавъчния материал;
ПП	полипропилен;
ПК	поликарбонат;
СЕМ (SEM)	сканираща електронна микроскопия;
ДТА	диференциално термичен анализ;
ТГА	термогравиметричен анализ;
ДТГА	диференциален термогравиметричен анализ;
ITZ	преходна зона;
CMOD	широчина на отваряне на пукнатина;
CSH	калциеви хидросиликати;
$Ca(OH)_2$	калциев хидрооксид (портландит);

### ГЕОМЕТРИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

$b$	ширина на напречното сечение на пробно тяло;
$h$	височина на напречното сечение на пробно тяло;
$L$	дължина;
$\Delta L$	промяна в дължината;
$S_1$	подпорно разстояние;
$D$	диаметър на дисперсна армировка;

$L/D$	отношение на дължина към диаметър на влакно;
$a$	прорез на пробното тяло;
$n$	височина, от която пада пробното тяло;
$A$	площ на сечението, върху което е приложен товар;
$W_o$	площ под кривата 'натоварване-провисване';
$V$	общ обем на изпитваното тяло;
$V_d$	обем на плътната част;
$\Delta V$	загуба на обем;
$\pi$	3,14;

#### **ФИЗИЧНИ И ХИДРО-ФИЗИЧНИ СВОЙСТВА:**

$m_c$	маса на пробното тяло в сухо състояние;
$m_{wn}$	маса на пробното тяло във водонапито състояние;
$m_{wa}$	маса на пробното тяло във водонаситено състояние;
$m_{hyd}$	маса на пробното тяло, потопено в хидростатична везна;
$m_{const}$	константа на пикнометър;
$m_{puc}$	маса на пикнометър;
$m_{puc+mat}$	маса на пикнометър с материал в него;
$m_{puc+mat+w}$	маса на пикнометър с материал и вода в него;
$m_i$	маса на пробното тяло, преди изпитване на износоустойчивост;
$m_f$	маса на пробното тяло, след изпитване на износоустойчивост;
$P$	тегло на чука, който се пуска върху пробното тяло;
$\rho_o$	обемна плътност;
$\rho_c$	специфична плътност;
$\rho_{c,w}$	специфична плътност на водата;
$\delta$	относителна плътност;
$h$	относителна порестост;
$W_{n,m}$	водонапиване по маса;
$W_{a,m}$	водонасищане по маса;
$K_n$	коэффициент на водонасищане;
$A$	начална абсорбция, $kg/m^2$ ;
$S$	абсорбционна способност, $kg/m^2 \cdot h^{0.5}$ ;
$i$	капилярна водопопиваемост $kg/m^2$ ;

### ЯКОСТНО-ДЕФОРМАЦИОННИ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

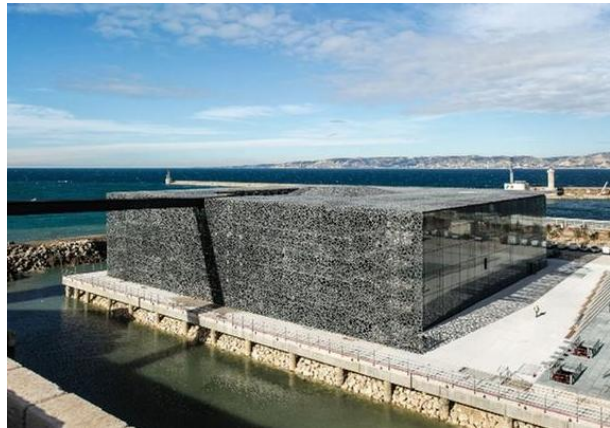
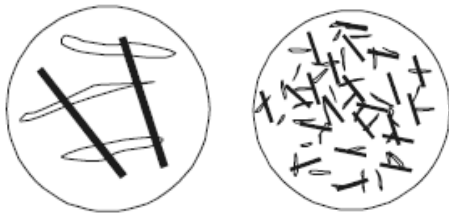
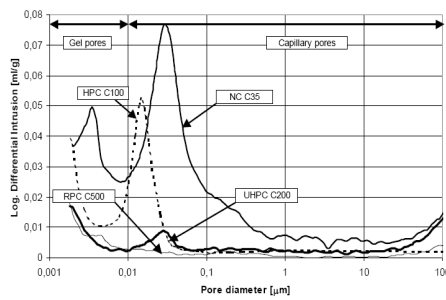
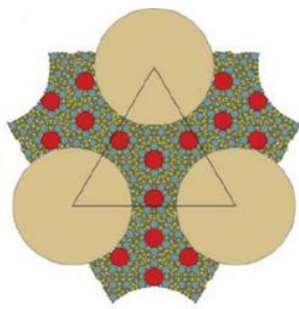
$F$	натоварваща сила;
$F_{\max}$	максимална сила;
$f_c$	якост на натиск;
$f_{c,28} \text{ (calc.)}$	изчислителна стойност на якостта на натиск на 28-ми ден;
$f_{c,28} \text{ exp.}$	експериментална стойност на якостта на натиск на 28-ми ден;
$f_f$	якост на опън при огъване;
$f_f/f_c$	отношение на якостта на опън при огъване към якостта на натиск;
$f_{ct}$	якост на опън при разцепване;
$f_{\text{imp}}$	ударна якост;
$f_{1st\ cr}$	гранично относително провисване при първа пукнатина, реализирана при натоварване на опън при огъване и постоянна скорост на натоварването;
$\delta(F_{1st\ cr})$	провисване при първа пукнатина, реализирана при натоварване на опън при огъване и постоянна скорост на натоварването;
$\delta$	провисване на пробно тяло, реализирана при натоварване на опън при огъване и постоянна скорост на деформация;
$\Delta$	Вертикално преместване на пробно тяло, включително реакцията на пресата, при натоварване на опън при огъване и постоянна деформация на натоварването;
$\sigma$	напрежение;
$\Delta\sigma$	промяна в напрежението между горна и долна степен на натоварване;
$\epsilon$	надлъжна деформация в опънна зона;
$\Delta\epsilon$	промяна на относителната деформация между горна и долна степен на натоварване;
$I_5, I_{10}, I_{20}$	индекси на пластично разрушение;
$R_{5,10}, R_{10,20}$	фактори на остатъчна якост;
$\epsilon_s$	деформация от съсъхване;
$\nu$	коефициент на Поасон;
$G_f$	енергия на разрушение;
$l_{ch}$	характеристична дължина;
$D_l$	дуктилна дължина;
$E$	модул на линейните еластични деформации;
$I$	инерционен момент;
$g$	земно ускорение;

**ДРУГИ ХАРАКТЕРИСТИКИ:**

$pH$	водороден показател;
$P_{Hg}$	налягане, при което живакът навлиза в пората на циментовия камък;
$\theta$	ъгъл на омокряне на живака и стените на пората;
$a_u$	степен на хидратация;
$Q$	отделено количество топлина;
$W$	топлинен поток;
$S_{average}$	средно квадратично отклонение;
$S_{max}$	максимално отклонение;
$t$	време;

## I ГЛАВА

### ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР И АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩОТО СЪСТОЯНИЕ







## 1. Същност на СВЯБ и мястото му сред бетоните със специално предназначение

### 1.1 Историческа справка върху създаването на СВЯБ

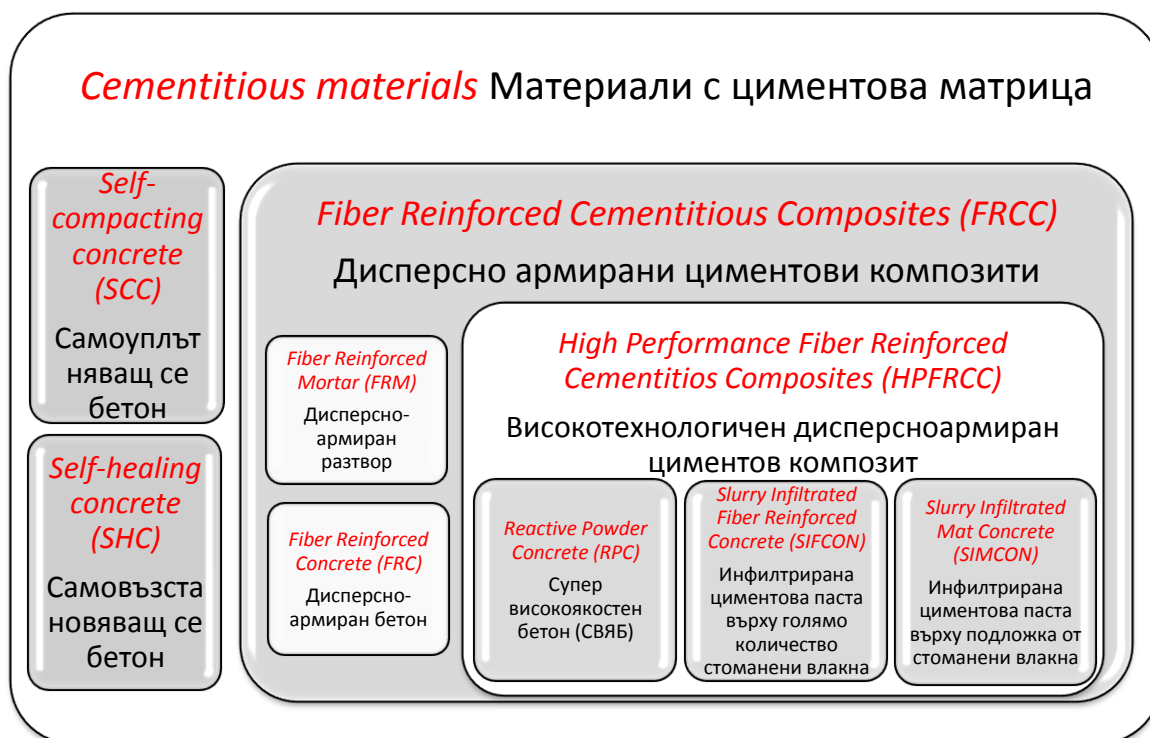
Идеята за създаването на бетон, който да има много по-високи якостни свойства и много по-добри други експлоатационни характеристики, впоследствие наречен *Ultra High Performance Concrete* (на български гражданственост добива понятието супервисокоякоостен бетон (СВЯБ)), се заражда през още 60-те години на XX век, във Франция и Канада. Концепцията му е за материал с минимално количество дефекти, което изисква намаляване на обема на свързаните пори и на микропукнатините [Voort, 2008]. Започва да се работи по две направления за реализирането на тази концепция. Първото е свързано с използването на полимери, които да запълват порите на бетонната смес, като по този начин елиминират празните микрообемни. Сложният процес на производство на тези композити създава трудности пред тяхното разработване. Второто направление предполага използването на ултра фини частички с размер на зърната до 1µm. Тези частички са от активни минерални добавки (микросилициев прах, гранулирана доменна шлака, метакаолин и други), така че едновременно с получаването на силно уплътнена и хомогенна структура, се постига и допълнителен ефект от вторични пуцоланови и хидравлични реакции. Това предотвратява появата на макропукнатини по време на натоварването на елементите. Бетонът, създаден по този метод се оказва по-лесен за производство, но и с по-малки якости на опън, сравнен с първия. Също така получените изделия са значително по-крехки, което налага модифициране на състава чрез използване на микро фибри, което при другия подход води до затруднена обработваемост и силно вискозни състави. Получената смес е изключително плътна, което налага влагането на химически добавки от типа суперплатификатори, с цел получаване на необходимата обработваемост, както и забавители на свързването за осигуряване на по-продължителен период на обработваемост на сместа.

Задълбочени лабораторни изследвания за създаване на СВЯБ започват активно да се реализират в средата на 80-те години на XX-ти век. Основно това са Франция, Канада, Германия, САЩ, Холандия, Дания и Англия. През 1981 материалът е наречен "*Reactive Powder Concrete*" от Bache [Bache, 1981], поради използването само на фина частици (под 1 mm) и минерални добавки. В следствие придобива известност и под други наименования като *Ultra High Strength Concrete* (UHSC) и *Ultra High Performance Concrete* (UHPC). Понастоящем най-използваното и общоприето название на материала в световен мащаб е UHPC. В България освен под наименованието супервисокоякоостен бетон се среща и като свръхвисокоякоостен бетон [Иванов, 2013] и много високоякоостен бетон [Иванова, Миронова, 2013].

В наши дни горепосочените страни са разработили и патентовали отделни сухи строителни смеси от UHPC, под различни търговски наименования - "Ductal®" във Франция, "Densit®" в Дания, "CARDIFRC®" в Англия, "BSI-CeraCem®" във Франция и др., които се използват основно в рамките на страните-производители.

## 1.2 Класификация на високотехнологичните бетони

Високотехнологичните бетони на база на циментова матрица могат условно да бъдат разделени на три групи, в зависимост от предназначението им: самоуплътняващи се бетони, самовъзстановяващи се бетони и дисперсно армирани циментови композити – фиг. 1. 1.



фиг. 1. 1: Обобщена класификация на високотехнологичните бетони на циментова матрица

Самоуплътняващият се бетон е специален бетон, създаден с цел да бъде подобро поведението на прясната бетонна смес [Okamura, 2003]. Постигнатата силно пластична смес не се разслоява и може да запълва кофражните форми без допълнително уплътняване (напр. чрез вибриране). Това се постига чрез специално подбрана зърнометрия, която използва действието на собственото тегло на сместа за уплътняване в кофражните форми при гъсто-армирани конструкции.

Самовъзстановяващите се бетони са иновационни циментови композити, които дават възможност за предотвратяване и/или възстановяване на евентуално частично разрушаване в материала [Ghosh, 2009]. Самовъзстановяването се дефинира като самостоятелно отстраняване на повреди в структурата, причинени от механични, химични или термични въздействия [Иванов, 2013]. Според начина си на самовъзстановяване се отличават две направления – автогенно и автономно самовъзстановяване [Иванов, 2010].

Особен интерес представлява третия вид високотехнологични бетони - дисперсно армирани циментови композити, тъй като те съчетават в себе си както високи якостни характеристики, така и дуктилно поведение. Ако при дисперсноармираните разтвори и бетони основен принос от вложената дисперсна армировка се явява подобрената якост на опън при огъване, удароустойчивостта, намаленото съсъхване и пукнатинообразуване, без да има

съществена промяна върху останалите механични свойства на композита, при високотехнологични дисперсноармирани циментови композити, се явява желанието за създаване на материал с увеличени якостни характеристики едновременно на чист опън, опън при огъване и натиск. Това е постигнато или чрез създаване на високоякоостна матрица, с вложени стоманени влакна или чрез заливане на голямо количество влакна с малко количество циментова паста. Поведението на получения материал се отличава от останалите дисперсно армирани композити по значителното си дуктилно поведение и развитие на множество микропукнатини, преди да настъпи разрушение. Този вид композити се развиват във времето в няколко насоки, в зависимост от целите на използване. Първият вид е разглежданият СВЯБ, който дължи характеристиките си основно благодарение на високоякоостната матрица. Докато при втория и третия вид бетон, основна роля играе дисперсната армировка, върху която е инфилтрирана циментова паста (сн. I. 1). При SIFCON кофражната форма изцяло е запълнена с голямо количество стоманени влакна (5% до 20% по обем), т.е. имаме триизмерен композит, а при SIMCON това е само тънка подложка от стоманени влакна, т.е. двуизмерен композит. И двата материала се създават чрез заливане на влакната с циментова паста. SIMCON служи предимно за възстановяване и укрепване при нови конструктивни решения, които изискват поемане на значително по-големи натоварвания, устойчивост на сеизмични въздействия, дуктилност и в същото време да се осигури дълготрайност, но биха били икономически неизгодни при реализиране с конвенционални методи.

При СВЯБ също се влагат сравнително големи количества стоманени влакна (1,5-2% по обем), съчетани понякога с полипропиленови влакна (0,3-0,5% по обем), които се разпределят равномерно във високоякоостната матрица. Според специфичните изисквания към конструкциите, изпълнявани от СВЯБ, се избира необходимото количество и вид влакнеста армировка.



сн. I. 1: Пробни тела от: а) СВЯБ



б) SIFCON [\*]



в) SIMCON [\*\*]

\*[www.inzynierbudownictwa.pl](http://www.inzynierbudownictwa.pl)

\*\*[www.rebar.ecn.purdue.edu](http://www.rebar.ecn.purdue.edu)

### 1.3 Области на приложение на СВЯБ

След повече от 30 години научни изследвания в областта на високо-и свръхвисокоякоостните бетони, през 1997 в *Sherbrooke*, Канада, е изграден първият в света пешеходен мост от СВЯБ за хора и велосипедисти над реката *Magog*, с дължина от 60 m. Реализирана е пост-напрегната бетонна ферма, като всеки един от прътите представлява антикорозионна стоманена тръба, напълнена със СВЯБ, на която е било приложено налягане до

времето на свързване. Постигната якост на натиск на бетона е над 250 МПа [Voort, 2008]. Пътното платно е осъществено чрез тънкостенна плоча, също от СВЯБ, с дебелина от 3 cm.

Впоследствие материалът набира световна популярност и постепенно започва влагането му във все по-големи и отговорни конструкции. След приложението му при пешеходните мостове, вниманието се насочва към тежко натоварени мостови съоръжения, при които изпълнението със СВЯБ позволява двойно да се редуцира височината на гредите. От конвенционалната армировка е запазена само предварително напрегнатата в долния пояс, а дисперсното армиране със стоманени влакна в целия обем премахва необходимостта от други армировъчни пръти [www.ductal-lafarge.com]. Не закъснява влагането на материала и във вертикални носещи елементи – колони с височина от 16 m и диаметър от 32 cm, както и първите в света предварително напрегнати колони [www.ductal-lafarge.com].

Различни по форма и размери черупкови конструкции и козирки с постигната дебелина от 2-3 cm, се появяват като съоръжения по перони на гари, автобусни спирки, пунктове за плащане на пътни такси по магистрала, частни къщи и др.

Използването на СВЯБ в предварително изготвени плочи и панели открива ново поле за внедряването им във фасадното инженерство, конзолни плочи на балкони, покривни конструкции на стадиони, стълбищни клетки и др. Архитекти и дизайнери все по-често използват СВЯБ за различни решения, той се забелязва в интериора и екстериора на градове като Париж, Лил, Марсилия, Рим, Маями, Вашингтон, Калгари, Торонто и др. [www.ductal-lafarge.com].

Реализираната плътна структура, благодарение на голямото количество калциеви хидросиликати и липсата на капиларна порестост, създават предпоставки за затруднено проникване на агресивни агенти в дълбочина на елементите. По тази причина СВЯБ се прилага за елементи, които едновременно изискват високи механични характеристики и изключителна дълготрайност. Така през последните десет години СВЯБ е използван все повече като конструктивен материал, работещ в тежки експлоатационни условия – охладителни кули на атомни централи, циментови силози, самолетни писти, пилоти, тунели, морски съоръжения и др. [www.ductal-lafarge.com].

В последните 4-5 години се забелязва прилагането му „*in situ*“, като усилващ или репарационен слой в различни аварирани конструктивни елементи и цели съоръжения. Използван е за увеличаване на носимоспособността и дуктилността на колони на сгради, греди и устои на мостове, язовирни стени, земни откоси, защитни огради покрай магистрала и др. [www.ductal-lafarge.com].

Подробно описание на най-известните и изпълнени конструкции от СВЯБ, в различни области на строителството, архитектурата и изкуството са представени в Приложение 1.

#### 1.4 Пред-история на създаването на СВЯБ у нас

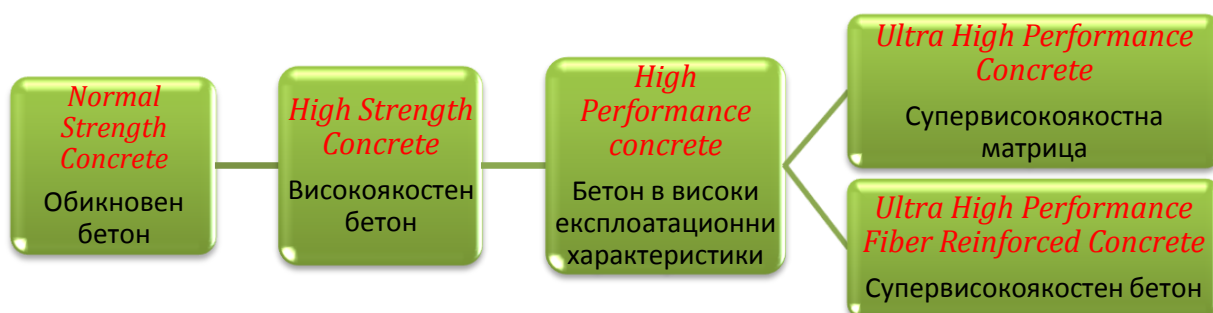
В България опитът в бетони с високи якости на натиск се ограничава с научните и научно-приложните изследвания в границите 80-100 МПа. Тези разработки са извършвани основно в

края на миналия век от колективи в УАСГ, НИСИ и ЦЛФХМ-БАН [Назърски, 1988-1; 1988-2; Назърски 1989, Гочев 1989-1; 1989-2; Николов-1989; Захаријева-Георгиева 1990-1;1990-2]. В тези изследвания са определени базовите якостно-деформационни характеристики на високоякоостните бетони (кубова и призмена якост на натиск на бетона, модул на еластичност, относителна надлъжна деформация при максимално натоварване). В сила е експерименталната работна диаграма на тези бетони. Очертани са препоръчителните стойности на В/Ц отношение и е установено влиянието им върху гореспомнатите характеристики. Изследван е ефектът на различни силноводонамаляващи добавки и на микросилициевия прах върху свойствата на бетонната смес и втвърдения бетон. В ЦЛФХМ са разработени композитни състави на високоякоостни бетони, в които са оползотворени български природни карбонати със смесен състав [Лилков, Джабаров 1994]. Създадени са две добавки за постигане на високи якости - еднокомпонентна активна минерална добавка и комбинирана минерална добавка.

Пред последните няколко години в България се наблюдава нарастващ интерес към високоякоостните и влакнесто-армираните бетони (с якост на натиск до 100 МПа) в няколко аспекта – якостно-деформационно поведение, износоустойчивост, микроструктура и др. [Найденов, 2012, Найденов, 2013, Иванов, 2013].

## 2. Особености на състава на СВЯБ в сравнение с този на обикновените бетони

Преходът от обикновен бетон (*NSC - Normal Strength Concrete*), с якост на натиск до 60 МПа към високоякоостен бетон (*HSC - High Strength Concrete*) с якост на натиск до 110-120 МПа, е постигнат плавно чрез оптимизиране на структурата му, като е намалена общата му порьозност. Наред с това са използвани по-висококачествени добавъчни материали, редуцирано е В/Ц-ното отношение (от порядъка на 0,30-0,35), вложени са по-големи количества едър добавъчен материал, активни минерални добавки и суперпластифициращи химически добавки [Carransquilio, 1981] – фиг. 1. 2.



фиг. 1. 2: Развитие на бетона на база високи експлоатационни характеристики

Скокът от бетон с високи якости (*HSC*) към бетон с високи експлоатационни характеристики (*HPC - High Performance Concrete*) в света е реализиран благодарение на усъвършенстването на химическите добавки за бетон и влагането на по-големи количества АДМ с различна зърнометрия (микросилициев прах, тецова пепел, гранулирана доменна шлага и матакаолини). Употребата на активни минерални добавки има редица предимства: повишена дълготрайност (водонепропускливост, корозионна устойчивост и др., в резултат на

увеличената степен на хидратация на клинкерните минерали), екологични (по-малко клинкер, следователно намалено въздействие върху околната среда) и икономически (повечето добавки са отпадъчни индустриални продукти или лесно добивани скални материали). Използването на комбинация от химически добавки води до модифициране свойствата на прясната бетонна смес, в резултат на което се постига желаната обработваемост, едновременно с осигуряване на необходимото време за запазване на консистенцията и ограничаване на въздуховъвлчането.

При бетоните с високи експлоатационни характеристики се влага АМД в количества от 10% до 20% [Taфраoui, 2009] от масата на цимента и суперпластификатори от 1-2% по маса, дава възможност за постигане на уплътнена макро- и микророструктура на втвърдения бетон [Aïtcin, 1998], но в същото време на бетонна смес с добра обработваемост. Съставът му се характеризира със значително увеличено количество цимент (от 600 до 900 kg/m<sup>3</sup>) и намалено водо-циментно отношение (под 0,25). При този вид бетони е намален размерът на едрия добавъчен материал (фракция 4-8 mm), защото той се явява слабо звено в структурата на бетона. Границите на якостта на натиск са от 100 МПа до 150 МПа.

СВЯБ се явява подразделение на групата на бетоните с високи експлоатационни характеристики (*High Performance Concrete*) и в същия момент е вид високотехнологичен бетон (*High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites*), според класификациите, представени съответно на фиг. I. 1 и фиг. I. 2. Той се характеризира основно със своите забележителни якостни характеристики, като якост на натиск над 150 МПа, опън при огъване над 35 МПа и якост на чист опън от 8-10 МПа [Graybeal, 2004; FHWA, 2006]. Създаден с оптимизирана зърнометрия, на база матрица от смесено свързващо вещество (цимент и АМД), с пълнител кварцов пясък и кварцово брашно, с цел получаване на много високи механични показатели и подобрена дълготрайност [Geisenhanslüke, 2004; Myhre, 1996; Teichman 2004; Park 2008; Droll, 2004; Stark 2008]. Към инертните му компоненти се отнася кварцовият пясък, а към активните материали циментът, АМД и кварцовото брашно [Graybeal, 2005; Müller 2008]. Най-често използваната АДМ е микросилицевият прах – между 25% и 30% от масата на цимента. В/Ц отношение е много ниско – под 0,22-0,20, като желаната обработваемост е постигната с използване на много големи количества СП добавка – над 1,5% сухо вещество, отнесена към масата на цимента [Aïtcin 1998]. Специфичното при СВЯБ е, че изцяло липсва едър добавъчен материал (ЕДМ) [Richard & Cheyrezy, 1995; Greybeal, 2005; FHWA, 2006]. Максималната големина на добавъчния материал е 0,5 mm от кварцов пясък. Често именно матрицата на СВЯБ се означава като *Ultra High Performance Concrete* [Droll, 2004], но в повечето случаи под УНРС се разбира композитен материал – матрица и влакна [Voort, 2008, Graybeal, 2005]. Друго популярно наименование на УНРС е *Reactive Powder Concrete*.

Добавянето на дисперсна армировка (стоманени, полипропиленови, стъклени, карбонови и други видове фибри) към супервисокоякоостната матрица, го превръща в *Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete*. Влакнестата армировка подобрява якостта на опън при огъване, съсъхването, пукнатиноустойчивостта, пожароустойчивостта и др. Най-често са използвани стоманени влакна, вложени в големи количества (2,0-4,0 % по обем), които водят не само до повишаване на якостта на опън при огъване (над 100 %), но и на якостта на натиск (от 30 % до 50 %) [Richard & Cheyrezy, 1995; Naaman, 2012; AFGC-SETRA, 2013; Empelmann 2008].

Основният принос на влакнестата армировка се изразява в постигането на дуктилно поведение на конструкциите, изпълнявани от СВЯБ.

С цел повишаване якостните характеристики, подобряване на микроструктурата и дълготрайността на СВЯБ, елементите се подложени на топло-влажностната обработка (пропарване и автоклавиране) [Yazini, 2008]. Чрез нея се създават допълнително количество хидратационни продукти, които редуцират общата порестост на бетона и заздравяват контактните зони между матрицата и добавъчния материал и матрицата и влакнестата армировка.

Канадският професор *Aitcin*, доайен в разработването на бетон с високи експлоатационни характеристики, обяснява развитието на УНПС така: „Знам как да направя бетон с якост от 150 МПа в индустриални условия. Но тъй като при него най-слабото звено за постигане на по-високи якости се оказва едрият добавъчен материал, просто се налага да го изключи и да направя *Reactive Powder Concrete* с якост от 200 МПа. След това е нужно само да поставя материала в тънкостенна стоманена форма и да видя как тази същата смес ще покаже якости от 375 МПа. И накрая, когато изцяло заменя пясъка с метална пудра, якостта на натиск на бетона ще достигне 800 МПа.”

## 2.1. Критерии за избор на съставните материали за направата на СВЯБ

Съществуват различни изследвания в литературата [Park, 2004; Yang, 2008], които изследват отделни физични, физико-химични и механични характеристики на изходните материали за направата на СВЯБ. На базата на тях са изготвени отделни рецептури, с оглед оптимизиране на състава на бетона и са описани отделни технологични особености при изготвянето и полагането в кофражните форми и последваща топло-влажностна обработка.

### 2.1.1. Свързващи вещества и активни минерални добавки

Първият структуроопределящ компонент в бетонната смес е циментът. За постигане на СВЯБ се влага само чист портландцимент тип СЕМ I, с клас по якост на натиск 52,5N. По литературни данни [Aitcin, 2000], предпочитани цименти са тези с по-едри зърна и с по-слабо развита специфична повърхнина (около 3000 cm<sup>2</sup>/g), с ниско съдържание на трикалциев силикат и трикалциев алуминат. За съжаление, все по-често циментовите производители прилагат по-fino смилане на цимента, за повишаване на неговата активност [Aitcin, 2000]. Контролирането на тази характеристика на цимента води до намаляване на водопотребността и може по-лесно да се редуцира водо-циментното (В/Ц) отношение, което респективно повишава якостните характеристики.

Необходимото количество цимент за получаване на СВЯБ варира в граници от 600 kg/m<sup>3</sup> до 1000 kg/m<sup>3</sup>, така че няколкократно надвишава това при обикновения бетон. С намаляване на размера на добавъчния материал се увеличава и количеството на използвания цимент [Nevil, 2002]. При състави, при които има наличие на едър добавъчен материал (ЕДМ), с големина на зърната до 8 mm, се постига задоволителна якост на натиск на материала от около 150 МПа, при влагане на 700 kg цимент. При съставите, в които изцяло липсва ЕДМ, влагането количество цимент надвишава 900 kg/m<sup>3</sup>. При обикновените бетони, използването на толкова



силно завишено съдържание на цимент би довело до голяма екзотермия и температурни напрежения. При СВЯБ обаче, е отчетена много бърза скорост на реакцията на хидратация, непосредствено след добавянето на водата, като в следствие скорост на хидратация намалява [Voort, 2008, Vogt, 2004]. Според други автори [Korpa, 2004; Singh, 2004], при СВЯБ като цяло се отчита много по-ниска екзотермия и заради използването на различни активни минерални добавки, като смяна доменна шлака или летяща пепел от ТЕЦ.

Известно е, че не цялото количество цимент хидратира с влагането му в сместа, поради много ниските стойности на В/Ц отношение [Loukili, 2008.]. Тази част от зърната, които не влизат в химическа реакция с водата, играят по-скоро ролята на пълнител и водят до повишаване на модула на еластичност на матрицата [Habel, 2006].

Допълнително трябва да бъде установена съвместимостта на цимента с избраните химически и минерални добавки, тъй като видът и количеството на някои от тях могат да доведат до чувствителни отклонения във водопотребността на бетона и поведението му при втвърдяване [Graybeal, 2005].

- Активни минерални добавки

В СВЯБ се влага значително количество активна минерална добавка (АМД) - от 20 до 30% от вложеното количество цимент, което се равнява на  $150-300 \text{ kg/m}^3$ . Счита се, че цялото добавено количество АМД се използва за свързващо вещество, за разлика от обикновените бетони, където АМД се приема, че само 10% влиза в реакция. Най-често използваните АМД са микросилициев прах, летяща пепел от ТЕЦ, метакаолин, смяна гранулирана доменна шлака [Aïtcin, 1998], пепел от изгарянето на оризови обвивки [Tuan, 2011] и др.

Микросилициевият прах (МСП) се получава като отпаден продукт при производството на силициеви (метални и феросилициеви сплави). Влагането му в бетона води до уплътняване на структурата посредством намаляване на обема и размера на порите, модифициране на хидратационните продукти и образуване на допълнителни калциеви хидросиликати, както и повишаване на подвижността на сместа, в следствие на перфектната сферична форма на частиците му [Taïraoui, 2009]. От друга страна, използването му заздравява контактната зона между циментовия камък и добавъчните материали [Mindess, 1988] и между влакнестата армировка и матрицата. Съществуват и определени изисквания към химическия състав на МСП – да съдържа малко количество въглерод, тъй като той води до повишена водопотребност и намаляване на консистенцията [Schmidt, 2003]. В стандарт [БДС EN 13263-1] има още редица изисквания, които ограничават съдържанието на Si, CaO, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, Cl<sup>-</sup> и др. Според [Zanni, 1996] вида и продължителността на термичната обработка при СВЯБ има пряко отношение към пълното изконсумиране на МСП в пуцоланова реакция с цимента.

Като алтернатива на МСП се използват летящи пепел от ТЕЦ, метакаолин и гранулирана доменна шлака, най-вече поради високата му цена и сравнително малките количества, в които се произвежда. Използването на АМД води до подобряване на обработваемостта на прясната бетонна смес [Walraven, 2002]. Летящите пепели от ТЕЦ съдържат значително количество силициеви, железни и алуминиеви съединения, което ги прави реактивни с продуктите на хидратация на цимента. В България обаче летящите пепели се характеризират с известно

непостоянства в състава и свойствата, поради което са неподходящи за влагане в СВЯБ. Използването на метакаолин в бетонопроизводството също няма големи традиции у нас, поради специфичното му производство от каолинова глина, в следствие на което се формира по-висока цена. Интерес в последно време представлява използването на пепел от изгарянето на оризови обвивки, получени като отпаден продукт от селското стопанство. Тя съдържа над 90-96% SiO<sub>2</sub> в изцяло аморфна форма [Tuan, 2011]. Установено е, че тази пепел има висок пуцоланов потенциал и по този начин може да влезе във вторично взаимодействие с продуктите на хидратацията на цимента.

Възможно е да се използват комбинации от микросилициев прах и останалите активни минерални добавки. Серия от изследвания [Zenati, 2009, Yazini, 2008, Taфраoui, 2009] показват, че при комбинирано влагане на различни АМД, като цяло се получават близки стойности на якостта на натиск и якостта на опън при огъване на СВЯБ, с тези получени само от МСП. Съчетаването на няколко вида АМД се разглежда с оглед на последващата топло-влажностна обработка, която оказва силно влияние върху получените хидратационни продукти.

#### - Кварцово брашно

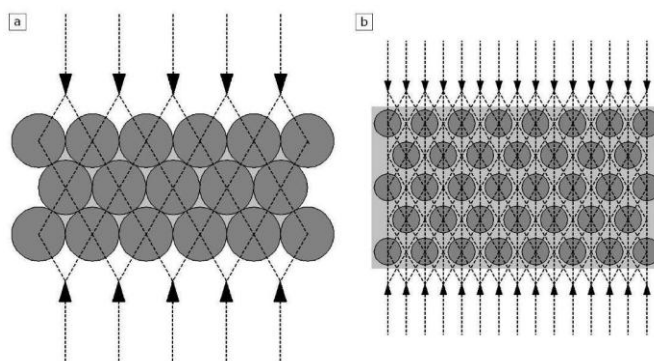
Кварцовото брашно се използва за редуциране на съдържанието на цимент, тъй като, както беше споменато по-горе, не цялото количество цимент влиза в химична реакция с водата и остават нехидратирани зърна. По литературни данни [Ma, 2002] тази редукция може да стигне до 30%, без да се наблюдава намаляване на якостта на натиск. Освен това според някои източници влагането на кварцово брашно осигурява по-добър уплътняващ ефект, заради по-малкия размер на зърната на кварцовото брашно (5-10 μm) сравнени с тези на цимента (50-100 μm), които той заменя [Voort, 2008]. Поради инертността на кварцовото брашно, някои автори докладват за по-добрата обработваемост на смесите [Voort, 2008]. Но най-важното предимство от замената на част от цимента с кварцово брашно е възможността за образуване на вторични продукти на хидратацията, при специална топло-влажностна обработка [Müller, 2008, Rashard, 2012], която модифицира структурата на бетона. Това определя кварцовото брашно като не изцяло инертен компонент в състава на СВЯБ. Според други автори [Geisenhanslüke, 2004] обаче, силно развитата специфична повърхнина на кварцовото брашно, в следствие на по-малкия размер на частиците, предизвиква увеличаване на вискозността на СВЯБ, при много ниските стойности на В/Ц отношение от 0,22-0,20. Следва да бъде експериментално установен ефекта от влагането на различни количества кварцово брашно върху поведението на прясната бетонна смес и ефекта му върху микроструктурата на бетона след прилагане на топло-влажностна обработка.

#### 2.1.2. Добавъчен материал

Едрият добавъчен материал (ЕДМ) е ключов за якостните свойства на обикновените бетони. За разлика от тях, при СВЯБ той се явява по-скоро като слабо звено, поради, от една страна, особеностите на контактната зона между матрицата и ЕДМ, а от друга, поради по-малкия модул на еластичност на ЕДМ (гранитът има Е-модул от 20÷30 GPa) от този на матрицата. Това води до елиминирането на ЕДМ в много от рецептурните състави на СВЯБ, но в някои от тях се използва фракция 4-8 mm с ЕДМ на базалтова основа (Е-модул от 40÷50 GPa). По литературни данни, модулът на еластичност на матрицата на СВЯБ варира в граници 45-55

GPa, а след влагането на стоманени влакна, E-модулът се увеличава до 60-65 GPa [Richard and Cheyrezy, 1994; Graybeal, 2005].

На фигура 3 е показана разликата в поемането на натоварването при обикновен бетон с едър добавъчен материал и СВЯБ, в който изцяло липсва едра фракция и при СВЯБ. При обикновения бетон добавъчният материал служи за формиране на корав скелет. При натоварване на натиск възникват срязващи и опънни напрежения в преходната зона между добавъчните материали, образувайки малки пукнатини, пропорционални на максималния размер на добавъчния материал. При СВЯБ обаче (фиг. 1. 3-б), размерът на добавъчните материали е много по-малък и той представлява включение в матрицата, но с по-малка от нейната коравина. Тогава натискът се поема предимно от матрицата, вместо от скелета от добавъчни материали, което намалява напреженията възникнали в преходната зона между матрицата и добавъчния материал. Това води до много по-равномерно разпределение на напреженията, което намалява възможността от пукнатинообразуване в преходната зона в резултат на срязващи и опънни сили [Richard and Cheyrezy, 1995].



фиг. 1. 3: Поемане на натоварването при: а) обикновен бетон б) СВЯБ [Walraven, 2002]

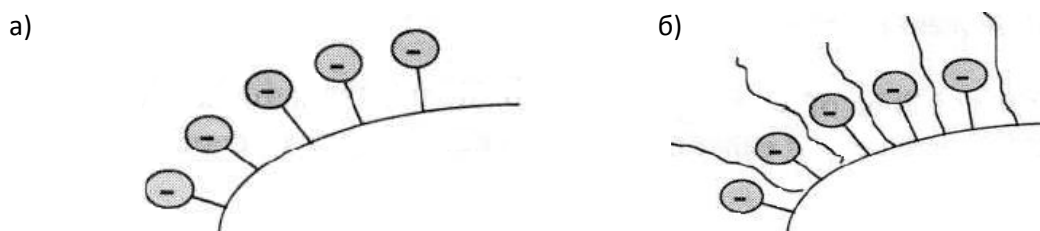
У нас използването на базалт за добавъчен материал за бетон е сравнително ограничено, поради трудната му обработваемост и би могъл да се замести със скали като гранит, сиенит, диабаз, андезит и др.

Като дребен добавъчен материал при СВЯБ най-често се използва кварцов пясък. При нормална температура той е инертен и играе роля на ограничител на циментовата матрица, което води до увеличаване на якостните характеристики [Ponteneuve, 2002].

### 2.1.3 Химически добавки

СВЯБ е материал, който дължи усъвършенстването си с развитието на строителната химия. През последните 40 години са открити различни видове органични молекули, които могат да неутрализират елктростатичния заряд по повърхността на циментовите зърна и по този начин да намалят тенденцията им към слепване, при замесване с вода. БДС EN 934-2 ги дефинира като силно водо-намаляващи химични добавки или суперпластификатори. Известни са и като разпръскващи агенти [Aïtcin, 2008]. Най-често срещаните са СП на базата на: лигносулфонати (LS), сулфомеланинови кондензати (SMF), сулфонафталинови кондензати (SNF), нафталинови сулфоформалдехиди (NSF) и др. С тях може да се достигне намаляване на В/Ц до 0,3. Основен недостатък на тези добавки е твърде малкото отворено време на бетонната смес

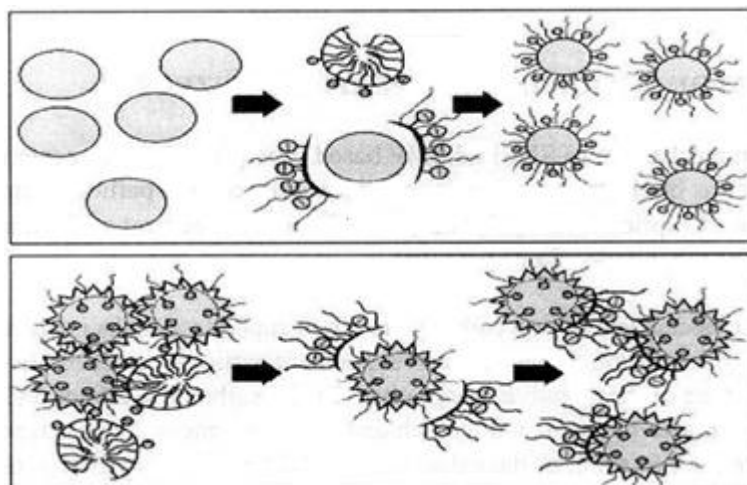
(15-30 min). Създаването на мощни суперпластификатори от типа на поликарбоксилатите (напр. метилкрилатни естери и алилетери), в края на XX век, съвпада с внедряването на СВЯБ в световен мащаб. Химичната структура на поликарбоксилатите е съставена от един главен гъвкав гръбнак, който съдържа негативно заредени карбоксилни групи и много големи и дълги странични вериги (фиг. 4). Техният ефект се основава на комбинирането на два различни типа отблъскване между циментовите частици. Първият тип е електростатично отблъскване (разпръскващ ефект), в следствие на отрицателен заряд даден от карбоксилните групи (фиг. 1. 4-а), а другият е с отблъскване, причинено от главните и дълги вериги на полимерите, които създават пространствена преграда, която допълнително стабилизира способността на циментовите частици да се разделят и диспергират (фиг. 4-б).



фиг. 1. 4: Механизъм на действие на СП молекули [Frommenwiler, 1998]

а) Традиционен СП (разпръскващ ефект)

б) ПК СП (разпръскващ + отблъскващ ефект)



фиг. 1. 5: Действие на поликарбоксилатните молекули [Frommenwiler, 1998]

Взаимодействието между страничните вериги на поликарбоксилатния полимер спомага за постигане на макромолекули от черупков тип. По този начин всички циментовите частици се обгръщат от слой поликарбоксилат и това предотвратява натрупването им една до друга (фиг. 5).

В резултат разпръскването на циментовите частици, водата успява да проникне по-добре между тях и се постига много добра хомогенност и обработваемост на бетонната смес. Предизвикателство пред избора на тези добавки се явява необходимостта от съчетаване на силния водонамаляващ ефект (до 40%, при стандартно изпитване според БДС EN 934-2:2009+A1:2012/NA:2013) с достатъчно време за запазване на консистенцията и ограничено въздуховъвличане (според БДС EN 12350-7:2009).

Взаимодействието на частиците на цимента със СП от една страна и на МСП със СП от друга е обект на изследване в литературата [Plank, 2009]. Поради повече от 15 пъти по-голямата специфична повърхнина на МСП в сравнение с тази на цимента (ВЕТ), според [Неукал, 2005] решаваща роля за действието на СП има МСП. Използването на по-големи количества МСП води до необходимостта от по-голямо количество СП, с което да се осигури нужната обработваемост. Видът на самия СП също оказва влияние върху поведението на прясната бетонна смес – поликарбоксилатите на основата на метакрилати разпръскват в по-голяма степен циментовите зърна, за разлика от карбоксилните етери, които пък са по-ефикасни при наличие на МСП в състава на СВЯБ. По тази причина съвместното действие на двата типа поликарбоксилат би било най-ефективно за СВЯБ.

Максималното количество суперпластифицираща поликарбоксилатна химическа добавка за направата на обикновен бетон, според фирмите производители, е в границите между 0,5 % до 1,0 % по обем [www.basf.bg]. Според [Aitcin, 1998] оптималното количество СП в състава на СВЯБ трябва да бъде 1,5%, отнесено към сухото вещество, т.е 4-5% от масата на цимента.

Следователно, изборът на химически добавки за СВЯБ е от ключово значение за рецептурата на СВЯБ, тъй като зависи в голяма степен от вида на останалите материали (цимент и АМД). Трябва едновременно да се постига добра оптимална обработваемост на сместа, при минимално В/Ц отношение, което да води до високи якостни характеристики на втвърдения бетон.

#### 2.1.4 Влакнеста армировка

С цел да бъде подобро поведението на материала под въздействието на статични и динамични натоварвания, в състава на СВЯБ се включва дисперсна армировка. Влакната се разполагат равномерно в целия обем на бетона и са случайно ориентирани. Влагат се два вида влакна – високомодулни (стоманени – най-често, стъклени, базалтови и въглеродни) и нискомодулни (полипропиленови – най-често и полиетиленови).

Именно използването на фибри, в съчетание с оптимизирана зърнометрия е основен критерий, по който се отличават бетоните с високи експлоатационни характеристики (*High Performance Concrete*) от СВЯБ (*Ultra High Performance (Fiber Reinforced) Concrete*). Според някои е възможно и прилагане на стоманени влакна в съставите на *HPC*, но в два пъти по-малко количество (1,0% по обем) с цел известна редукция на носещата армировка [Ganesan, 2007]. Докато при СВЯБ влакнестата армировка може да замени изцяло конвенционалната армировка.

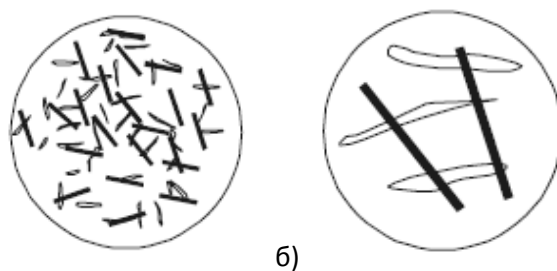
Ефектът от влакнестата армировка зависи от множество фактори, сред които от най-голямо значение са: видът на влакната, геометрията на влакната, количеството на влакната, ориентацията и разпределението им, начинът на смесване и уплътняване на бетонната смес, както и формата и размерът на добавъчния материал.

Процесите на пукнатинообразуване при СВЯБ се отличават от тези при обикновения бетон (виж гл. VI т. 3), следователно и ролята на влакната е различна, а от там – и видът на дисперсната армировка. При обикновените бетони се цели премостване на макропукнатините,

а заради големината на ЕДМ, това става възможно с използването на по-дълги влакна (2-3 cm). Известно е, че ефективността на влакнестата армировка зависи от съотношението  $L/D$  и при обикновените бетони то е от порядъка на 100-150, за да се осигури закотвяща дължина и ефективно включване на влакната в поемането на напреженията [www.scribd.com/doc/22018215/Fibre-Reinforced-Concrete]. Търси се съотношение  $L/D > 100$  и поради опасността от възникване на така нареченият „balling effect”, при който влакната се агрегират на ежове и не могат да се разпределят равномерно в обема на композита.

При СВЯБ, пред вид дребнозърнестата матрица и възникването на микропукнатини, е желателна употребата на микровлакна (фиг. 1. 6-б). Тяхното действие се свежда до овладяване на микропукнатинообразуването още в началния стадий на развитие, с което се задържа появата на микропукнатини, водещи до разрушение. Най-често срещаното съотношение  $L/D$  при СВЯБ е от 30 (условно къси) до 60 (условно дълги), което е достатъчно, предвид високата якост на матрицата и по-малката необходимата дължина.

Според някои, използването на комбинация от къси и дълги стоманени влакна води до подобряване поведението на материала в стадия след пукнатинообразуване (*post fracture behavior*), при натоварване на елементите на опън при огъване [Empelmann, 2008].



фиг. 1. 6: Влияние на дисперсната армировка върху процесите на пукнатинообразуване: а) роля на микрофибрите в процеса на микропукнатинообразуване; б) роля на макрофибрите в процеса на макропукнатинообразуване [Orgass, 2004]

Хомогенизирането на влакната в матрицата на СВЯБ е облекчено и те могат да се добавят по така наречената “premix” технология към готовата матрица.

При обикновените бетони това е възможно само при по-дългите влакна ( $L/D > 150$ ), тъй като те са по-малко на брой в единица обем. За по-късите влакна, влагани в обикновения бетон, е препоръчително да се забъркват на сухо с останалите компоненти, да се хомогенизира сухата смес и едва тогава да се прибави направната вода.

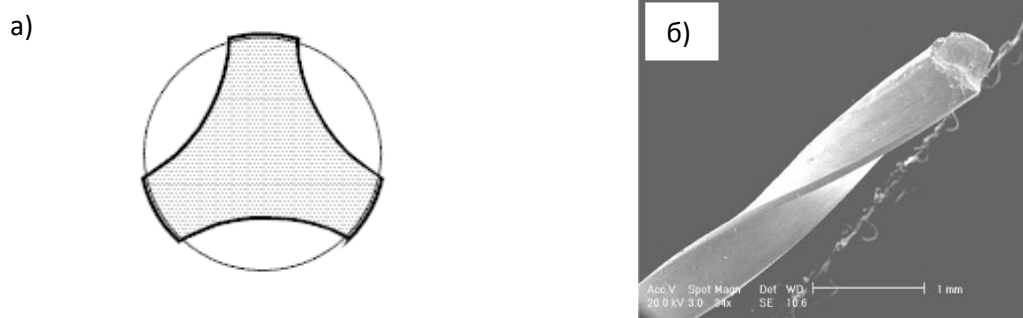
Стоманените влакна имат предимство, тъй като допринасят както за повишаване якостта на чист опън и якостта на опън при огъване, така и на енергията на разрушение, като осигуряват дуктилността на бетона и продължителната работа на материала след поява на първа пукнатина. Това, което е характерно за СВЯБ, а не се наблюдава при останалите дисперсно армирани композити, е увеличената якост на натиск с над 30% [Yunsheng, 2008, Vonneau, 1997, Soutsos, 2005]: влакната, действат като материал, с по-висок модул на еластичност от матрицата (по подобие на ЕДМ при обикновения бетон), разтоварват я, с което повишават носимоспособността на композита. Получените високи стойности на механичните характеристики на СВЯБ са силно повлияни и от голямото количество вложена дисперсна

армировка. От друга страна, влакната поемат напреженията, концентрирани в краищата на пукнатините и по този начин се възпрепятства разширяването им [Orgass, 2004]. Влакнестата армировка допринася и за контролиране на съсъхвателните процеси.

Ефектът от стоманените влакна, в ограничаване на възникването и развитието на пукнатините, се отразява и върху намаляване на пропускливостта и проникването на агресивни агенти.

Друг съществен момент от поведението на СВЯБ със стоманени влакна, е качеството на контактната зона „влакно-матрица“: тя се характеризира с обвивка от CSH гел около влакната (с дебелина от 60  $\mu\text{m}$ ), когато СВЯБ е подложен на топло-влажностна обработка [Sorelli, 2008].

С цел подобряване на механичното закотвяне на фибрите в циментовата матрица се прилагат и специални стоманени фибри с триъгълно усукано напречно сечение (фиг. 1. 7). При тях ефектът от изтръгването (*pull-out effect*) е значително намален. Такива фибри са известни под търговското наименование „Torex“, разработени в университета в Мичиган [Naaman, 2007]. Поради специфичната си форма и няколко пъти по-добро си сцепление с матрицата, те показват значително по-високи стойности на якостите на чист опън и опън при огъване, в сравнение с най-често използваните при СВЯБ влакна с кръгло напречно сечение [Naaman, 2012].



фиг. 1. 7: Фибри тип Тorex: а) напречно сечение б) триизмерен модел [Naaman, 2003]

В литературата се срещат различни данни по отношение на количеството на стоманените влакна в СВЯБ [Empelmann, 2008; Yunsheng, 2008] – 0,25-3,00 % по обем, като за оптимално количество се избира 2% [Freettlöhr, 2012].

Върху дуктилността на СВЯБ оказва влияние и опитната постановка – определено е по-дуктилно поведение при по-малки пробни тела (10/10/50cm), подложени на опън при огъване, в сравнение с по-големите (15/15/70cm) [Bornemann, 2004].

При използването на стоманена дисперсна армировка възниква опасност от корозия на влакната, разположени по повърхността на бетона, в резултат от контакта им с кислорода и въздушните пари от въздуха. Това рефлектира най-вече върху естетическия вид на бетона, без да има отражение върху якостно-деформационното му поведение. Проблемът е частично решен чрез използване на фибри с медно покритие.

Най-често използваните ПП влакна са микро фибри с дължини от 12 mm до 19 mm. Те са с разклонена конфигурация във вид на мрежа (*fibrillated*) и по-рядко се срещат като единично нарязано влакно (*monofilament*).

Полипропиленовите влака (ПП) се влагат с основна цел подобряване на поведението на СВЯБ при пожар, но те водят и до намаление на пластичното съсъхване и възпрепятстват развитието на микропукнатините при тежки натоварвания, посредством дисапация на енергията [Cheyrezy and Behloul, 2001]. Една от причините за положителното действие на ПП фибри от типа единично нарязано влакно е, че при изготвянето на бетона, част от водните молекули се разполагат върху повърхността на фибрите и така изпаряването на водата в ранните часове се намалява [Orgass, 2004]. В случай на пожар, бетонът се загрева и свободната вода, започва да се освобождава във вида на пара през капилярните пори. Поради много ниската си порьозност, СВЯБ възпрепятства пропускането на водните пари, в резултат се създава огромно налягане, способно да напука повърхността на бетона. При наличие на ПП влакна, които се разтапят при 160°C, се създават празни пространства, в които да се осъществи експандиране на водните пари и да се понижи предизвиканото напрежение [Hertel, 2002].

Когато са поставени комплексни изисквания към бетона по отношение на якостни характеристики, пукнатиноустойчивост, огнево въздействие и др., често се използва хибридна армировка от стоманени и полипропиленови влакна.

## 2.2 Граници на вариране на водо-циментно (В/Ц) и водо-свързващо (В/Св) отношение

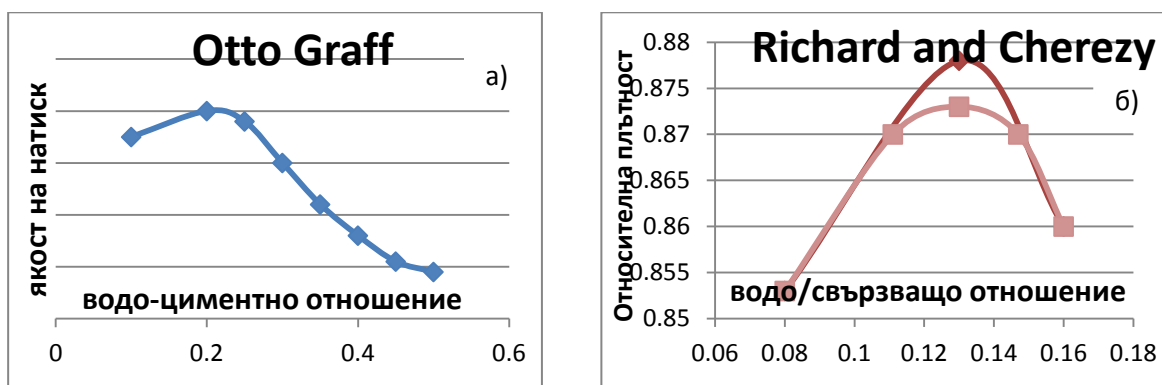
Структуро-определящ фактор при обикновените бетони е водо-циментното отношение (В/Ц). По косвен начин то влияе на якостите на бетона, чрез обема на порите, образували се при изпарението на свободната вода, която не е успяла да влезе във взаимодействие с цимента [Симеонов, 1991]. Въз основа на това още с началото на миналия век се извеждат редица зависимости между якостта на натиск на бетона и водо-циментното отношение. След най-популярните е теорията на Ото Граф [Graf, 1935] (фиг. I. 8-а). Според нея, колкото е по-голямо количеството на направната вода (т.е на В/Ц отношение), толкова по-голям ще бъде обемът на образувалите се пори, а от там ще се понижи якостта на натиск на бетона като цяло. При водо-циментно отношение под 0,20, поради затруднената обработваемост на смесите и недостатъчно количество вода за хидратация на цимента, якостта на натиск на обикновения бетон намалява.

Известно е, че за пълната хидратация на цимента е нужна между 18% и 20% вода, отнесена към масата на цимента. Обаче за да имаме добра обработваемост на сместа, при обикновените бетони това количество трябва да се завиши двойно или тройно, с което се затруднява структурообразуването на циментовия камък, поради раздалчаването на зърната и невъзможност да се свържат по между си посредством новообразуванията. Това рефлектира на сцеплението между циментовия камък и останалите компоненти и респективно върху якостта на натиск [Симеонов, 1991].

При СВЯБ, В/Ц отношение обикновено е около и под 0,20, което по теорията на Ото Граф следва да се намира в левия (падащ) клон на диаграмата и якостта на бетона да намалява (фиг. I. 8.а). При смесените свързващи вещества се въвежда понятието В/Св отношение. Под В/Св отношение при СВЯБ се разбира количеството вода отнесено към общата маса на активните компоненти: АМД и понякога кварцово брашно (ако то е влязло във взаимодействие с продуктите на хидратация след топло-влажностна обработка), за разлика от обикновените бетони, при които само 11% от АМД от МСП се включва в свързващото вещество. При СВЯБ се



предполага, че участва цялото количество. Така е установено, че максималната относителна плътност на скелета от зърнести материали се постига при В/Св отношение от 0,13 [Richard P., Cheyrezy, 1995]. Според други литературни данни тази стойност може да бъде 0,14 - 0,15 [Gao, 2006, Lee Chisholm, 2006]. За минимална стойност на В/Св отношение се приема 0,08, при която относителната плътност на СВЯБ е над 0,85 (фиг. I. 8-б). С увеличаване на В/Св отношение, водата започва да измества въздуха в порите, масата се увеличава, без това да води до промяна в обем на бетона, до стойности на относителната плътност около 0,13. В последствие допълнителното добавено количество вода води до увеличаване на общия обем на бетона, с което относителната плътността намалява. На практика винаги се взема по-висока стойност от теоретичната, за да се гарантира „точката на протичане“ на състава (виж гл. III т. 5.1).



фиг. I. 8: а) Якост на натиск, отнесена към В/Ц отношение [\*], б) относителна плътност към В/Св отношение [\*\*]

\*[Graf, 1935]

\*\*[Richard and Cheyrezy, 1995]

Хидратацията при СВЯБ настъпва много бързо и след изчерпване на почти всичката вода тя започва да се забавя. До 28-мия ден се достига приблизително 96% от крайната хидратация, като след 90-тия ден тя напълно спира [Voort, 2008]. Литературните данни показват, че хидратацията на цимента при В/Ц от 0,2 до 0,22 е между 50% и 55% [Voort, 2008, Ewert, 2008]. Други изследвания показват, че степента на хидратация може да бъде в по-широки граници – между 30% и 60% [Habel, 2006-1, Cheyrezy, 1995]. Поради това използването на смлян кварцов пясък, във вид на брашно, може да замени част от цимента, поради по-фината му структура и след определена термична обработка част от него да влезе в допълнително взаимодействие и да увеличи количеството на хидратационните продукти. Използването на толкова голямо количество цимент (над 900 kg/m<sup>3</sup>) обаче се дължи на увеличеното общо количество вода, при запазен В/Ц фактор.

Друг положителен ефект от ниското В/Ц отношение е елиминирането на капиларната порестост, намаляване на пластичното и влажностното съсъхване. Поради липсата на свободна вода. При СВЯБ съсъхването се дължи главно на контракционната компонента (автогенно съсъхване), по-интензивно в рамките на първите 7-ем дни, след което запазва характера си във времето [Voort, 2008].

### 2.3 Начини за постигане на максимална плътност на СВЯБ

За оптимизиране състава на бетона са разработени серия от теоретични модели [Graybeal, 2005], още от началото на миналия век. Една от основните теории е тази на *Fuller* и *Thompson* [Fuller & Thompson, 1907] за постигане максимална плътност на скелета от добавъчни материали. В последствие тя е усъвършенствана от *Schwanda* [Schwanda, 1956], от гледна точка на по-компактно подреждане на отделните зърна и е доработена от *Krell* и *Reschke* [Krell, 1985, Reschke, 2001]. *Krell* и *Reschke* изследват влиянието на зърнометричния състав на фините частици върху свойствата на прясната бетонна смес и втвърдения бетон. За целта те добавят фракционирани количества цимент и АМД, като по този начин изваждат зависимост между характеристиките на отделните материали и плътността на новополучения бетон.

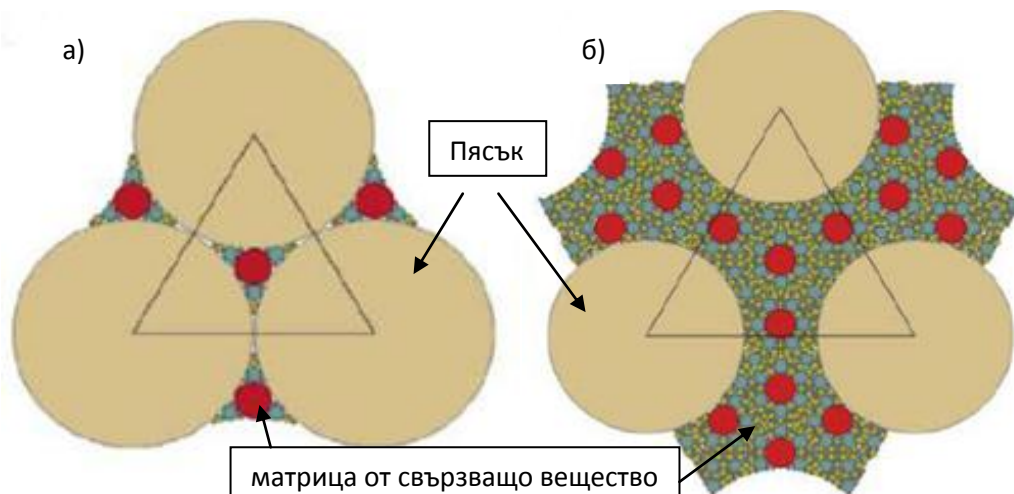
При създаването на СВЯБ са адаптирани някои от горните теории, например на *Fuller* и *Thompson*. Наред с тях *P. Richard* и *M. Cheyrezy* използват модифицирана теория за Аполоновото разположение на частиците [Boyd, 1973] (фиг. I. 9-а).

#### 2.3.1 Метод чрез пространствено уплътняване

Методът се базира на концепцията, при която, чрез използване на фракциониран пясък се постига подвижност на прясната бетонна смес, без той да играе роля на твърд скелет, като материал с най-голям размер на частиците.

На фиг. I. 9-а е показано най-характерното разположение на зърната на добавъчния материал, с цел постигане на по-висока якост при обикновения бетон (Аполоново уплътняване). При него се наблюдава поемане на напреженията от по-едрите частици и запълване на празнините между тях с дребнозърнест материал, при което твърдият скелет остава неподвижен [Voort, 2008].

След елиминирането на ЕДМ от състава на СВЯБ, принципът за Аполоново разположение на зърната става неприложим. Полученото междузърнесто пространството, между зърната на пясъка, се получава силно редуцирано, което прави невъзможно запълването му с цялата матрица от свързващо вещество. Пясъкът остава да действа като неподвижен скелет и ефекта от високоякоостната матрица не може а бъде реализиран. Така се появява теорията за пространственото уплътняване (*spacing packing*) при която зърнометрията е подбрана така, че всяка една частица да е заобиколена от поне един слой от следващата по финост фракция (фиг 9-б). Тази теория е доразвита от *P. Richard* и *M. Cheyrezy* [Richard & Cheyrezy, 1995], които я прилагат към състава на СВЯБ (фиг. I. 9-б). Те откриват, че минималното съотношение между диаметрите на два последователни компонента от зърнометрията трябва да е от порядъка на 13, което ще удовлетвори теоретичната постановка за пространствено уплътняване на бетона. Така в получената смес ще има по-равномерно поемане на напреженията между отделните частици и по-добра подвижност между тях. Компонентите с по-малка зърнометрия позволяват на тези с по-голям диаметър да се движат свободно един спрямо друг.



фиг. 1. 9: Схеми на „Аполоново уплътнение“ (а) и „Пространствено уплътняване“ (б) [Boyd, 1973]

За постигане на разлика от 13 между две отделните фракции от вложените материали се налага използването на кварцово брашно. Ефектът от използването му води до постигане от една страна на компактна структура, а от друга увеличава продуктите от хидратацията, поради вторичното му взаимодействие.

### 2.3.2 Метод чрез използване на референтни зърнометрични криви

Вторият срещан в литературата подход за постигане на максимална плътност на скелета на СВЯБ, е чрез референтни зърнометрични криви. Оптимизацията на състава цели постигане на такова взаимно подреждане на зърната на отделните материали, при което да се създаде максимално плътна структура, в която капиларните и въздушни пори са много малко или практически липсват. Най-популярните методи, създадени за обикновените бетони, са тези на *Fuller & Thompson* (уравнение 1), *Funk* (уравнение 2), *Andreassen* (уравнение 3) и *Modified Andreassen* (реализиран от *Dinger* и *Funk*) (уравнение 4). Моделите се базират на предпоставката, че отделните материали са със сферична форма на зърната.

$$CPFT = \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

$$CPFT = 0,37 \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} \cdot 100[\%] \quad (2)$$

$$CPFT = \frac{d^{0,37} - D_{min}^{0,37}}{D_{max}^{0,37} - D_{min}^{0,37}} \cdot 100[\%] \quad (3)$$

$$CPFT = \frac{d^{0,25} - D_{min}^{0,25}}{D_{max}^{0,25} - D_{min}^{0,25}} \cdot 100[\%] \quad (4)$$

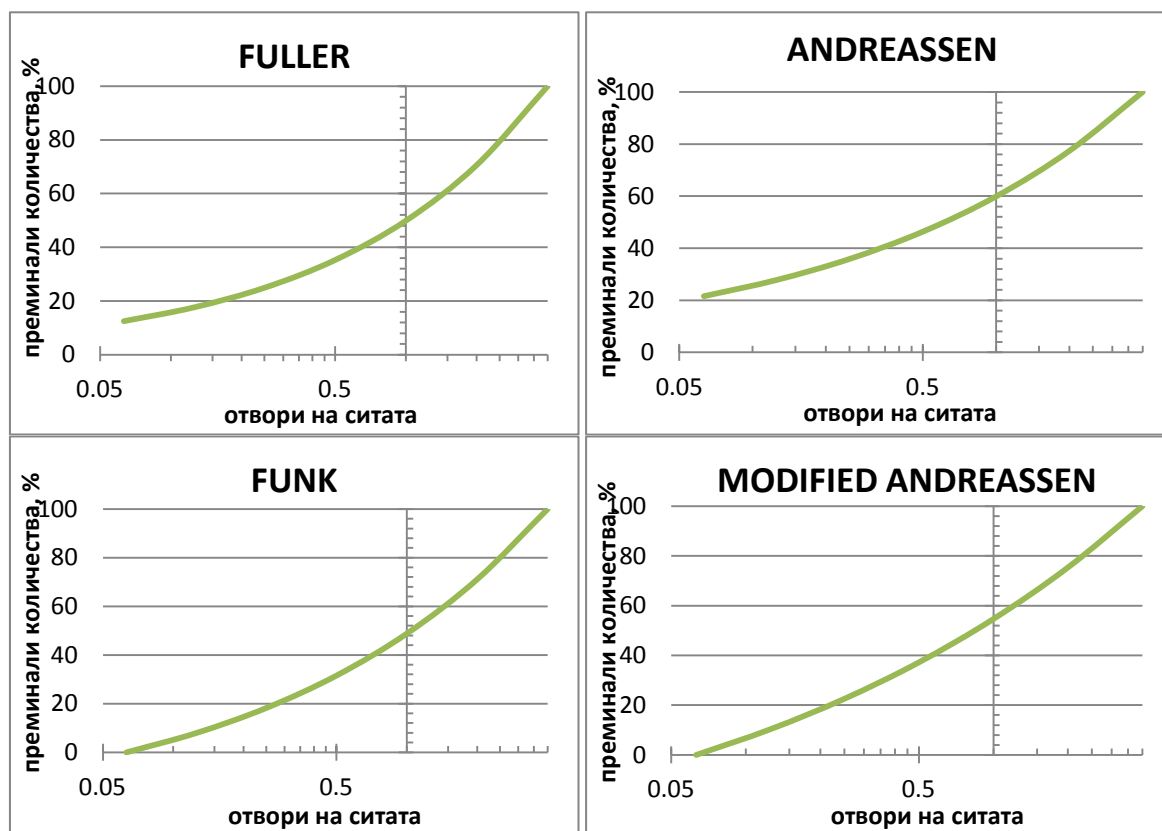
където:

CPFT= Общо преминало количество, в %, през сито с отвор  $d$ , mm;

$D_{max}$ = Максимален размер на зърната от използваните материали, mm;

$D_{min}$ = Минимален размер на зърната от използваните материали, mm.

На фиг. I. 10 са представени уравнения от 1 до 4 в графичен вид при произволно избран фиксиран максимален диаметър на зърната на добавъчния материал. Методът не налага ограничения върху максималния използван диаметър.



фиг. I. 10: Зърнометрични криви според теориите на *Fuller*, *Andreassen*, *Funk* и *Modified Andreassen*

Една от първите развити теории на базата на референтна крива е тази на *Furnas* [Furnas, 1931], която представя разпределението на отделните зърна в състава на бетона, но при използване само на една фракция пясък. Поради това тя се оказва не достатъчна в случай на СВЯБ. Друга появила се крива е тази на *Andreassen*, при която не се наблюдават прекъсвания в зърномертията [Andreassen, 1930]. Отделни несъвършенства в използваните криви са отстранени и е представена комбинирана крива на *Fuller & Andreassen*, която по-късно е преработена от *Dinger & Funk* [Dinger & Funk, 1993]. Понастоящем при обикновените бетони по-често се прилага модела на *Dinger & Funk*, по-известна под наименованието *Modified Andreassen* [Myhre, 1996]. При тази теория не се използва фактор, който да отчита самата форма на зърната, а се изисква само те да бъдат с подобна форма. В сравнение с модела на *Funk*, новото подобрение въвежда минимален размер на отделното зърно и освен това във формулата диаметрите на частиците се покачват на степен 0,25. Това позволява формиране на преобладаващо течни смеси, докато при първоначалния предложен вариант на *Andreassen* (урав. 3), диаметрите са на степента 0,37, при което са получени по-слабо обработваеми смеси. В резултат на намалената стойност на степения показател се увеличава количеството от фината фракция. При СВЯБ това води до използване на кварцово брашно. При В/Ц отношение от порядъка на 0,20-0,22, се създават известни затруднения поради силно развитата специфична повърхност на всички влагани компоненти. По тази причина се налага влагането на големи количества суперпластифицираща

добавка, чрез която да се реализира отблъскване на отделните реактивни частици, с което да се подобри обработваемостта на сместа като цяло.

След построяването на теоретична крива по избран модел, се моделира експериментална крива, чрез комбинирането на различни количества от изходните материали. По своята форма тя трябва максимално да следва теоретично построената.

Следователно, в световната литература, за сега не е установена единна методика, по която да бъде проектиран състава на СВЯБ.

### **3. Технологични особености на СВЯБ**

Изследвано е влиянието на технологичните параметри върху поведението на СВЯБ и начините на полагане на бетонната смес.

Както при обикновените, така и за високоякоостните бетони съществуват различни мнения по отношение на времето за добавяне на суперпластификатора (СП) в сместа. Най-често се препоръчва сместването да става едновременно с останалите компоненти на СВЯБ. По този начин, обаче е възможно частичното блокиране на хидратацията на  $C_3A$  [Aitcin, 1998] и по този начин възпрепятстване образуването на кристалите на еtringита, до момента на пълното изконсумиране на СП [Prince, 2001]. Според други по-рационално е да се прибави 2/3 от цялото количество суперпластификатор в началото на разбъркване на сместа, а в края на периода на приготвяне да се добави останалата 1/3 [Ronneberg, 1990]. По този начин може да се реализира известно редуциране на общото вложено количество, без да се намали обработваемостта, но от друга страна това води до увеличаване на времето за изготвяне на бетона. Третата група автори предлагат да се добави, част от СП в момента на забъркването и в последствие, след транспортиране на сместа, преди полагането ѝ, да се прибави останалото количество [Cook, 1989]. Този начин е подходящ при използване на СП, който води до бърза загуба на обработваемост бързо във времето.

Според други изследвания, скоростта на забъркване на бетонната смес е определящ фактор за продължителността на нейното изготвяне [Park, 2008]. Препоръчва се предварително сухо смесване на цимента, МСП, кварцовия пясък и брашното в продължение на 10 мин (при 40 оборота на въртене на миксера). Според други, това време може да бъде редуцирано до 2 до 5 минути, достатъчни за постигане на определена степен на уплътнение, според теоретичните модели за разпределение на зърната [Loukili, 2008]. В последствие да се добави водата, в която е разтворено цялото количество СП и в продължение на още 10 min да се разбърква на по-висока скорост – 70 оборота, за което време да се реализира пълно хомогенизиране на сместа. Докато според трети, водата се добавя в рамките на 3 до 5 минути в целия обем, на по-ниска скорост (от 2-3 m/s) и в последствие започва същинското разбъркване на СВЯБ на бързи обороти (от 5-6 m/s) [Ipek, 2011]. Процесът на разбъркване продължава до така наречената „turning point” – „точка на пречупване” [Garas, 2009], след която изцяло сухата смес започва да преминава в пластично състояние и да протича, като това е съпроводено и със смяна на цвета ѝ от светло към по-тъмно сиво. Необходими са още няколко минути разбъркване до пълното ѝ хомогенизиране. След това се добавят микрофибрите (стоманените и полипропиленовите) в рамките на 2 до 5 минути. Последва разбъркване за още 2 минути до пълното хомогенизиране

на сместа. Резултатът е една смес, напълно течлива и лесна за полагане в кофражните форми, която може да се уплътни с класически методи (вибриране).

Установена е зависимост между степента на уплътняване при дадена зърнометрия и скоростта на смесване. Изведен е параметър, наречен относително уплътнена структура (*relative solid concentration*), които отразява реалната към максимално възможната степен на уплътняване [Mazanec, 2008]. За оптимална е установена първо бърза скорост на забъркване от 6 m/s в продължение на 40 sec, последвана от бавна скорост от 1,4 m/s за период от 70 sec. Оказва се, че при различни апаратури, времето на забъркване е доста по-дълго.

Един от проблемите, който възникват в процеса на работа със СВЯБ е сравнително голямото въздуховъвличане, причинено най-вече от продължителното забъркване [Mazanec, 2008], а според други автори – и от по-голямото количество суперпластифицираща добавка [Terzijski, 2004]. Освен допълнително вибриране на прясната смес, друг метод е чрез упражняване на налягане до времето на свързване. От друга страна прилагането на вакуум миксери намалява възможността от въздуховличане [Dils, 2012].

Продължителното хомогенизиране на бетонната смес при СВЯБ води до завишаване на температурата на сместа, в сравнение с обикновения бетон. Когато температурата на сместа е над 25°C, при лятно бетониране, възниква опасността от поява на топлинни напрежения в СВЯБ, които биха могли да го напукат. Следователно е необходимо да се предприемат мерки за охлаждане/предодвратяване на прегряване на бетоновите елементи. При зимно бетониране (с температура на околната среда под 5°C) е необходимо да се избегне рязкото охлаждане на топлата бетонна смес, за да не възникне голям темпераурен градиент между повърхността и вътрешността на елементите от СВЯБ [Voort, 2008].

До тук описаните технологични параметри се отнасят за бетон, изливан на място. СВЯБ много често се изготвят в заводски условия, като се прилага топло-влажностна обработка: изваряване, пропарване и автоклавиране. След декофрирането на бетоновите елементи на 1-вия ден, се подлагат на съответната обработка. Изваряването представлява постоянно поддържане на температура на водата от 90°C, в продължение на 6 дена, след което те престояват при 20±2°C и относителна влажност от 60±5% [Yang, 2008]. Пропарването обхваща 48 часа третиране на пробните образци под пара, при температура от 95±5°C [Garas, 2009], а според други [Yazici, 2008; Ipek, 2011] за пропарването са необходими 3 дена, с постоянно показване на температурата с 11°C/h до достигане на максимума от 100°C. Оптимална, по отношение на получени механични характеристики и редуцираното технологично време за третиране на СВЯБ, се оказва автоклавната топло-влажностна обработка. Тя се реализира при различни температурни режими: при 210°C в продължение на 8 часа [Yazici, 2008] и от 250°C до 400°C в продължение на 8-10 часа [Richard & Cheyrezy, 1995].

Друг успешен метод за увеличаване на якостта на натиск на матрицата се явява използването на налягане до времето на свързване на прясната бетонна смес, чрез който допълнително се намалява порестостта и се освобождава малко количество излишна вода. Приложеното налягане може да бъде:

- 2,5 МПа [Торси, 2005], последващо пропарване 7 дена при 250 °С и после 7 дена при 90°С, 253 МПа постигната якост на натиск и 63,7МПа якост на опън при огъване;
- 50 МПа [Teichman, 2004], последващо пропарване 7 дена при 250 °С, постигнатата якост на натиск е 487 МПа;
- 60 МПа [Dugat, 1996], последващо пропарване първо при 90 °С и после увеличено до 250 °С. Постигнатата якост на натиск е 500 МПа.

#### 4. Изследвания върху макро- и микроструктурата на СВЯБ

Прегледът на литературните данни, свързани с микро- и макроструктурата, е направен в контекста на изпитванията на механичните свойства на СВЯБ. Наличието на ЕДМ е разгледано от гледна точка на създадената плаваща структура и отражението ѝ върху необходимата енергия за разрушаване на отделните компоненти на състава. Съществуват известни противоречия по отношение плътността на преходната зона: влакнеста армировка-матрица, зависима от вида и количеството на хидратационните продукти в нея и наличието им в целия обем. Неизяснен остава въпросът дали в структурата на СВЯБ има портландит и еtringит, както и дали голямото количество МСП и кварцовото брашно се изконсумира в пуцоланова реакция. Минималните изследвания на степента на хидратация и отделеното количество топлина не дават представа за развитието на тези процеси във времето. Противоречив остава въпросът с възникналите собствени деформации от съсъхване след прилагане на топло-влажностна обработка.

##### 5.5 Макроструктура в зависимост от зърнометрията

От гледна точка механичните свойства, за обикновения бетон е типична хетерогенната структура, с различни якостно-деформационни характеристики на циментовия камък (матрицата), добавъчния материал (особено ЕДМ) и зоната около добавъчните материали (*interfacial zone* – ITZ). При СВЯБ обаче, якостта на циментовата матрица е значително увеличена и достига тази на ЕДМ [Xincheng, 2013], като ITZ зоната е значително уплътнена и дори с по-висока якост от тази на самата матрица [Sorelli, 2008]. Това превръща матрицата на СВЯБ в материал със структура, която е близка до хомогенната.

При изготвени сравнителни състави на СВЯБ, с вложен ЕДМ, по време на натоварване се наблюдава разрушение или през добавъчния материал или едновременно през ЕДМ и циментовата паста, но никога само през матрицата на СВЯБ. Създаването на микропукнатини, които в последствие да се разрастват и предизвикат разрушение на пробното тяло, става винаги в отслабена зона и те се разпространяват през местата, с по-ниска енергия необходима за разрушение. Този процес е зависим от изразходената енергия по пътя на разрушение. На фиг. I. 11 са представени два възможни пътя (1 и 2) на преминаване на разрушителната сила – където  $S_1$  е дължината на пътя през добавъчния материал и  $S_2$  е дължината на пътя през циментовата паста. Респективно  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  са енергиите необходими за разрушение на единица дължина от добавъчния материал и ITZ зоната. Когато  $S_1 * \gamma_1 > S_2 * \gamma_2$ , пътят на разрушение минава през ITZ зоната, а когато  $S_1 * \gamma_1 < S_2 * \gamma_2$  е през добавъчния материал. Когато якостта на добавъчния материал е по-голяма, то  $\gamma_1$  е по-голяма. При обикновените бетони, поради слабата ITZ зона,  $\gamma_2$  е по-ниска, така че въпреки че  $S_1 < S_2$ ,  $S_2 * \gamma_2$  е винаги по-малко от  $S_1 * \gamma_1$

и разрушението настъпва през ITZ зоната. При СВЯБ, якостта на ITZ зоната е значително по-голяма от тази на обикновения бетон и по-този начин  $\gamma_2$  е значително увеличена. Дължината на пътя  $S_2$  е винаги по-голяма от тази на  $S_1$  и поради това, че  $S_2 * \gamma_2$  винаги превишава  $S_1 * \gamma_1$ , то пътят на разрушение при СВЯБ минава през добавъчния материал. Поради тази причина влагането на ЕДМ с големи размери и с по-нисък Е-модул при СВЯБ може да доведе до намаляване на якостта му на натиск [Xincheng, 2013].



фиг. 1. 11: Схематично представяне на пътя на разрушение на СВЯБ при използване на ЕДМ [Xincheng, 2013]

По своята същност, СВЯБ е материал, които изключва формирането на въздушни пори и шупли в структурата си. Осигурената висока подвижност на прясната бетонна смес, въпреки влагането на материали с фина зърнометрия, при В/Ц отношение от 0,20-0,22, чрез използването на голямо количество суперпластификатор, уплътнява структурата на бетона. Наличието на минимално количество въздушни пори се свързва с несъвършенства на технологията на приготвяне на сместа.

Разпределението на влакнестата армировка, в обема на прясната бетонна смес, би могло да формира дефекти в структурата на СВЯБ. Поради това се прилага сместаването им непосредствено след ходогенизирането на сместа (виж. гл. I. т. 2.1.4). Разпределението и ориентацията им в обема зависи от посоката на полагане на прясната бетонна смес в кофражната форма и това най-силно рефлектира на якостта на опън [Pansuk, 2008].

## 5.6 Микроструктура на СВЯБ

Микроструктурата на СВЯБ е изследвана от различни автори [Cheyrezy, 1995; Cheyrezy, Maret & Frouin, 1995; Janotka, 2005; Way, 2012], чрез серия от методи: Сканираща електронна микроскопия (СЕМ), Диференциално-термичен Анализ (ДТА), Термо-гравиметричен анализ (ТГА), Ренгено-фазов Анализ (РФА), Ренгено-структурен Анализ (РСА), Живачна порьозиметрия и др. Използването на тези методи дава представа за вида на хидратационните продукти, за количеството на свободната и химически свързаната вода в бетона, количеството и разпределението на порите по размери, качеството на ITZ зоната и др.

Процесът на взаимодействие между отделните компоненти на сместа и формирането на нови хидратационни продукти е винаги свързан със загуба на маса и освобождаване на



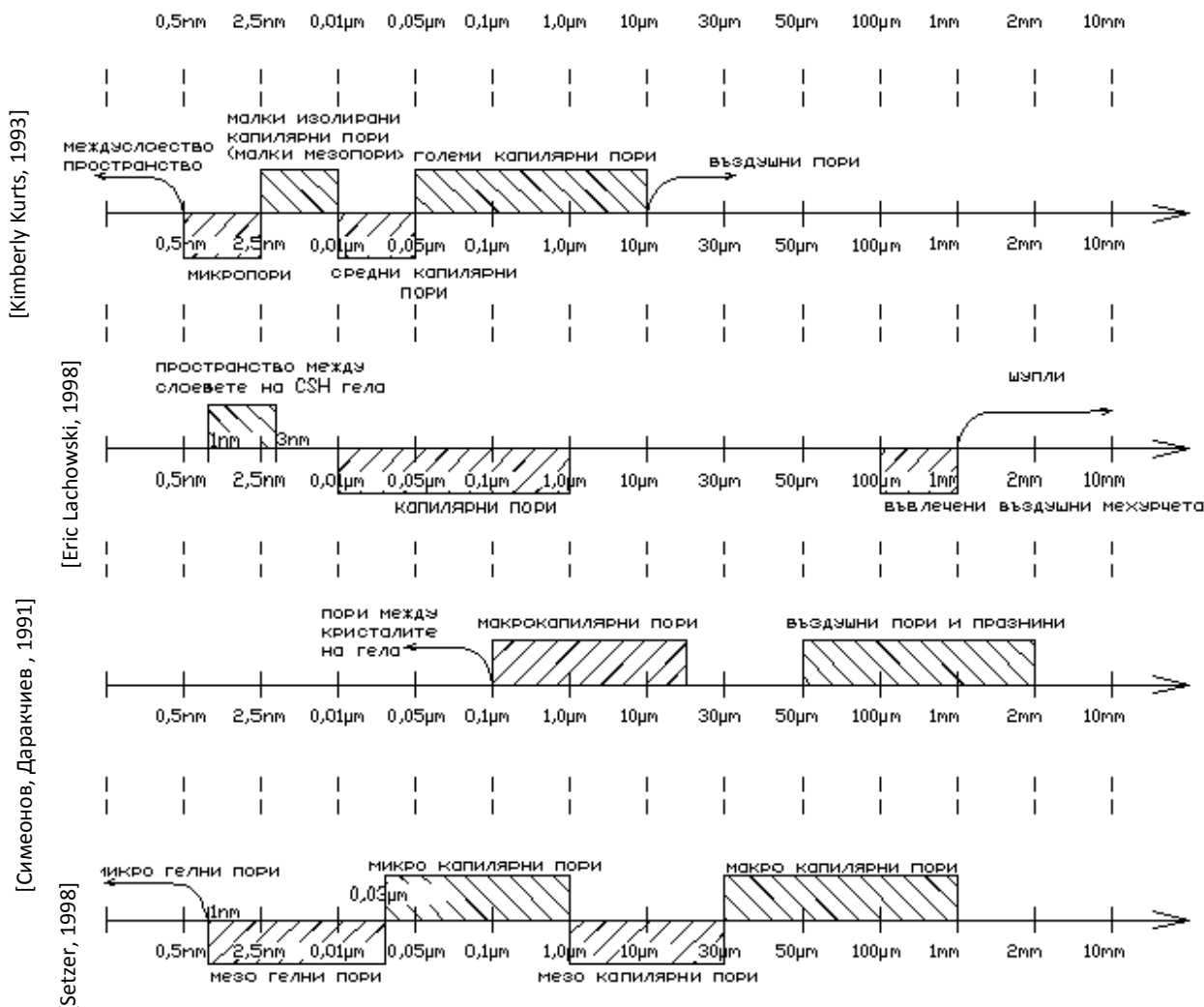
определено количество топлина. ДТА и ТГА дават възможност за анализиране промените в топлосъдържанието и загубата на маса, след подлагане на висока температура. Според температурата, при която се реализират преобразуванията в структурата на бетона, може да се определи техния вид и характер. От друга страна живачната порьозиметрия е ефективен метод за изследване вида и количеството на порите в състава на бетона, с оглед определяне плътността на структурата му. При СВЯБ се наблюдава различно разпределение на порите по размери в сравнение с обикновения бетон, тъй като преобладават микро- и нанокапилярните пори [Schmidt % Fehling, 2005]. Подлагането на топло-влажностна обработка на СВЯБ води до съществени промени в състава и оттам и на поровото пространство [Richard % Cheyrezy, 1995]. Този процес е свързан с формирането на по-голямо количество CSH гел в структурата на СВЯБ. Като цяло е отчетена над 3-4 пъти по-плътна структура в сравнение с обикновения бетон [Zenati, 2009]. Чрез СЕМ е установено, че в хидратните новообразувания почти липсва портландит и еtringит, когато СВЯБ е бил подложен на топло-влажностна обработка [Loukili, 1999]. Могат също така да бъдат проследени преходните зони между матрицата и добавъчния материал, както и сцеплението с дисперсната армировка.

#### 5.6.1 Физическа структура

Едно от основните предимства на СВЯБ е неговата значително подобрена микроструктура, която води не само до по-високи якостно характеристики, но и до по-голяма дълготрайност във времето. Ниските стойности на порьозност, особено капилярна порьозност, липсата на свободна вода и по-компактната структура на гела, способстват за подобряване качествата на материала. В резултат на това използването на СВЯБ предизвиква намаляване на разходите за поддръжка на изградените съоръжения и от там и на крайната цена.

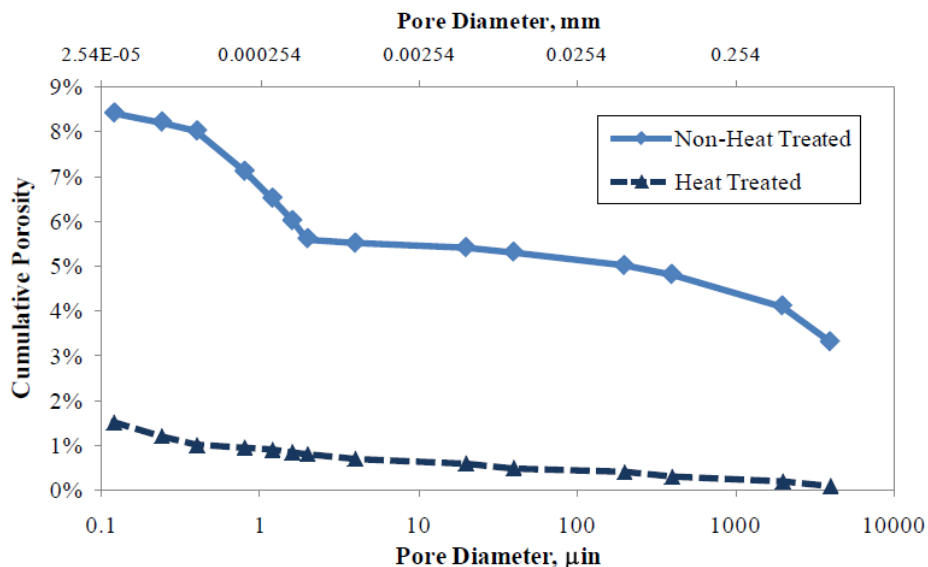
##### 5.6.1.1 Особености на поровото пространство

В литературата не съществува единна класификация на разпределението на порите в бетона/циментовия камък по размери - фиг. I. 12. Процесите на хидратация са съпроводени с намаляване на обема на материала, поради намаляване на обема на твърдите частици на хидратационните продукти, в сравнение с изходните материали (цимент, МСП и вода) преди да бъдат вложени. Порите заемат пространството между хидратационните продукти, като част от тях са запълнени с вода (виж гл. I. т. 4.2.1.2). Според размера на порите, водата, която навлиза в тях, може да бъде: свободна вода, междуслоеста вода, физически свързана вода и въвлечена вода. Образувалите се въздушни пори, от въвлечения въздух в бетона, при различните класификации се определят с размер над 10  $\mu\text{m}$  до 2 mm. Капилярните пори според някои източници се разделят на макро- мезо- и микрокапилярни пори и най-общо са в интервала 1 mm – 2,5 nm. Докато според други, още порите под 0,1  $\mu\text{m}$ , следва да се разглеждат като пори на гела.



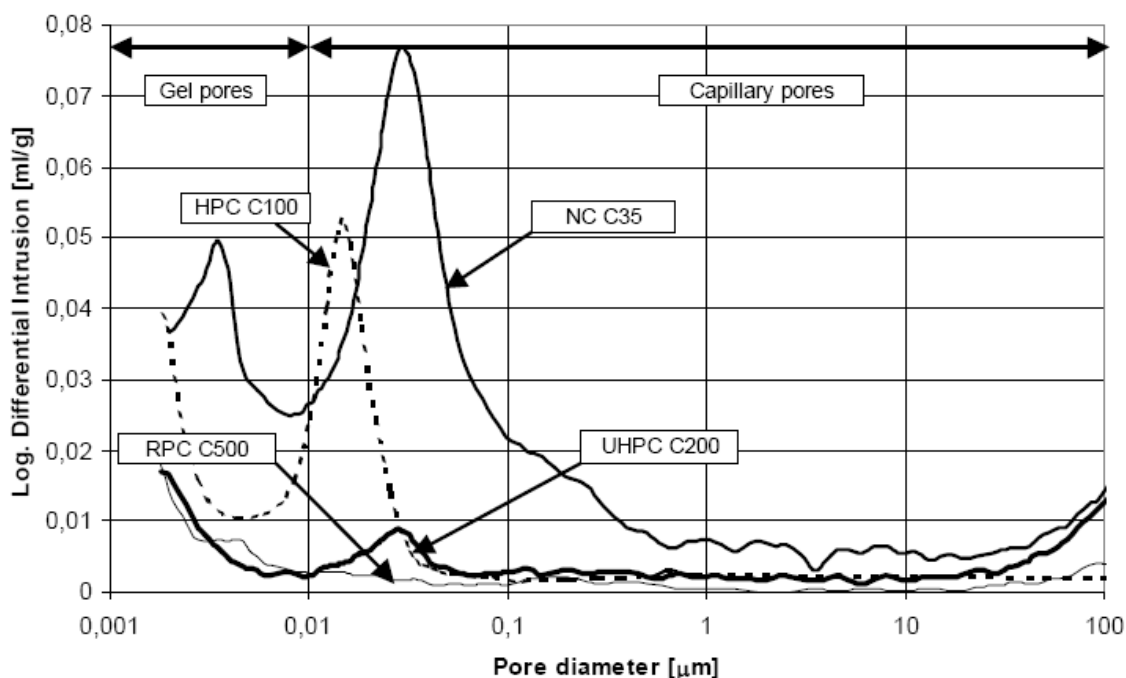
фиг. I. 12: Различни класификации на порите по размери

Малкото количество несвързани пори е причина за високата дълготрайност на СВЯБ. Съществена разлика в плътността на материала се установява след прилагане на топло-влажностна обработка на елементите. Тя води до намаляване на общата порьозност и редуцира размера на порите (фиг. I. 13). Това се дължи на вторичното взаимодействие на цимента с АМД. Образувалите се хидратационни продукти се разполагат предимно в големите въздушни пори.



фиг. I. 13: Интегрална крива на разпределението на порите по размери при СВЯБ, в %, при нетретирани и третиранни образци след топло-влажностно обработени [127 Cheyrezy, Marat & Frouin, 1995]

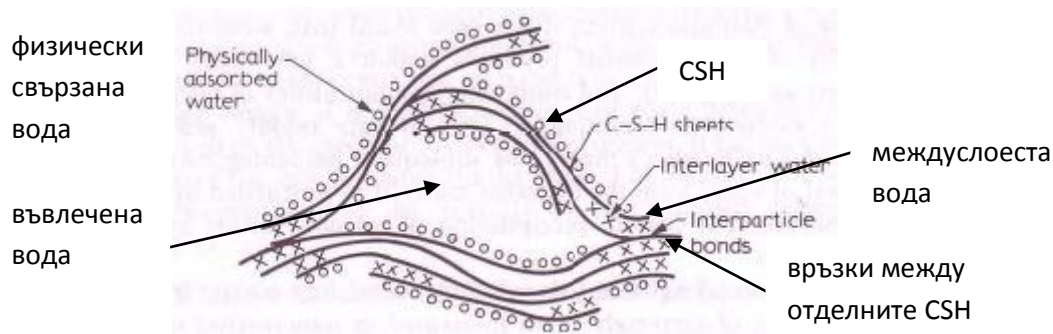
Фигура 14 показва сравнителна характеристика на разпределението на порите по размери, представена в логаритмичен вид, при различни бетони, с якости от 35 MPa; 100 MPa; 200 MPa и 500 MPa. С нарастване на якостта на бетона от 35 MPa на 100 MPa се наблюдава намаляване както на капиларните пори, така и на порите на гела. При СВЯБ (с якост 200 MPa) се отчита показване на количеството на порите с размери от порядъка на 100 µm, поради известно въздуховъвличане. Основната компонента на поровото пространство са порите на CSH гела (1-10 nm), но като цяло техният обем е по-малък от този при обикновения бетон. Причината за това е по-голямото количество образуван CSH гел, особено след топло-влажностна обработка, които респективно води до повишаване на общото количество пори на гела. След прилагане на налягане до времето на свързване (бетон с якост 500 MPa) се намаляват дефектите, причинени от въвлечения въздух и значително се редуцира размера на порите около 0,05 µm.



фиг. I. 14: Диференциална крива на разпределението на порите по размери в СВЯБ, при бетон с различни якостни показатели – при 35 MPa; 100 MPa; 200 MPa и при 500 MPa [Schmidt & Fehling, 2005]

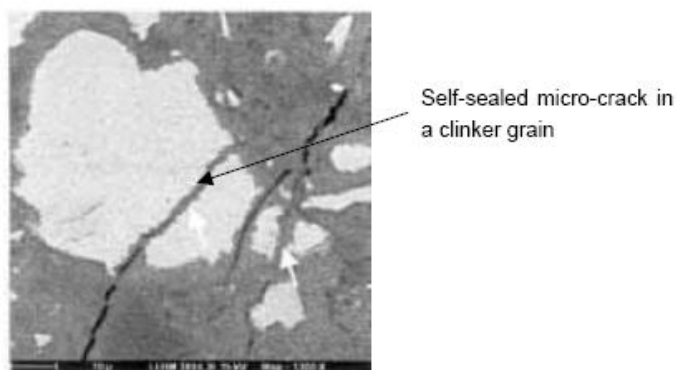
#### 5.6.1.2 Структура на гела

Структурата на втвърдения бетон е изградена от различни продукти на хидратация, вода и система от пори. CSH гела е комплексна структура, която образува сложна система от калциеви хидросиликати с наличие на няколко различни вида вода (фиг. I. 15). Освен химически свързаната вода, за получаване на продукти на хидратация, CSH гела включва физически свързана вода, част от която се разполага върху частиците на гела, а друга част е разположена между отделните му слоеве (междуслоеста вода) и въвлечена вода, която не е химически свързана [Neville, 2002]. В структурата на СВЯБ, за разлика от тази на обикновения бетон, се наблюдават много по-голямо количество нехидратирани циментови частици. При обикновения бетон свободната вода запълва микрокапилярните пори между хидратиралите циментови частици и е готова да влезе във взаимодействие, докато при СВЯБ тя почти изцяло липсва. Количеството на водата в капилярните пори намалява при формиране на нови хидратационни продукти, които заемат свободните пространства, докато в същото време водата в гела се увеличава с намаляване на общата порьозност.



фиг. I. 15: Структура на хидросиликатите [Neville, 2002]

Ниското В/Ц отношение води до сближаване на зърната на цимента, като се забелязват различни хидратационни продукти. Съществуват микро сферични пори ( $10\ \mu\text{m}$  и  $300\ \mu\text{m}$ ) от въвлечен въздух, които са формирани вследствие на използването на по-голямо количество химическа добавка [Yazici, 2008]. При подлагане на специална топло-влажностна обработка, като пропарване и автоклавиране, тези нормално празни пори частично се запълват с нови продукти на хидратацията, като тоберморит и други. Подобни образувания се наблюдават и след влагането на АМД, като специално при използването на МСП води до формиране на по-големи по размер "иглени образувания" (*jennite-like structures*) отколкото при другите АМД, като метакаолин, летяща пепел от ТЕЦ, доменна шлака и др. Много ниската степен на порьозност рефлектира на намалено свободно пространство за развитие на CSH кристалите. В същото време съществуват и много нехидратирани циментови зърна. Според [Sritharan, 2003; Granger, 2006] тези циментови зърна биха могли да доведат до затваряне на малки пукнатини в матрицата, при добавяне на минимално количество вода, в мястото на пукнатината. Това би превърнало СВЯБ в самозаздравяващ се материал (сн. I. 2).



сн. I. 2: Самозаздравяване на микропукнатина [Acker, 2004]

#### 5.6.1.3 Контактни зони

В сравнение с високоякоостния бетон, а особено с обикновения бетон, СВЯБ се отличава с изключително малка дебелина на ITZ зоната [Reda, 1998]. Микропукнатините около добавъчните материали са много малки, а кристалите на портландита, ако ги има, са локализирани в тази околност. Според други автори, изцяло липсва ITZ зона, което вероятно се дължи за много добре изградената връзка между циментовите зърна и повърхността на добавъчния материал [Scheydt, 2012]. Характерно за преходната зона са също места с неидентифициран състав. Материалите там са в гелна фаза и с аморфна структура. Тези неидентифицирани вещества могат да бъдат резултат от реакцията на МСП с NaOH, освободен в ранните часове на хидратацията, в резултат на взаимодействието на свободния  $\text{Na}_2\text{O}$  с водата. Такъв тип структура не се наблюдава в случая на по-малки количество МСП в състава на СВЯБ.

Наблюденията на контактната зона, чрез ренгено-фазов анализ (XRD), показват липса на високи пикове при  $2,63\text{\AA}$  и  $4,90\text{\AA}$ , които по принцип идентифицират наличието на портландит [Reda, 2008]. Това се потвърждава и от снимките направени чрез SEM [Lowke, 2012].

Интерес представляват изследванията, свързани с определяне на сцеплението на влакната с матрицата, ефекта от разпределението им в състава на СВЯБ и отражението му върху структурата. Установено е, че гладки влакна, които се използват, в действителност имат

надлъжни грапавини, формирани в процеса им на производство [Lowke, 2012]. По този начин допълнително се увеличава сцеплението на влакната с матрицата.

Снимка 3, направени с микроскоп, показва възможността за понасяне на напрежения от стоманените влакна, появили се в зоните на микропукнатините.



сн. I. 3: Премостване на микропукнатина чрез стоманено влакно [Voort, 2008]

Някои изследвания са фокусирани в проследяване на зависимостта между състава на бетона и плътността на ITZ зоната, спрямо отношението Ca/Si [Lowke, 2012]. Извършено е сравнение чрез замяна на кварцовото брашно с варовиково и ефекта му върху плътността. При по-голямо съдържание на калций и следователно по-голямо Ca/Si отношение в преходната зона, се наблюдава завишено количество на варовиково брашно, което показва, че цимента тук е в по-малки количества. По този начин цементовите зърна са на по-голямо разстояние, с което се намалява броя на контактните точки между матрицата и влакната. С увеличаване на едрината на цементовите зърна се увеличава и количеството на фината фракция, която трябва да попълва пространствата между тях и влакната. Но по-голямото количество фина фракция варовик води до по-ниска плътност в ITZ зоната. При използването на кварцово брашно обаче не се наблюдава зависимост от увеличаване на максималната плътност на ITZ зоната. При него обаче използването на много фина фракция в ITZ предизвиква положителен ефект върху сцеплението, дължаща се на засилената хидратация, в резултат на формирания допълнителен CSH гел.

Изследването на микроструктурата на СВЯБ дава възможност за прогнозиране поведението му при пожар. Поради много ниската му порьозност, съществува опасност СВЯБ да се разруши взривно, поради много малкия дял на свързани пори: водните пари не могат да бъдат освободен, създава се огромно налягане, а и използването на големи количества кварцово брашно и кварцов пясък също водят до възникване на напрежения, породени от полиморфните превръщания на кварца [Way, 2012; Heinz, 2004; Wille, 2004]. Наред с това, високи температури могат да доведат до допълнително намаляване на якостните свойства, поради химическото разпадане на отделните компоненти на композита [Odelson, 2007; Alarcon-Ruiz, 2005]. При температури от 1000°C бетонът се смята, че изцяло е загубил носещата си способност [Way, 2012], като до 400°C е редуцирал само малка част от якостта си на натиск [Joongwon, 2010]. Високите температури намаляват модула на еластичност, пукнатинуоустойчивостта, дуктилността, загубата на сцепление с армировката и др. [Janotka, 2005]. Загубата на тези важни структурни характеристика на материала е в резултат на

комплексни фактори, които предизвикват промяна на фазовия състав и поровото пространство на композита. Основно това са видът и качеството на изходните материали, съотношението на отделните компоненти, условията на отлежаване и др. Покачването на температурата води до качествено влошаване на структурата на бетона, чрез разпадане, причинено от нарушаване на основните процеси на хидратация на цимента [Cong, 1995].

### 5.6.2 Химична структура

Според литературните източници [Симеонов, 1991], постигането на по-високи механични характеристики на цементовите композити се дължи на формираните новообразувания на ниво нискоосновни калциеви хидросиликати, докато при СВЯБ се твърди, че доминират високоосновните [Sorelli, 2008; Ulm, 2008].

Предполага се, че  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  е в голяма степен консумиран при пуцолановата реакция с МСП и кварцовото брашно, което води до образуване на CSH гел. Основното количество образувал се CSH гел е от вида *xonotlite* ( $\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$ ), с по-малки количества от *tobermorite* ( $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ ) и *scawtite* ( $\text{C}_7\text{S}_6\text{CH}_2$ ). Според други липсват по-едри кристали на  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [Cheyrezy, Marat & Frouin, 1995; Reda, 1999]. Това се дължи на много ниското В/Ц отношение, приложеното налягане до началото на свързване и много ниската степен на порьозност, водещи до ограничаване на свободното пространство за развитие на кристалите на портландита [Reda, 1999]. Прилагането на допълнителна топло-влажностна обработка на втвърдения СВЯБ предизвиква пуцоланова реакция, при която се консумират повечето слаби  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  кристали, получени при хидратацията.

Изследванията чрез XRD и SEM едновременно, потвърждават, че липсват и характерните иглени форми на еtringита. В условията на понижена алкалност (заради свързания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в CSH), преобладават моносулфатните форми на калциевите-хидросулфоалуминати. Понякога в резултат на твърде ранното термично третиране на пробните тела може да се образува еtringит в по-късна възраст [Lowke, 2004, Mörnd, 2008], които процес е известен под наименованието '*Delayed Ettringite Formation (DEF)*'. Това се дължи на действието на суперпластификатора, който възпрепятства взаимодействието на  $\text{C}_3\text{A}$  с гипса [Prince, 2001]. Според някои други се наблюдават само отделни моносулфатни форми на еtringит в късна възраст [Gerrit, 2012].

#### 5.6.2.1 Степен на хидратация

Според различни източници, степента на хидратация на СВЯБ варира в широки граници - от 30% до 60% [Habel, 2006, Cheyrezy, Marat & Frouin, 1995].

Според [Mills, 1966], степента на хидратация ( $a_u$ ) може да бъде изчислена на база В/Ц отношение чрез уравнението:

$$a_u = \frac{1,031 \cdot w/c}{0,194 + w/c} \cdot 100, \%$$

По тази формула, прогнозната степен на хидратация за СВЯБ с В/Ц=(0,20-0,22) е 52-55%.

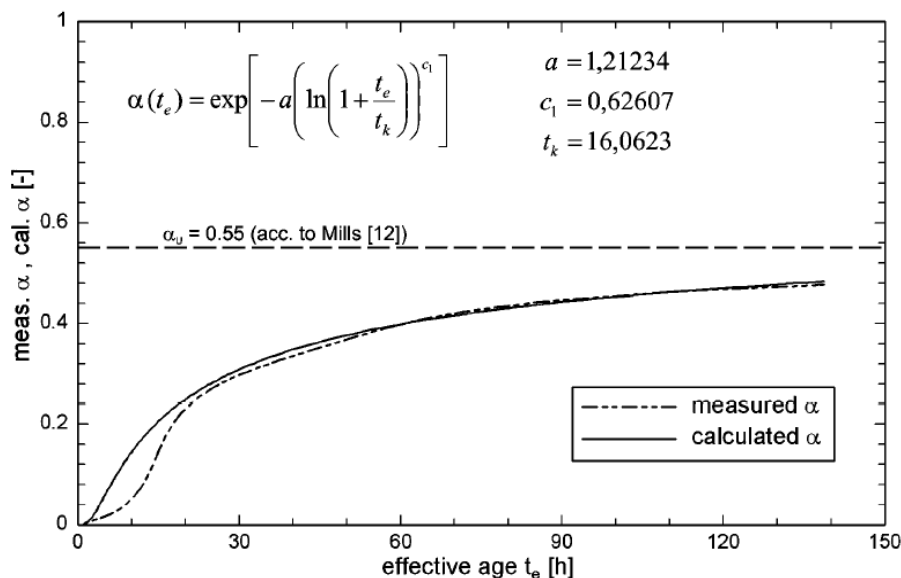
Jonasson предлага степента на хидратация при СВЯБ да бъде изчислена по следната формула [Jonasson, 1994]:

$$\alpha(t_e) = \exp\left[-a\left(\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_k}\right)\right)^{c_1}\right]$$

където:

$a$ ,  $c_1$  и  $t_k$  са константи, установени експериментално;

$t_e$  е ефективната възраст на бетона, което в графичен вид може да се представи така:



фиг. I. 16: Измерване на степента на хидратация спрямо ефективната възраст [Jonasson, 1994]

Ewert дава възможност да бъде определена степента на хидратация посредством измерване на количеството топлина  $Q_{ad(t)}$ , в адиабатичен режим, и отношението му към потенциалното максимално количество ( $Q_{pot}$ ), получено въз основа на екзотермията на свързващото вещество [Ewert, 2008]:

$$\alpha_{(t)} = \frac{Q_{ad(t)}}{Q_{pot}}$$

където:

$$(Q_{ad(t)}) = \Delta T_{ad(t)} \cdot c_c \cdot \rho_c$$

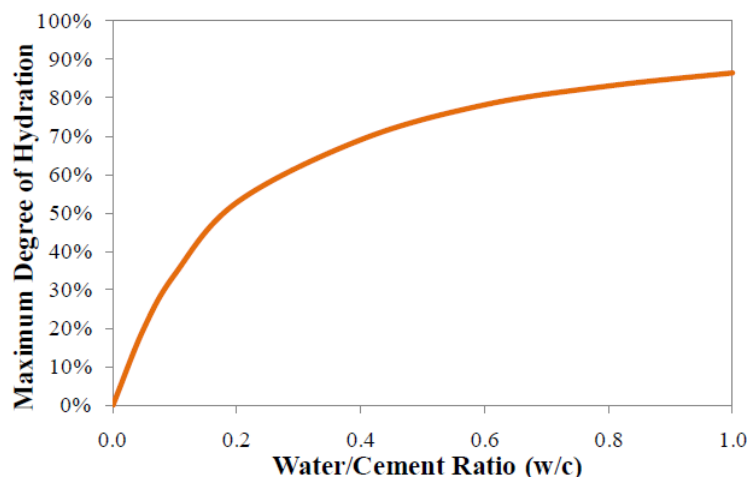
$$(Q_{pot}) = c \left[ (1 - m_{sl}) \cdot \sum_{i=1}^6 m_i \cdot Q_i + m_{sl} \cdot Q_7 \right] + FA \cdot Q_8 + SF \cdot Q_9$$

- $c$  е специфичен топлинен капацитет на уреда;
- $c_c$  е специфичен топлинен капацитет на бетона:  

$$c_c = \frac{1}{\rho_c} [c \cdot c_c + w \cdot c_w + A \cdot c_A + FA \cdot c_{FA} + SF \cdot c_{SF}]$$
- $\rho_c$  е плътността на бетонната смес;
- $m_i$  са количества материали;
- $Q_1$  до  $Q_9$  са индивидуалното количество топлина освободено от клинкерните минерали, СаО и MgO и АМД (МСП, летящите пепели от ТЕЦ и шлака).



На фиг. 1. 17 е представена зависимостта между максималната степен на хидратация на бетон при вариране на В/Ц отношение [van Breugel, 2004]. При СВЯБ, В/Ц отношение не надвишава 0,20-0,22 и очакваната максимална степен на хидратация е около 50-55%, така че голяма част от цимента не хидратира и играе роля на пълнител. Това е една от причините да се използва топло-влажностна обработка, за да се повиши степента на хидратация.



фиг. 1. 17: Максимална степен на хидратация на бетона, спрямо В/Ц отношение [van Breugel, 2004]

Допълнителната топло-влажностна обработка на СВЯБ позволява още пуцоланова добавка да влезе в още по-ефективно взаимодействие с продуктите на хидратация на цимента (главно  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) и да се образуват допълнителни калциеви хидросиликати, които запълват микропорите на бетона и по този начин водят до увеличаване на якостните характеристики на СВЯБ [Richard & Cheyrezy, 1995, Naaman, 2012].

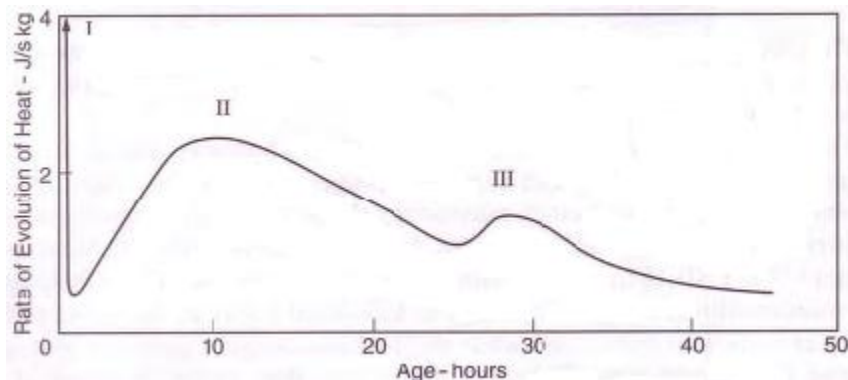
#### 5.6.2.2 Екзотермия

Хидратацията на цимента винаги се съпровожда с освобождаване на определено количество топлина. Ограничаването на екзотермичната реакция на бетона е фундаментален проблем и следва да бъде изследван при проектиране на всеки нов вид бетон, какъвто е СВЯБ. Като цяло тази реакция се дължи на химическата реакция която настъпва между цимента и водата. Енергията, необходима за осъществяване на реакцията, е по-малка от общата освободена енергия, което води до допълнителна натрупана енергия, която се отделя най-често като топлина. Този процес винаги е свързан с потенциална възможност за създаване на опънни напрежения и пукнатини при по-масивни съоръжения. Екзотермията зависи от: количеството и вида на цимента, първоначалната температура на бетонната смес, вида на добавъчните материали, външната температура, термодинамичните условия на отлежаване, както и формата и размерите на бетонните елементи [Schaller, 1992]. Проведените експерименти показват, че при обикновен бетон (с 35 МПа якост на натиск на 28-ми ден и В/Св=0,45), много голямо количество циментови частици хидратирант, но поради факта, че те не се намират толкова близо едно до друго, колкото при СВЯБ, при обикновения бетон якостта е по-ниска, въпреки, че същото количество цимент, като абсолютна стойност, е хидратирало [Aïtcin, 1998].

При обикновените бетони е характерно, че количеството на новополучилите се образувания е по-малко от сумата от обемните части на цимента и водата. При СВЯБ тази зависимост е също в сила, но обемното количество на новополучилия продукт е по-близко до изходните му стойности. От друга страна, въпреки много ниските стойности на В/Ц отношение, голяма част от цимента не влиза във взаимодействие с водата и това предполага по-ниска екзотермична реакция. Количеството на хидратирания цимент при СВЯБ е определящ за екзотермичната реакция, а не общото количество цимент добавено в системата. Според Le Chatelier намаляването на твърдата фаза на обикновените бетони е с около 10% [Le Chatelier, 1904].

Отделните клинкерни минерали имат различно взаимодействие с водата, като най-силна екзотермия се наблюдава при  $C_3A$  и  $C_3S$ , както и при свободните  $CaO$  и  $MgO$ , неувоени при производството на цимента [Симеонов, 1991]. На третия ден  $C_3A$  отчита 1,5 пъти по-голяма екзотермия от  $C_3S$ , като до 28-ми ден тази разлика се запазва.  $C_2S$  е с по-ниска екзотермия и по-тази причина влагането на белитови цименти е препоричително за направата на СВЯБ, тъй като се използват по-големи количества цимент. В България обаче производство на белитови цименти е силно ограничено. Затова може да се поставят изисквания за използване на цимент с количество на  $C_3S < 60\%$  и  $C_3A < 10\%$  и с активност над 55 МРа.

След добавянето на вода към циментовата смес настъпва първоначалната мигновена екзотермична реакция, в следствие на повърхностно омокряне на циментовите частици и взаимодействие на  $C_3A$  с водата (фиг. I. 18). Продължителността на този период на покой (наречен *dormant period*) е много малка, тя е индикатор за времето за обработване на сместа [Neville, 2002]. Различните суперпластифициращи добавки, използвани за направата на СВЯБ, пряко влияят на т.н „отворено време“ за работа с бетона, като предпочитани са тези, които дават най-дълъг период на обработваемост. Вторият основен ендопик в диаграмата, даваща връзката „освободено количество топлина-време“, се различава при СВЯБ, поради по-голямото количество суперпластификатор, което забавя хидратацията на  $C_3S$ . При циментови пасты с по-голямо В/Ц отношение ( $V/C = 0,4$ ), вторият пик се наблюдава около 10-тия час [Aitcin, 1998]. В същия момент това изместване не означава, че хидратацията не се развива във времето, а че е с по-бавни темпове. Последният ендопик съответства на вторичното взаимодействие на  $C_3A$  с водата, при изчерпване на гипса.



фиг. I. 18: Отделено количество топлина от циментова паста с времето, при В/Ц=0,4 [Neville, 2002]

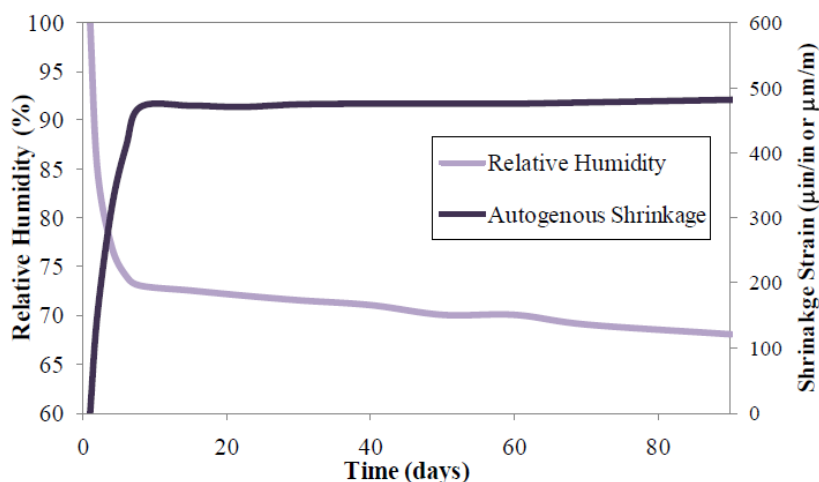
### 5.6.2.3 Съсъхване

Деформациите в бетона, свързани с постоянното намаляване на размерите на пробните тела, се наричат съсъхване [Симеонов, 1991]. Степента на загуба на вода, оттам и нивото на съсъхване, зависи от степента на пренос на вода от сърцевината към повърхността на елемента. Съсъхването е сумарна деформация, получена в следствие на пластично, влажностно, карбонизационно и контракционно съсъхване. Първите три вида се дължат на действието на външната среда, докато контракционното съсъхване е свързано с освобождаване на вода от капилярните пори при хидратация, без да има отношение към външната среда.

Влажностното съсъхване води до намаляване на обема на циментовата матрица, в следствие на изпарение на вода от пробното тяло към заобикалящата го среда. При обикновения бетон влажностно съсъхване има най-голямо значение, докато при СВЯБ е почти пренебрежимо. При изпаряване на вода от капилярните пори се получава спад в парциалното налягане и се индуцират опънни напрежения в порите, в резултат на което бетонът съсъхва [Cement and Concrete Association of Australia, 2002]. Според различни проучвания, коефициентът на влажностно съсъхване при СВЯБ може да бъде в граници от  $40 \times 10^{-6}$  на 20 ден до  $80 \times 10^{-6}$  на 90-ти ден [Habel, 2006] или да достигне до двойно по-големи стойности –  $170 \times 10^{-6}$  [Cheyrezy & Behloul, 2001].

При СВЯБ не се наблюдава карбонизационно съсъхване поради липсата на  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , който да си взаимодейства с  $\text{CO}_2$  от въздуха, в резултат на което да се образува  $\text{CaCO}_3$  и да се отдели вода. Пластичното съсъхване също е минимално, поради много ниското В/Ц отношение и по-малкото количество отделила се свободна вода по време на пластичната фаза на бетона.

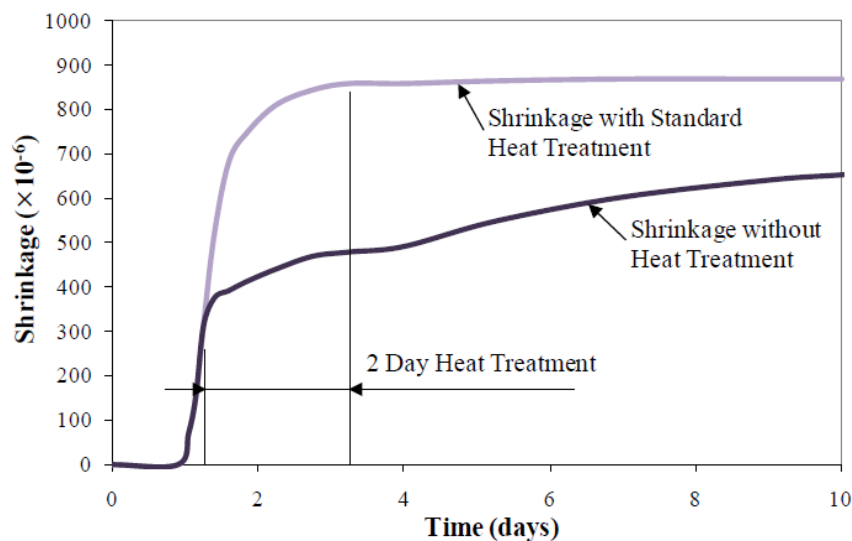
За разлика от обикновения бетон, при СВЯБ, контракционното (автогенно) съсъхване има най-голямо значение. Според опитите на [Schmidt, 2003], то заема много по-голяма част от цялостното съсъхване, както на нетретирани, така и при третирани образци, подложени на топло-влажностна обработка. За разлика от влажностното съсъхване, контракционното съсъхване предизвиква редуциране на външните размери (обемно и линейно), но на макрониво, без да има обмяна с околната среда, при изотермичен режим на отлежаване на пробните тела [Habel, 2006-2]. Причината за появата му е на химично ниво. Крайният обем на хидратационните продукти, получени в следствие на взаимодействието с цимента и МСП е с 8% по-малък от изходните им стойности [Feylessoufi, 2001]. След изготвянето на бетонната смес започва необратим процес на химическо съсъхване на матрицата, което възпрепятства свободното движение на добавъчния материал. Добавъчният материал формира твърдия скелет, който започва да ограничава химическото съсъхване, в следствие на което се образуват въздушни пори в матрицата [Habel, 2006-2]. По този начин рязко се намалява относителната влажност в порите на бетона и този процес е известен под наименованието самоизсушаване [Loukili, 1999, Aïtcin, 1998]. Самоизсушаването от своя страна, води до увеличаване на капилярния опън в порите, в следствие на свиването на матрицата. Когато относителната влажност в порите спадне до 73-75%, процесът затихва. Така постигнатата постоянна влажност при СВЯБ спира автогенното съсъхване в рамките на една седмица (фиг. I. 19).



фиг. I. 19: Развитие на относителната влажност и автогенното съсъхване във времето [Loukili, 1999]

Високи стойности на автогенното съсъхване в ранна възраст, могат да доведат до пукнатинообразуване. Основна причина се явява голямото количество цимент, много ниските стойности на В/Ц отношение и голямото количество СП. Съществуват няколко направления, които спомагат за намаляване на напреженията от съсъхване. Според някои една възможност се явява прилагането на налягане по време на свързване (виж г. I т. 3), с което се редуцира якостта на опън до 40% [Habel, 2006-2]. Втори ефективен метод срещан в литературата е използването на топло-влажностна обработка, с който съсъхването намалява до 20% [Asker, 2004, Graybeal, 2005]. Това се обяснява с факта, че бетонът е с много по-висока степен на хидратация, при което капилярните пори стават несвързани. По този начин почти цялото съсъхване се реализира през първите 48 часа. Докато според други [Loukili, 1999; Garas, 2009; Collepardi, 1997] топло-влажностната обработка не води до редукция на съсъхването (фиг. I. 20). Третият и най-прилаган метод е влагането на дисперсна армировка [Cheyrezy & Behloul, 2001]. Както стоманените, така и ПП влакна намаляват от 10% до 20% съсъхването.

В литературата са представени различни стойности на крайното съсъхване при СВЯБ, отчитайки всички негови компоненти, при което то варира от  $790$  до  $875 \times 10^{-6}$  на 40-тия ден до  $890$  до  $1400 \times 10^{-6}$  на 90-ти ден. Според някои източници [Loukili, 1999, Graybeal, 2005] основната част от автогенното съсъхване, което е най-силно изразено при СВЯБ, се развива през първите седем дена, докато при други автори [Cheyrezy & Behloul, 2001, Habel, 2006-2], то равномерно нараства във времето, но условно се разделя на два периода - от 1-ви до 7-ми ден и от 7-ми до 90-ти ден.



фиг. 1. 20: Влияние на топло-влажностната обработка върху деформациите от съсъхване на СВЯБ [Loukili, 1999]

## 6. Механични свойства на втвърдения СВЯБ

### 6.1 Якости при краткотрайни статични натоварвания

#### 6.1.1 Якост на натиск

##### 6.1.1.1 Влияние на състава на матрицата и технологични параметри

Според определението за СВЯБ, неговата якост на натиск започва от 150 МПа, като най-високата засега постигната в лабораторни условия е 800 МПа [Dugat, 1996; Richard & Cheyrezy, 1995]. Съществената разлика от 150 МПа до 800 МПа се дължи на различия в състава, начина на изготвяне и последващо третиране. Счита се, че оптимизирането на състава, с което се постига силно уплътнена структура, влагането на по-големи количества свързващо вещество, АМД и СП, намаляването на максималния размер на добавъчния материал под 1 mm и редуцирането количество на водата, създават бетон до 150-200 МПа. За по-нататъчното увеличаване са налага използване на дисперсна армировка от стоманени фибри и прилагане на топло-влажностна обработка. Така якостта на натиск, според различни литературни източници [Yazini, 2008; Tafraoui, 2009], може да достигне до 300 МПа. По-нататъчното повишаване на якостите се постига с допълнителни рецептурно-технологични средства: с използване на вакуум-миксери за забъркването, прилагане на налягане до времето на свързване и замяна на минералния добавъчен материал със стоманени компоненти (виж гл. I. т. 2).

##### 6.1.1.2 Влияние на методите за изпитване

Съществуват ограничен брой изследвания, които да определят връзката между геометричните размери на пробните тела и якостта на натиск [Graybeal, 2008]. Най-често използваните пробни тела за определянето ѝ са гредички 4/4/16 cm, натоварени последователно първо на опън при огъване и в последствие, получените от тях половинки гредички, на натиск [Voort, 2008; Tafraoui, 2009; Yazici, 2008]. Според други изследвания е по-рационално изпитването на пробни тела кубчета със страна 51 mm [Park, 2008] и цилиндри с диаметър 76 mm [Graybeal, 2008]. Цилиндричните образци показват якост 96% от кубичната.

Използването на малки пробни тела се прилага с оглед на намаляване действието на дефектите при натоварване и по-доброто уплътняване на малките образци. Неизследвана остава зависимостта между якостните показатели и размера на пробните тела, както и връзката между скорост на натоварване и получената якост на натиск.

#### 6.1.1.3 Влияние на влакнестата армировка

Благодарение на над четири пъти по-големият модул на еластичност на стоманените влакна, в сравнение с този на матрицата на СВЯБ, дисперсната армировка поема голяма част от напреженията при натоварване и това води до разтоварване на самата матрица. В резултат на това се достигат якости на натиск от 180-200 МПа, в зависимост от геометричните размери на влакната. Според някои източници [Lee, 2006; Soutsos, 2005] влагането на 2% по обем стоманени фибри допринасят за увеличаване на якостта на натиск с 30%. Според други обаче, тези стойности са непостижими [Schmidt, 2003]. Ефектът от използването на различни по вид и количества влакна трябва да бъде експериментално изследван.

В литературата се срещат и отделни изследвания, при които стоманените фибри са заменени със стъклени влакна [Vorg, 2004] или карбонови влакна [Aronoff, 2004, Si-Larbi, 2004]. Използването на стъклени влакна може да подобри дълготрайността на бетона, поради полученото по-ниското рН на СВЯБ, в резултат на използването на голямо количество МСП. Друго важно предимство при използването на стъклените влакна при СВЯБ е по-лесното изпомпване на прясната бетонна смес, като получените якостните характеристики и при двата вида влакна са близки. Предимството при влагане на карбонови влакна пред стоманените фибри, е тяхната над 3 пъти по-голяма якост (над 1600 МПа) и липсата на повърхностна корозия. Но техният модул на еластичност е по-нисък и сцеплението им с матрицата е затруднено, с което се възпрепятства големият им потенциал от гледна точка на крайната якост на композита.

#### 6.1.1.4 Влияние на топло-влажностната обработка

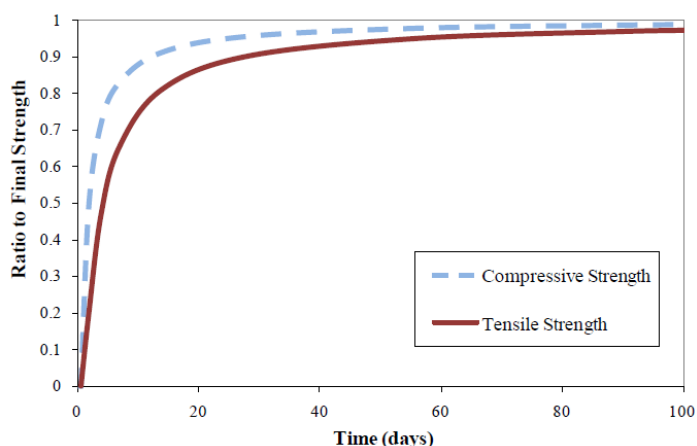
Топло-влажностната обработка на бетона (основно прилагана под формата на пропарване и автоклавиране) е базисен метод за увеличаване на механичните характеристики при СВЯБ. Чрез нея не просто се постига 80% от крайната якост само за няколко часа/дни, а и като цяло якостите се повишават от 10% до 30% в зависимост от вида и продължителността ѝ. Едни от най-добрите резултати, относно якостта на натиск (с 30% увеличение), са реализирани при състави подложени на автоклавна обработка в продължение на 8 часа и температура от 210°C, при използване на 35% МСП, в съчетания с налягане до времето на свързване [Yazici, 2008]. Ефектът от прилагането на различни топло-влажностни обработки е изследван посредством редуциране количеството на МСП и замяната му с други АМД от типа на летящи пепели от ТЕЦ, доменна шлака, метакаолин и др.

#### 6.1.2 Якост на опън

Поради много ниските стойности на якостта на опън при обикновения бетон (2-5 МПа), приносът ѝ обикновено се пренебрегва. С увеличаване на якостта на натиск при високоякоостните бетони, якостта на опън също отчита известно покачване (5,5-6,5 МПа) [Yin,

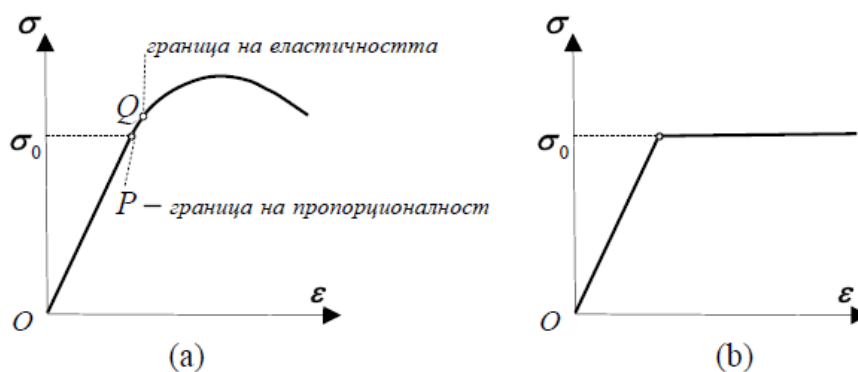
2002]. Поведението на матрицата на СВЯБ при натоварване на чист опън не се отличава съществено от това на високоякоостните бетони, поради което отношението на якостта на натиск към якостта на опън ( $f_t/f_c$ ) запазва стойности около 0,04. Според *Graybeal*, топлин-влажностната обработка върху матрицата на СВЯБ също води до известно увеличаване на якостта на чист опън, в сравнение с нетретираните образци, и тя достига до 7 МПа [*Graybeal*, 2005]. Прибавянето на стоманени влакна предизвиква известно уякчаване след поява на първа пукнатина до достигане на максималната сила [*Bayard*, 2003; *Habel*, 2006], с което отношението  $f_t/f_c$  се покачва до 0,1 и якостта е 8-10 МПа. По този начин поведението на композита при натоварване на опън е подобно на това при натоварване на опън при огъване [*Habel*, 2006; *Cadoni*, 2004] (виж гл. I. т. 5.1.3).

На фиг. I. 21 са съпоставени резултатите от якостните показатели за натиск и опън представени чрез кинетиката на набиране на якост във времето на нетретиране пробни тела. Якостта на натиск на 7-ми ден набира между 85% и 90% от крайната си якост, докато за същото време якостта на чист опън е достигнала само 65 % от крайната си якост. Между 7-ми и 28-ми ден, якостта на опън се увеличава с 20%, а до 56-тия ден нараства с още 25%. Това отличава СВЯБ от обикновените бетони, при които якостта на опън нараства по-бързо във времето в сравнение с якостта на натиск [*Habel*, 2006]. Това най-вероятно се дължи на известното забавяне на процеса на хидратация при СВЯБ, поради използването на голямо количество СП, което е отразява в по-голяма степен върху якостта на опън.



фиг. I. 21: Сравнение между якостта на натиск и чист опън, по отношение на развитието им във времето, отнесено към крайната им стойности, при нетретиранни пробни тела [*Habel*, 2006]

Изследването на поведението на СВЯБ при натоварване на опън има за цел да определи дуктилността му. Дуктилност се нарича свойството на материалите или конструкциите да развиват пластични деформации. Това е от съществено значение при конструктивни елементи, които са подложени на динамично въздействие. В случай на идеален еласто-пластичен материал, след преминаване на границата на еластичност, се наблюдава увеличение на пластичните деформации до безкрайност, без това да доведе до промяна на напрежението (фиг. I. 22-б). Докато в общия случай (фиг. I. 22-а), след преминаване на границата на пропорционалност, деформациите в бетона се възвръщат в първоначалното си състояние до достигане на границата на еластичност, след която материалът пластифицира и в последствие изцяло губи носеща способност.



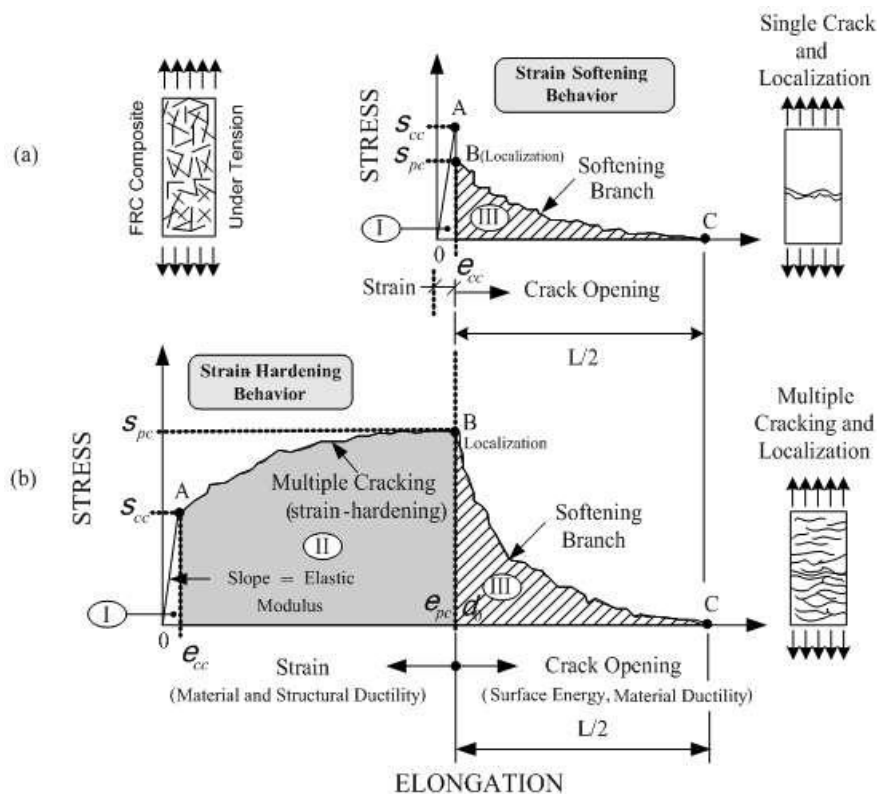
фиг. 1. 22: Работна диаграма напрежение-деформации при статично натоварване: а) общ случай; б) идеален еласто-пластичен материал [Динев, 2006]

Бетонът, като материал, който се влага в конструкции, не е дуктилен. Но с влагането на голям процент, равномерно разпределени стоманени фибри (2-2,5 обемни процента) се създава дуктилно поведение при СВЯБ, с развитие на значителни пластични деформации, което се дължи на микрипукнатинообразуването на матрицата на СВЯБ, възпрепятстване на макропукнатинообразуването и поемане на напреженията в зоните на пукнатините от стоманената армировка. В резултат на това СВЯБ не се разрушава крехко.

Дуктилността може да бъде характеризирана с енергия на разрушението (*fracture energy; fracture toughness*); характеристична дължина и дуктилна дължина (*characteristic length* и *ductility length*) и необходима енергия за пукнатинообразуване (*crack-formation energy*) [Lohaus, 2004]. Анализът на поведението на материала се извършва въз основа на диаграмата „напрежения-деформации“ ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) при натоварване на чист опън или опън при огъване.

Дисперсно армираните циментови композити могат да проявят т.н. „деформационно облекчено“ и „деформационно уякчено“ поведение (*strain softening* и *strain hardening behaviour*), дефинирано от Naaman, въз основа на диаграмата ' $\sigma$ - $\epsilon$ ' при натоварване на чист опън [Naaman, 2003; Naaman, 2007]. При „деформационно облекченото“ поведение напреженията възникнали след появата на първата пукнатина ( $s_{pc}$ ) са по-малки отколкото тези при възникването на първата пукнатината ( $s_{cc}$ ), което води до невъзможност за еластично удължение (между точки А и В), а само за постепенно разширяване на пукнатината до пълното разрушение на елемента (от точка В до С) (фиг. 1. 23-а). Докато при „деформационно уякченото“ поведение, след първоначалното еластично поведение на материал ( $s_{cc}$ ) с появата на първа пукнатина, се наблюдава увеличаване на напреженията между точки А и В при продължаване на натоварването ( $s_{pc}$ ) (фиг. 1. 23-б). В тази зона е характерно лавинообразно нарастване на деформацията ( $\epsilon_{pc}$ ), което се изразява чрез формирането на множество микропукнатини, до достигане на максималната стойност на напреженията („*post-cracking stress*“). След точка В се наблюдава същият ефект както при „деформационно облекченото“ поведение - напреженията намаляват с уголемяване на пукнатините, между точки В и С.





фиг. 1. 23: Диаграма „напрежение-деформация“, при натоварване на чист опън, при: а) „деформационно облекчено“ поведение и б) „деформационно уякено“ поведение [Naaman, 2003; Naaman, 2007]

Naaman [Naaman, 2007] дефинира СВЯБ още през 80-те години, като „*Strain-Hardening Fiber Reinforced Composite*“, което по-точно разкрива истинското му поведение с оглед на вложените стоманени фибри в състава му, но в последствие се налага в световната литература под наименованието „*Ultra High Performance Concrete*“. Той още подчертава, че точката в която имаме промяна на напреженията ( $s_{cc}$ ), при появата на първа пукнатина, е силно зависима от якостта на матрицата сама по себе си, докато последващите напрежения след нея - до ( $s_{pc}$ ), са изцяло под контрола на характеристиките на самите стоманени влакна и връзката им с дисперсната матрица. Подобряването на якостта след първата пукнатина, между точки А и В, е основното предимството на дисперсната армировка от стоманени влака, в сравнение с неармираните бетони, което превръща СВЯБ в дуктилен материал.

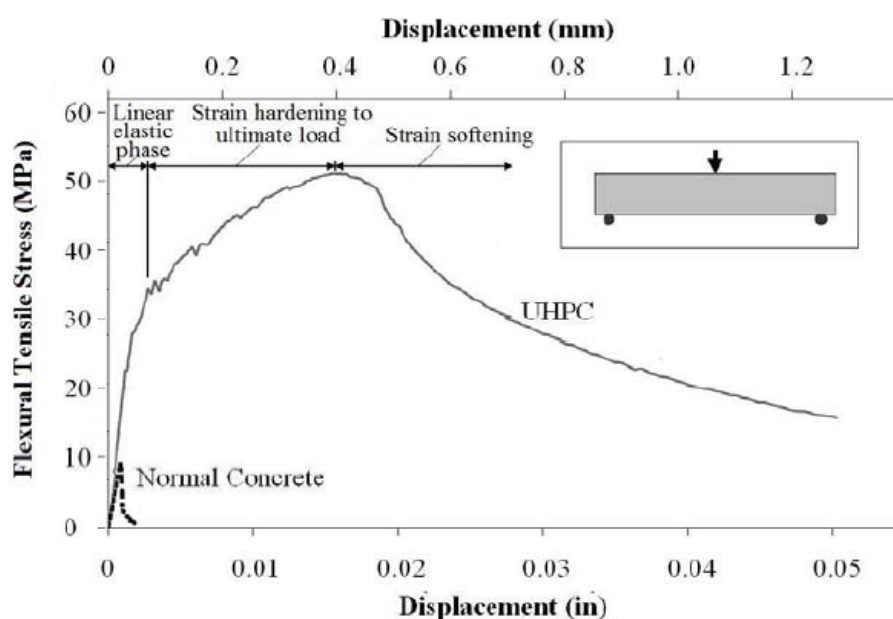
### 6.1.3 Якост на опън при огъване

Якостта на опън при огъване на матрицата на СВЯБ отчита стойности в по-голям интервал - от 8-12 MPa [Brameshuber, 2004; Orgass, 2004]. Това се дължи на силното влияние на микродефектите в структурата на бетона при натоварване на огъване, изразено в по-голяма степен при СВЯБ, поради разлики между моделираната и реално постигнатата плътна структурата. С оглед на подобряване поведението на СВЯБ при натоварване на огъване се прилагат стоманени фибри. По този начин якостта на композита се покачва с няколко порядъка и варира от 30 MPa до 50 MPa [Reineck, 2004, Colleparidi, 1997]. Този широк диапазон зависи от вида, количеството, отношението L/D (дължина към широчина), формата, ориентацията и разпределението на стоманените фибри в обема, в който се влагат. С увеличаване на

отношението  $L/D$  се забелязва повече от двойно нарастване на якостта на опън при огъване [FHWA, 2006]. Противоречива са литературните данни по отношение на прилагането на топло-влажностна обработка. Според едни автори се наблюдава намаляване на якостта на опън при огъване (от 1 до 7%) след топло-влажностна обработка, което се дължи на намалено сцепление между матрицата и фибрите [Tafroui, 2009], докато според други източници якостта не само, че не намалява, но и се увеличава, поради уякчаване в преходната зона [Yang, 2008]. Според Yazini комбинирането на различни АМД с различни видове топло-влажностни обработки също би могло да доведе до намаляване на якостта на опън при огъване [Yazini, 2008].

Сравняването на якостта на опън при огъване е затруднено и поради използването на различни статически схеми на натоварване. Срещат се схеми с една концентрирана сила по средата, както и с две, разположени в средната третина [Orgass, 2004]. Видът на схемата би следвало да се определи според геометричните размери на изпитвания образец. С намаляването на размера се забелязва силно увеличаване на всички якостните характеристики, по-видимо изразено при изпитване на опън при огъване. Това най-вероятно се дължи на локалната подредба на влакната, които се разпределят в по-малък обем [Voort, 2008].

От диаграмата „напрежение-провисване“ при огъване се вижда, че поведението на СВЯБ, с вложени стоманени влакна, значително се различава от това на обикновения бетон, не само от гл.т. на много по-високите стойности на максималната постигната сила, но и по начина си на разрушение – фиг. 1. 24. Диграмата показва поведение на материал, с дуктилни свойства, поради наличие на зона на деформационно уякчаване, след първоначалната еластична фаза, до максималната получена сила (*strain hardening region*) [Acker & Behloul, 2004]. В тази зона се формират множество микропукнатини, дисперсната армировка е подложена на продължително изтръгване, до достигане на гранични стойности на пукнатинообразуване. Следва падащ клон на диаграмата (*strain-softening region*), без наличие на крехко разрушение, както е характерно за обикновения бетон (виж гл. I. т. 5.4). Отделните зони в диаграмата съвпадат с тези дефинирани от Naaman, при натоварване на чист опън на СВЯБ (виж гл. I. т. 5.1.2).

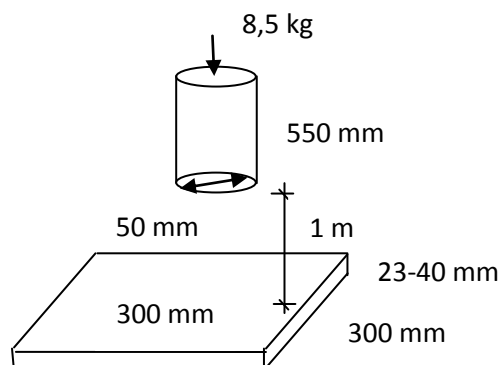


фиг. I. 24: Диаграма напрежения-деформации на призматично пробно тяло 4/4/16, подложено на триточково натоварване, при изпитване на якост на опън при огъване [Acker & Behloul, 2004]

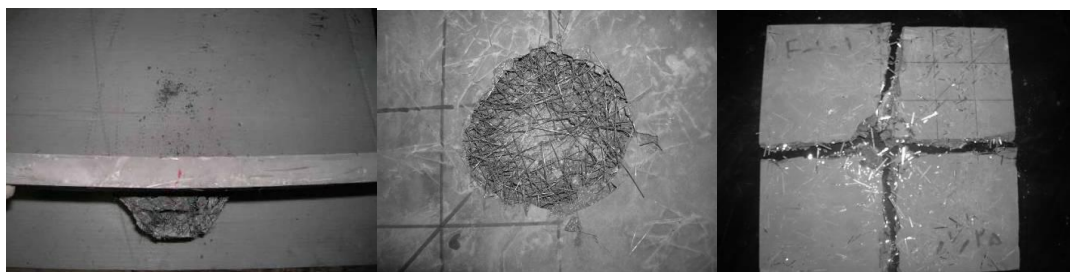
## 6.2 Якости при краткотрайно динамично натоварване

Под краткотрайно динамично натоварване се разбира ударно въздействие, при което времето за реализирането му е под 0,01 s. Получената динамична якост на бетона се характеризира с количеството работа, изразходвана за разрушаване на стандартна проба, отнесена към единица обем, поради което по-често е наричана издръжливост на удар. При обикновения бетона издръжливостта на удар обхваща определен интервал от време, в който се формират микропукнатини в структурата му до достигане на определена гранична деформация [Симеонов, 1991]. Според това поведението на бетона може да бъде определено като крехко или пластично. Процесът на разрушение протича чрез разрушаване на слабите и пренапрегнати микрообеми, причинено от неравномерното обемно натоварване, и от възникване на вторично поле на напреженията, в което съседните микрообеми запазват своята цялост и в момента на разрушението акумулират значителна натрупана енергия, която се освобождава при разрушението на бетона. При СВЯБ не се създава коцентрация на напреженията, поради влиянието на стоманените влакна. В мястото на прилагане на натоварването се акумулира значителна енергия от дисперсната армировка, с което се запазва цялостта на пробата. Издръжливостта на удар служи за определяне на *energy absorption* (виж. гл. I. т. 6.4.3).

Има сравнително ограничен брой изследвания върху устойчивостта на удар на СВЯБ [Farnam, 2008]. Те представят данни за влиянието на стоманените и полипропиленовите влакна, както и за хибридно им влагане. На фиг. I. 25 е представена принципна схема на опитната постановка. Установено е, че най-съществено влияние върху ударната якост оказва дебелината на пробното тяло, поради необходимостта от четири пъти по-голяма сила, която да доведе до разрушението му (фиг. I. 26). Вида, размерите и количеството на вложената дисперсна армировка също оказват силно влияние върху удароустойчивостта. Стоманените влакна допринасят за над 2 пъти увеличаване на устойчивостта до първа пукнатина и в последствие до пълното разрушение на образеца. Това се дължи на способността им да десипират енергия в себе си, като разтоварват матрицата на СВЯБ. Два пъти по-голямото количество стоманени влакна води до същия ефект, както и двойното нарастване на отношението L/D. Това показва ефективността на късите влакна за възпрепятстване разтварянето на микропукнатините при увеличаване на количеството им както при възможността за предотвратяване образуването на макропукнатини с премостването им с влакна с по-голямо L/D отношение. Прилагането на ПП влакна не подобрява удароустойчивостта на СВЯБ, като разрушението настъпва мигновено, за разлика от обикновените дисперсно-армирани композити, където ПП влакна водят до подобряването ѝ. Хибридно използване на стоманени и ПП влакна редуцира удароустойчивостта в сравнение с съставите само със стоманени влакна.



фиг. 1. 25: Схема на натоварването на пробни тела, подложени на ударна якост



фиг. 1. 26: Начин на деформиране на пробни тела, подложени на ударна якост [Farnam, 2008]

Проблемът при изследване на издръжливостта на удар се усложнява и от факта, че методиката, която се използва не е стандартизирана. В българските източници се среща друг метод, по който тя се определя при обикновените бетони [Дойков, 2007]. Различното тук се явява, че изпитваните пробни тела са кубчета с размери 40/40/40mm, като при всеки следващ удар се увеличава с 1 cm височината, от която се прилага натоварването. По този начин се ускорява процесът във времето, както на формиране на първа пукнатина, така и до пълното му разрушаване. Удароустойчивостта се изразява във функция на теглото на чука (20 N), който свободно пада върху пробното тяло, умножен по фактуриел от височината, при която е настъпило разрушението, разделено на обема на кубчето.

### 6.3 Деформационни характеристики

#### 6.3.1 Модул на линейни еластични деформации

Литературните данни показват, че модулът на еластичност при СВЯБ е от порядъка на 50-70 GPa [Graybeal, 2005; Voort, 2008]. Тези стойности зависят главно от степента на уплътняване на матрицата, дисперсната армировка и приложената топло-влажностна обработка, за разлика от обикновените бетони, при които Е-модулът зависи в най-голяма степен от вида и количеството на едрия добавъчен материал [Illston, 2010].

Едно от основните различия при СВЯБ, сравнен с нормалния бетон, е неговата много голяма граница на пропорционалност, при натоварване на натиск. Според различни учени тя е между 60% [Dugat, 1999] и 80% [Richard & Cherezy, 1995], при пробни тела подложени на топло-

влажностна обработка. Според *Graybeal* зоната на еластично поведение достига до стойности на напреженията от 90% [Graybeal, 2007]. Според предписанията на действащите в България евронорми [БДС EN 1992-1-1:2005/NA:2011] зоната на еластичност на обикновения бетон се приема само до 40% от максималната сила, при изпитване на призматични и цилиндрични пробни тела, докато по стандарт ISO 1920 [ISO 1920-10-2010] тя се намалява до напрежения съответстващи на 1/3 от максималната якост на натиск на бетона, при пробни тела цилиндри.

На база на различни експериментални проучвания са съставени различни зависимости между якостта на натиск и Е-модула (табл. I. 1), при обикновените бетони и СВЯБ, имащи следния вид:

**табл. I. 1: Теоретични зависимости между модула на еластичност и якостта на натиск на обикновен бетон и СВЯБ, на възраст 28-ми ден**

Обикновен бетон			СВЯБ		
$E = 4730\sqrt{f_c}$	ACI 318-05	[ACI 318-05, 2005]	$E = 4150\sqrt{f_c}$	Sritharan, 2003	[Sritharan, 2003]
$E = 5288\sqrt{f_c}$	AASHTO 2004	[AASHTO 2004]	$E = 3840\sqrt{f_c}$	Graybeal, 2007	[Graybeal, 2007]
$E = 9500\sqrt[3]{f_c + 8}$	CEB-FIP 1990	[CEB-FIP, 1990]	$E = 16,364\ln f_c - 34,828$	Ma, 2002	[Ma, 2002]
$E = 22\left(\frac{f_c}{10}\right)^{0,31}$	EC2: БДС EN 1992-1-1:2005	[БДС EN 1992]	$E = 19\sqrt[3]{\frac{f_c}{10}}$	Ma, 2004	[Ma, 2004]

където:

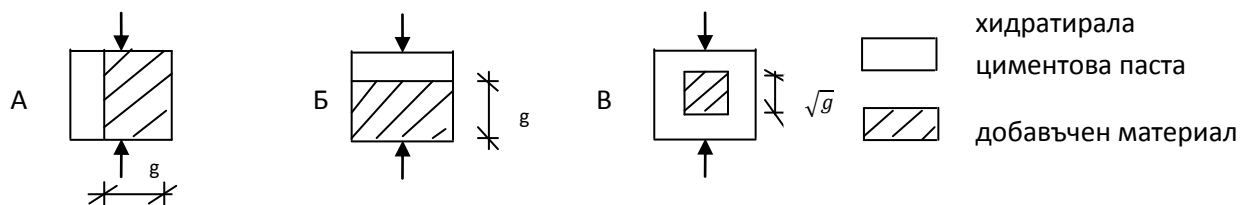
$E$  е модулът на еластичност, в МПа,

$f_c$  е якостта на натиск на бетона на 28-ми ден, в МПа.

Изведената на *American Concrete Institute* [ACI 318-05, 2005], относно зависимостта на модула на еластичност от якостта на натиск ( $f_c$ ), се ограничават до бетон с  $f_c$  до 70 МПа. На базата на тях, *Sritharan* провежда собствено изследване. Установява, че с увеличаване на якостта на натиск на бетона е необходимо във формулата да бъде редуциран коефициента пред  $\sqrt{f_c}$ . Това най-вероятно се дължи на факта, че по този начин получените стойности биха били извън зоната на еластичност в диграмата 'напрежения-деформации'. В следствие, на базата на изследванията на *American Association of State Highway Transportation Officials* (AASHTO), които отчитат по-голям Е-модул в сравнение с *ACI*, *Graybeal* преработва зависимостта и допълнително редуцира коефициента пред  $\sqrt{f_c}$ , във вида:  $E = 3840\sqrt{f_c}$ . Европейската практика извежда други зависимости относно модула на еластичност, като във формулата поставя  $f_c$  под корен трети. Това се вижда още в първите разработки на *Euro-International Committee for Concrete* [CEB-FIP, 1990], в следствие залегнали и в *EuroCode 2*, с изменение. На базата на тях, *Ma* [Ma, 2004] модифицира зависимостта за СВЯБ.

Бетонът е композитен материал и като такъв еластичното му поведение зависи от еластичните свийства на отделните му фази – нехидратирал цимент, гелна фаза, вода, пясък и ЕДМ, както и тяхната пропорция и геометрично разпределение в обема. Анализирането на отделните компоненти би било твърде сложно, поради което е създаден опростен двуфазов

модел [Illston, 2010], в който се включва хидратирала циментова паста (представена чрез модула си на еластичност) и добавъчен материал (представен, чрез модула си на еластичност и обемното си съдържание) и разположението на двете фази (фиг. I. 27). Моделът има за цел да обясни на какво се дължи промяната в модула на еластичност при обикновения бетон .



фиг. I. 27: Опростен дву-фазов модел на бетона [Illston, 2010]

Всички изследвани модели са представени в графичен вид чрез геометрични зависимости (модел А, Б и В). Въз основа на получените деформации на отделните елементи и напреженията в тях са изведени предпоставки описващи равновесието на системата (табл. I. 2). При модел А, двете фази са успоредни на приложения товар, с което е изведена предпоставката, че получените в тях деформации са еднакви. Докато при модел Б, товарът е напречно на двете фази, с което се предполага, че те понасят едно и също натоварване. Третият модел С, добавъчният материал е включен в циментовата паста, с което удовлетворява обемните изисквания.

табл. I. 2: Модул на еластичност според опростения дву-фазов модел на [Illston, 2010]

Вид модел:	Предпоставка:	Модул на еластичност:
А	$\varepsilon_c = \varepsilon_a = \varepsilon_p$	$E_c = E_a \cdot g = E_p \cdot (1 - g)$
	$\sigma_c \cdot E_c = \sigma_a \cdot g = \sigma_p \cdot (1 - g)$	
Б	$\sigma_c = \sigma_a = \sigma_p$	$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_a} \cdot g = \frac{1}{E_p} \cdot (1 - g)$
	$\varepsilon_c = \varepsilon_a \cdot g = \varepsilon_p \cdot (1 - g)$	
В	Обединява модел А и Б	$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - \sqrt{g}}{E_p} + \frac{\sqrt{g}}{E_a \cdot g + E_p(1 - \sqrt{g})}$

\*забележка: индекс 'а' се отнася за добавъчни материали; индекс 'с' за бетон; индекс 'р' за хидратирала циментова паста

Моделите описани по-горе биха могли да послужат за ориентир относно поведението на СВЯБ при натоварване на натиск, с предпоставката, че добавъчния материал изцяло липсва, а неговата функция се заема от дисперсната армировка. На базата на тях може да бъде изчислен модулът на еластичност на дисперсно-армиран СВЯБ.

### 6.3.2 Коефициент на Поасон

Коефициентът на Поасон представлява отношението на напречните към надлъжните деформации и е представителен за крехкостта на разрушение на материалите – колкото по-малък е той, толкова материалите са по-крехки.

Коефициентът на Поасон се изразява по формулата:

$$\vartheta = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

където:

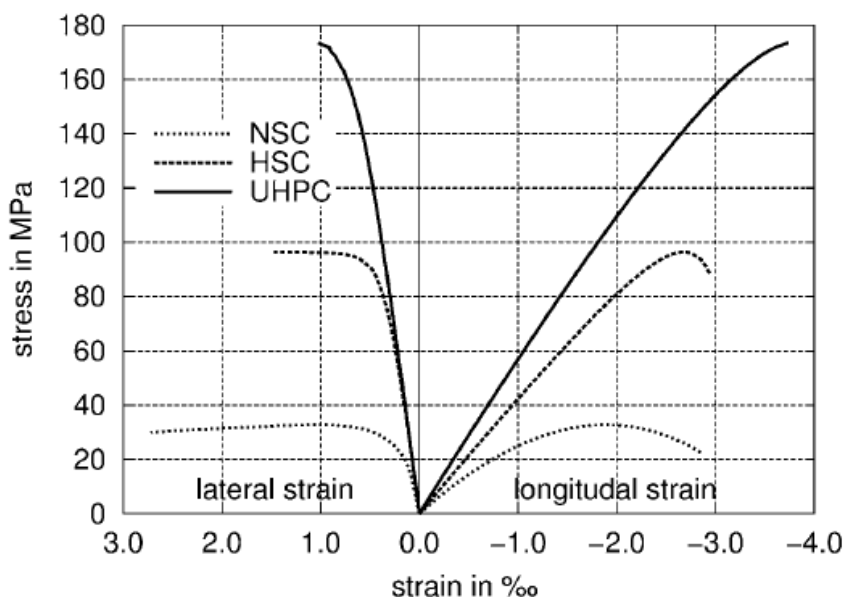
$\vartheta$  е коефициента на Поасон;

$\varepsilon_t$  е относителната деформация в напречна посока;

$\varepsilon_l$  е относителната деформация в надлъжна посока;

След направената литературна справка е установено, че рядко се срещат данни за коефициента на Поасон при СВЯБ, особено след прилагане на различна топло-влажностна обработка [Ahlborn, 2008], както и на такива с различна по вид и количество влакнеста армировка. Границите в които варира са в много широк интервал - от 0,13 [Voo, 2001] до 0,22 [Dugat, 1996]. Като средна стойност най-често срещана е 0,18, която е близка до стойностите, измерени при обикновения бетон. Според *EuroCode 2* коефициента на Поасон се приема равен на 0,20 за ненапукан бетон. Според френските предписания за СВЯБ от 2013г. [AFGC/SETRA, 2013], при липса на експериментални данни, за СВЯБ може да се приеме коефициент на Поасон равен на 0,20.

Диаграмата напрежения-деформация при СВЯБ (фиг. I. 28), без влакна и без топло-влажностна обработка, представя линейна зависимост до приблизително 70% от якостта на натиск с отчетен коефициент на Поасон от 0,21, който при по-нататъчно натоварване нараства до 0,32 [Tue, 2004]. По-ниският коефициент на Поасон отчита по-голяма надлъжна деформация, за разлика от напречната компонента, която остава постоянна. По-крехките материали имат по-малък коефициент на Поасон, като с увеличаване на пластичността, той също се увеличава. Измерванията му в еластичен стадии при СВЯБ, в които е вложена дисперсна армировка и е бил подложен на топло-влажностна обработка, отчита стойности от 0,18 [Graybeal, 2005].



фиг. I. 28: Диаграма 'напрежения-деформации' при обикновен бетон, високоякоостен и СВЯБ

## 6.4 Енергия на разрушението

Енергията на разрушение се дефинира, като енергията, необходима за развитие както на микропукнатините, така и енергията, необходима за отварянето на макропукнатините. Определянето на енергията на разрушението е от важно значение за сравняване поведението на СВЯБ, сред останалите композитни материали, с оглед изследването ѝ в строителната теория и материалознание.

В световната литература са използват няколко параметри, които имат за цел да характеризират дуктилното поведение на влакнесто-армираните композити [Louaous, 2004; Güvensoy, 2004; Brameshuber, 2004]. Това са енергията на разрушение, представена чрез – ударната жилавост '*fracture toughness*', енергията на разрушение '*fracture energy*' и абсорбционната способност '*energy absorption*', както характеристикната дължина '*characteristic length*', дуктилната дължина '*ductility length*' и необходима енергия за пукнатинообразуване '*crack-formation energy*'. Всяко едно от тези понятия е навлязло в българската литература под наименованието „енергия на разрушението“, но те имат различен физически смисъл и мерни единици.

За сега в световната литература изследванията върху параметрите на дуктилност при СВЯБ са ограничени [Graybeal, 2005], въпреки значимостта им върху поведението на конструкциите. Последователно са разгледани отделните параметри, които описват дуктилността на бетона като цяло.

### 6.4.1 Ударна жилавост (*Fracture toughness* ( $G_f$ ))

Енергия на разрушението, използвана под наименованието '*fracture toughness*' ( $G_f$ , [N.m]) е интегрална характеристика, която служи за мярка на дуктилността на дисперсно-армираните композити при краткотрайни статични натоварвания (обикновено на огъване).

#### 6.4.1.1 Методика за изчисляване

Енергията на разрушение ( $G_f$ ) най-често се определя като площта заключена между абсцисата и получената крива при натоварване на опън при огъване [Louaous, 2004]. В литературата се срещат данни за различни схеми на натоварване и различни размери на пробни тела [Orgass, 2004]. При малки пробни тела – 4/4/16 cm се използва три-точково натоварване (с една концентрирана сила по средата), докато при по-големите образци се използва четири-точково (с две концентрирани сили в средната третина). Много често се прилага и подрязване, с различна дълбочина, на пробните тела в опънна зона, което цели предефиниране на мястото на първа пукнатина и възможността да се проследи отварянето на пукнатина и развитието ѝ по височина [Yunsheng, 2008, Güvensoy, 2004].



Зависимостта 'натоварване-провисване' (load ( $F$ ) - deflection ( $\delta$ )) се проследява от началото на натоварване до пълното (или частичното) разрушение на пробното тяло, като това дава възможност да се изследва поведението на композита от началния еластичен стадий (отговаря на линейния участък на диаграмата), през появата на първа пукнатина и последващото уякчаване на материала до достигане на максималната разрушителна сила и т.н падащ клон на диаграмата ' $F-\delta$ ', който отразява на остатъчната носимоспособност на материала.

Счита се, че колкото са по-големи стойностите на получената  $G_f$ , толкова материалът е по-дуктилен, тъй като нарастването на  $G_f$  се дължи обикновено на по-голямата деформируемост на материала. Възможно е при високоякоостните материали,  $G_f$  да има висока стойност, дължаща се на повишената носимоспособност. За да бъде диференциран проноса и на двата компонента се изчисляват и други параметри, които да позволят по-добра оценка на дуктилното поведение - индекси на пластично разрушение и фактор на остатъчна якост (виж г. I. т. 5.4.1.2).

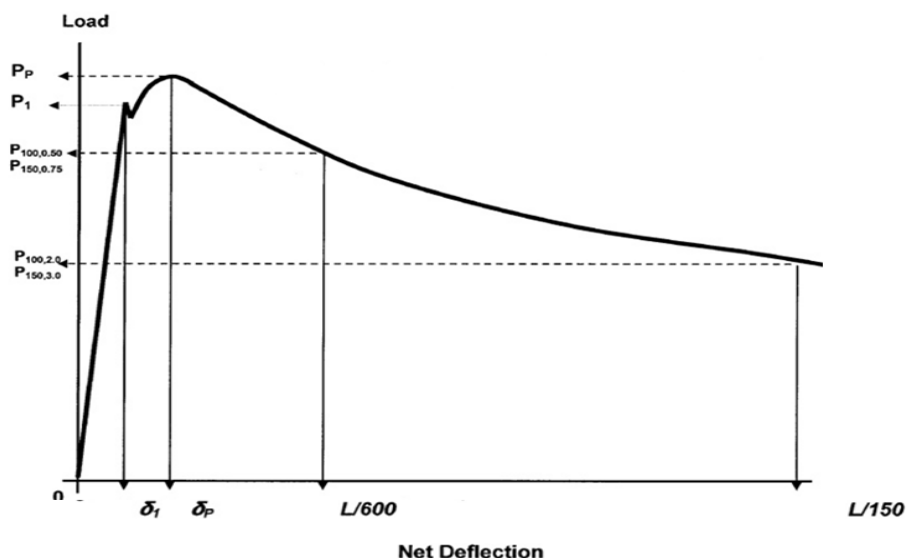
От друга страна,  $G_f$  може да се определи и чрез прилагане на краткотрайни динамични въздействия (приложено еднократно върху пробното тяло или чрез поредица от удари до пълното му разрушение) и тогава тя съответства по-скоро на устойчивостта на удар [ACI544.2R-96, reapproved 2002]. У нас се използва понятието ударна жилавост и има мерни единици  $\text{kJ/m}^3$ .

Получените резултати служат за оценяване на ефекта от вложената армировка, при сравняване на различни видове и количества влакна едни спрямо други, както и с неармирани пробни тела. Получените работни диаграми, даващи връзка между натоварващата сила и полученото провисване и/или надлъжната деформация в опънна зона, помагат за изследване поведението на СВЯБ след пукнатинообразуване.

#### 6.4.1.1.1 Първа пукнатина

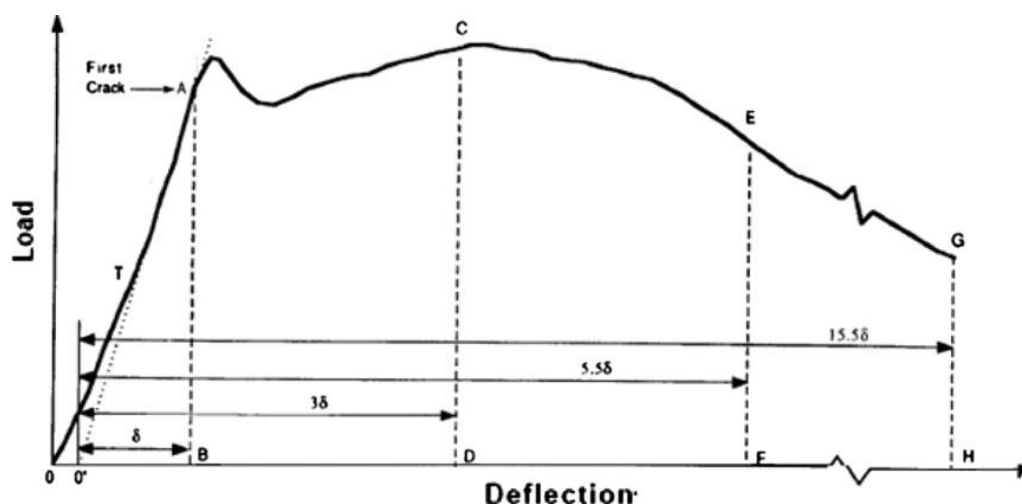
Един от най-важните параметри свързани с определяне на енергията на разрушение при влакнесто армираните композити е появата на първа пукнатина. Този момент може да се приеме като отговарящ на края на еластичния стадий, тъй като пластичните деформации в бетона са свързани с появата на микропукнатини. Големината на еластичния стадий, както и поведението на бетона след него, е в пряка зависимост от вида и количеството на влакнестата армировка. Провисването при поява на първа пукнатина при влакнесто армираните композити се изчислява в стандарт ASTM C 1609 [ASTM C 1609/C 1609M-10] съгласно формула включваща геометричните размери, модула на еластичност, коефициента на Поасон и приложената сила. В стандарта, независимо от размера на пробното тяло, натоварването винаги е четири-точково, а приложената сила се реализира чрез постоянно нарастване на деформациите при натоварване на огъване. Директното прилагане на методиката в стандарта [ASTM C 1609], определящ енергията на разрушение  $G_f$  на обикновени дисперсно армирани композити, се оказва неприложима към СВЯБ, поради значително по-големите деформации реализирани при СВЯБ, при проведени експериментални изпитвания, в сравнение с получените изчислителни стойности по стандарта. В стандарта също ясно се дефинира остатъчната якост ( $f$ ), отговаряща

на остатъчно натоварване ( $P$ ), в падащия клон на диаграмата ' $F-\delta$ ', до която да се изчислява  $G_f$  ( $L/600$  и  $L/150$ , където  $L$  е подпорното разстояние) (фиг. I. 29), но те попадат още в еластичния стадий при СВЯБ. Поради това определянето на максималната деформация, която да се използва за крайна точка, за изчисляване на площта  $G_f$  под получената диаграма при СВЯБ остава неизяснен въпрос в литературата.



фиг. I. 29: Диаграма напрежения деформации при влакнесто армирани композити, според ASTM 1609, с развитие на първа пукнатина при товар  $P_1$  и максимален товар  $P_2$ , при деформации съответно  $\delta_1$  и  $\delta_2$  и остатъчни деформации съответно реализирани при  $L/600$  и  $L/150$  [ASTMC 1609/C 1609M-10]

Освен ASTM C 1609/C 1609M-10 (2010) друг стандарт за влакнесто армиране – ASTM C 1018-97 [ASTM C 1018-97] (отпаднал и не е заменен) дава същата математическа зависимост за определяне на деформацията при първа пукнатина  $\delta$ . Но в него съгласно определената деформация  $\delta$  се извеждат други характерни точки от диаграмата ' $F-\delta$ ', съответстващи на деформации  $3*\delta$ ,  $5,5*\delta$  и  $10,5*\delta$  (фиг. I. 30), които служат за изчисляване на  $G_f$ .



фиг. I. 30: Общ вид на диаграмата 'натоварване-провисване', с дефиниране на основните зони в диаграмата по стандарт ASTM C 1018-97 [ASTM C 1018-97]

Получените площи под диаграмата 'F-δ', измерени в [N.mm] показват енергията, необходима за деформиране на пробното тяло, до определена степен, винаги във функция на провисването при първа пукнатина δ. На базата на изчислените площи се определят т.н. индекси на жилавост (*toughness indexes*), като отношение на площи, приравнени към площта до първата пукнатина. Тъй като у нас терминът „жилавост“ се асоциира с термина „ударна жилавост“, т.е би бил по-подходящ за означаване на издръжливостта на ударно въздействие при циклично натоварване, е възприето тези индекси за СВЯБ, да се означават като индекси на пластично разрушение, защото техният физически смисъл е свързан с възможността за развитие на пластични деформации в материала (виж гл. III. т. 9.5.1). Разликата между отделните индекси показва факторите на остатъчна якост (*residual strength factors*). И двата разгледани параметъра, получени на базата на изчислената енергия на разрушение  $G_f$ , са бездимензионни величини, имащи отношение към поведението на материала в еласто-пластичен стадий. Те служат за количествен параметър при определянето на дуктилността на бетона.

#### 6.4.1.1.2 Надлъжна деформация в опънна зона

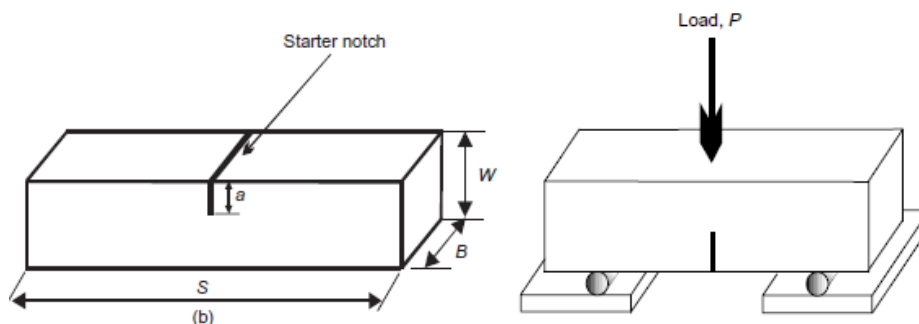
Определянето на енергията на разрушение посредством измервания на широчината на отваряне на пукнатина *CMOD* (*Crack Mouth Opening Displacement*) е залегнало в ASTM E1820-06 (2006) [ASTM E1820-06] и БДС EN 14651:2005 [БДС EN 14651:2005+A1:2007]. Използва се концепцията на Kalihaloo [Kalihaloo, 2003, Abdalla&Kalihaloo, 2003, Kalihaloo, 2013] за локалната енергия на разрушение. Опитната постановка представлява проста греда, подложена на огъване с една концентрирана сила по средата (фиг. I. 31). Пробните тела са греди, на които предварително е извършено подрязване в долната част. Разрушението настъпва в зоната над прореза поради интензивно микропукнатинообразуване. Тази зона, от върха на прореза до горната страна на гредата, върху която е приложен товара, е известна под наименованието *FPZ* (*Fracture Process Zone*). Kalihaloo подробно изследва различни варианти на поведение на *FPZ* зоната, като варира геометричните параметри на гредите, нивото на нулевата линия и вида на матрицата на бетона – от обикновен бетон до високоякоостен бетон и СВЯБ.

Енергията на разрушение се изчислява посредством уравнението:

$$G_F = \frac{1}{(W - a)B} \int F d\delta,$$

където:

- W е височината на гредата, mm;
- a е дълбочината на прореза, mm;
- B е широчината на гредата, mm;
- F е натоварващата сила, N;
- δ е провисване на гредата, mm.



фиг. 1. 31: Подрязано пробно тяло, подложено на натоварване с една концентрирана сила, при измерване на  $CMOD$  [Abdalla&Kalihaloo, 2003]

Подобен подход към изчисляване на  $G_f$  на СВЯБ, с известни модификации, е използван и от други автори [Stengel, 2012, Graybeal, 2005].

Друго изследване [Shah, 1991] използва развитието на надлъжната деформация в опънната зона, във функция на приложения товар, за да дефинира така наречения фактор на критичното напрежение '*critical stress intensity factor -  $K_{Ic}^S$* ', който отразява енергията на разрушение:

$$K_{Ic}^S = \frac{3P_{max}l_s}{2 \cdot b \cdot h^2} \cdot \sqrt{\pi \cdot \underline{a}} \cdot F(\xi)$$

където:

$P_{max}$  е максималната достигната сила, N;

$l_s$  е подпорното разстояние, mm;

$b$  е широчината на пробното тяло, mm;

$h$  е дебелината на пробното тяло, mm;

$\underline{a}$  е ефективната критична дължина на пукнатината, mm;

$\pi=3,14$ ;

$F(\xi)$  е функция, която отчита надлъжната деформация в опънната зона.

$K_{Ic}^S$  е параметър, който изследва опънното усилие, при условие на ограничена пластичност на  $FPZ$  зоната. Параметърът има за цел да характеризира способността на материала да се съпротивлява на отваряне на пукнатина. Служи за съпоставка на резултати при използване на пробни тела с различни геометрични размери, с различни дълбочини на пукнатинообразуване и породени напрежения. Въз основа на  $K_{Ic}^S$ , може да бъде изчислена енергията на разрушение:

$$G_f = \frac{(K_{Ic}^S)^2}{E},$$

където:

$K_{Ic}^S$  е фактора на критично напрежение;

$E$  е модулът на еластичност.

#### 6.4.1.1.3 Фиксирано максимално провисване

Основно предизвикателство при изчисляване на  $G_f$  се явява до какво провисване да бъде взет под внимание падащия клон на диаграмата. По препоръките на RILEM [RILEM 50-FMC,

1985], за изчисляване енергията на разрушение, се използва площта на **'F-δ'** при фиксиране на максималното провисване от 10 mm [Güvensoy, 2004] (фиг. I. 32). Използваните пробни тела са с размери 70/70/280 mm, а приложенияят товар е с една концентрирана сила, в средата на подпорното разстояние от 200 mm. Предварително е извършено подрязване на гредите от долната им страна, с цел да се индуцира поява на пукнатина на това място.

$$G_f = \frac{W_o + m \cdot g \cdot \frac{S_1}{L} \delta_s}{B \cdot (h - a)}, \left[ \frac{N}{mm} \right]$$

където:

$W_o$  – площ под кривата, N.mm;

$m$  – маса на гредата, kg;

$g$  – земно ускорение,  $m/s^2$ ;

$S_1$  – отвор на гредата, mm;

$L$  – дължина на гредата, mm;

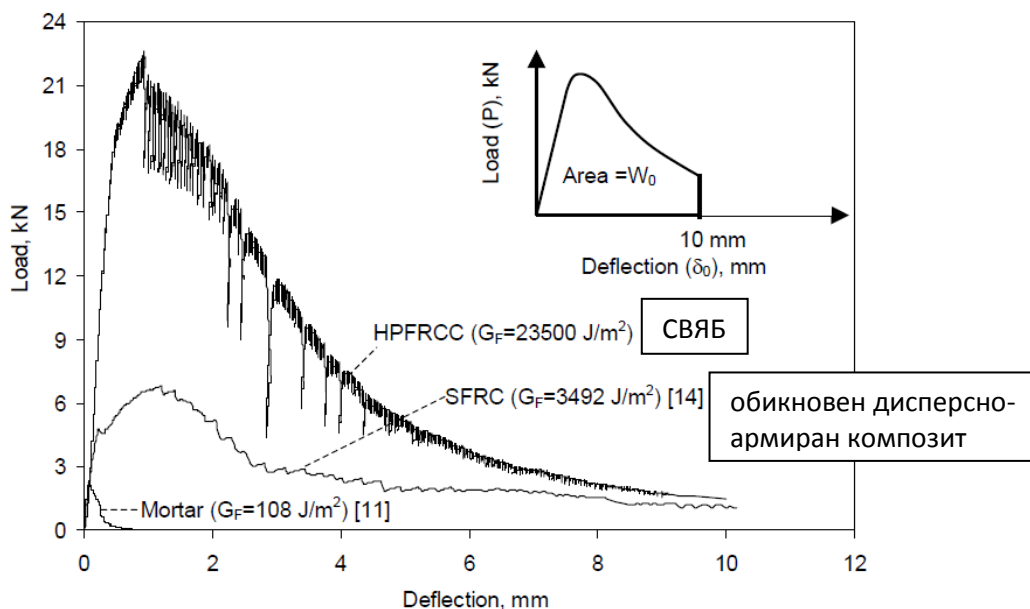
$\delta_s$  – провисване на гредата, mm;

$B$  – широчина на гредата, mm;

$a$  – прорез в гредата, mm;

$h$  – височина на гредата, mm

В този случай, параметърът  $G_f$  представлява енергията на разрушение в  $[N/mm]$ , отнесена към напречното сечение, поемащо натоварването, като се отчитат и геометричните размери на пробното тяло, коравината на образеца и влиянието на гравитацията.



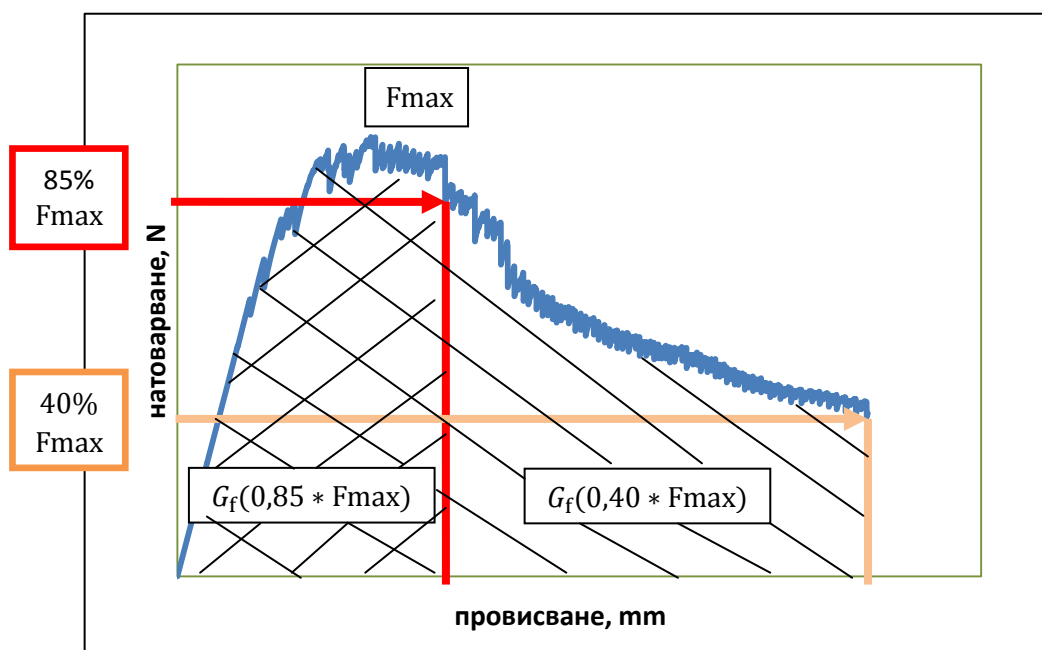
фиг. I. 32: Диаграма **'F-δ'**, получена при точково натоварване на огъване на пробни тела от СВЯБ, сравнен с обикновен дисперсно армиран бетон и обикновен разтвор [Güvensoy, 2004]

Според други източници, характеризирането на дуктилното поведение на СВЯБ, се разглежда до други стойности на фиксираното максимално провисване, например 3,5 mm при 4-ри точково натоварване на греди с размери 100/100/500 mm [Orgass, 2004] или 5 mm при греди 150/150/700 mm [Empelmann, 2008]. С намаляване на размерите на пробните тела до

40/40/160 mm, натоварването става три точково, а фиксираното максимално провисване намалява [Orgass, 2004].

#### 6.4.1.1.4 Фиксирани стойности на остатъчното натоварване

С оглед оценка на оставащата носеща способност след достигане на максималното натоварване, може да се използват и други принципи за изчисляване на енергията на разрушение  $G_f$  - при зададени стойности на натоварването в падащия клон на работната диаграма 'F- $\delta$ ' (например 85% от максималната сила ( $F_{max}$ ) [Петров, 2005, Дойков, 2007] и до 40% от  $F_{max}$  според [Hilliborg, 1989] (фиг. I. 33). Следователно, тук акцентът не се поставя върху деформативността и/или появата на първа пукнатина, а върху възможността материалът да запазва известна носеща способност.



фиг. I. 33: Фиксирани стойности на остатъчно натоварване в диаграмата "F- $\delta$ "

Според EuroCode 2 [БДС EN 1992-1-1:2005/NA:2011], работната диаграма на натиск на бетона ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), има вида представен на фиг. I. 34 (в синьо). Реалната диаграма, определена по експериментален път (в червено) служи за преизчисляване в работна стойност  $f_{CD}$ . По този начин бетонът се ограничава до определени допустимите напрежения, след които се счита, че се развиват недопустими пластични деформации.

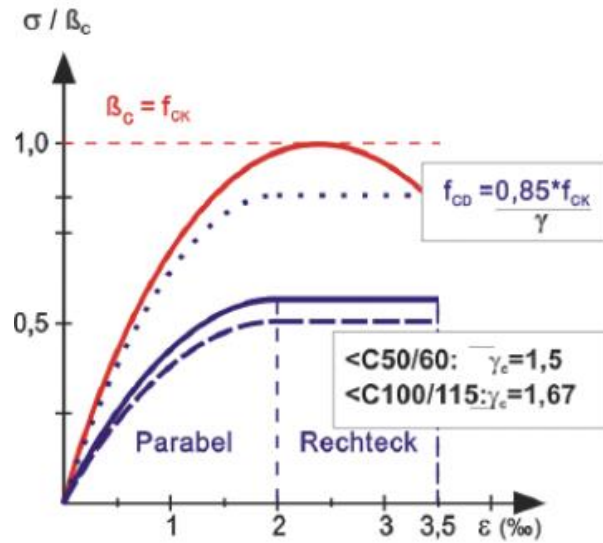
$$f_{CD} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c},$$

където:

$\alpha_{cc}$  е коефициент, който отчита дълготрайните и неблагоприятни ефекти върху якостта на бетона, породен от начина на полагане на натоварването (между 0,8 и 1,0);

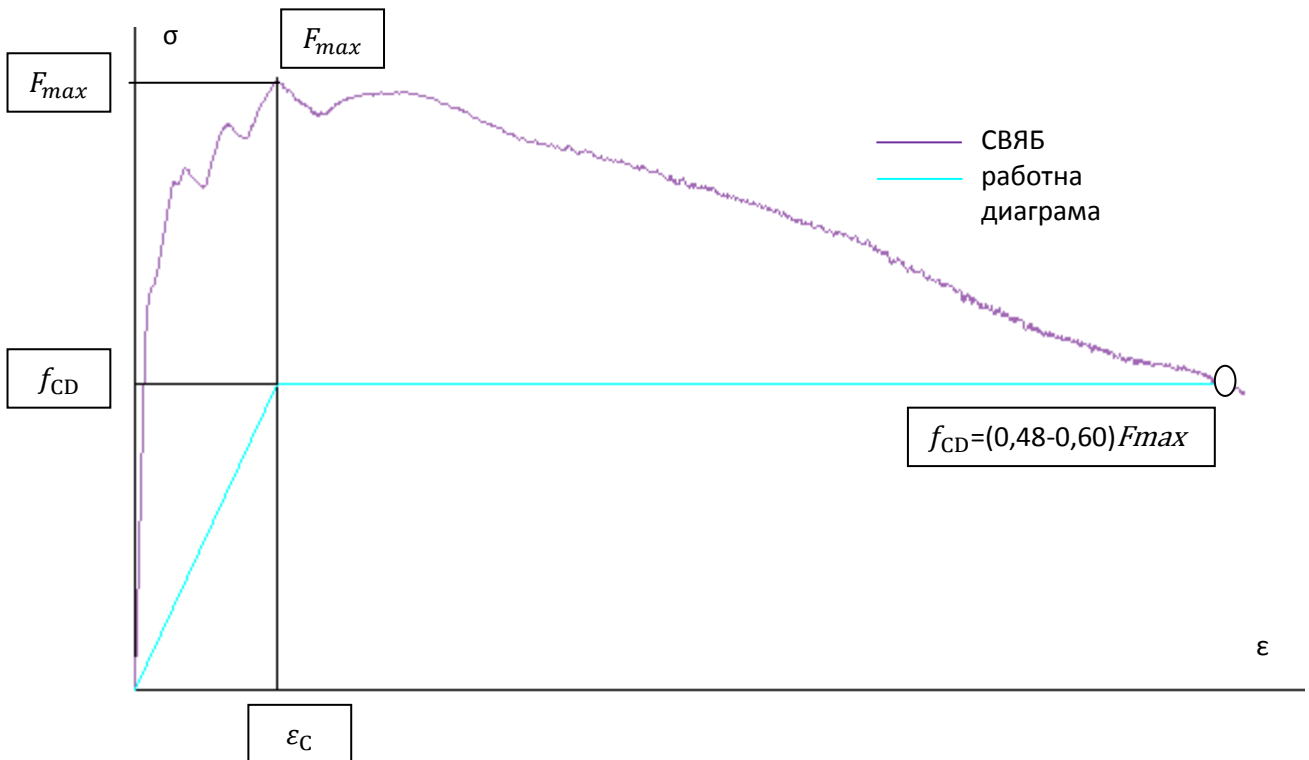
$f_{ck}$  е характеристична цилиндрична якост на бетона на натиск;

$\gamma_c$  е коефициент на сигурност ( $\gamma_c=1,67$  при бетони с клас C < C 100/115;  $\gamma_c=1,5$  при бетони с клас C < C50/60);



фиг. 1. 34: Параболично-праволинейна диаграма на бетон, подложен на натиск [Thienel, 2008]

Независимо от начина на натоварване (натиск, осов опън, опън при огъване),  $f_{CD}$  зависи от коефициентите  $\alpha_{cc}$  и  $\gamma_c$  и е във функция на характеристичната якост на бетона. Според границите, в които може да вариант коефициентите във формулата за изчисляване на  $f_{CD}$ ,  $f_{CD}$  попада в интервала между 0,48 и 0,60 от максималната получена сила. Това дава основание падащият клон на диаграмата  $\sigma$ - $\epsilon$ , при натоварване на опън при огъване, да бъде отчитан до тези стойности. Работната диаграма при СВЯБ, според предписанията на *EuroCode 2* би следвало да има вида представен на фиг. 1. 35.



фиг. 1. 35: Диаграма  $\sigma$ - $\epsilon$ , при натоварване на опън при огъване при СВЯБ и според *EuroCode 2*

6.4.1.2 Параметри за оценка

6.4.1.2.1 Индекси на пластично разрушение

Индексите на пластично разрушение (наричани още индекси на крехко разрушение [Ростовски, 2012]), описват начина на поведение на композита до определена критична деформация ( $3*\delta$ ,  $5,5*\delta$  и  $10,5*\delta$ ) (фиг. I. 30). Те се определят като отношение на площи до определена критична деформации, под диаграмата 'натоварване-провисване' отнесени винаги към провисването  $\delta$ , реализирано при първа пукнатина. Стойностите на индексите на жилавост могат да бъдат увеличени чрез целенасочено подреждане на дисперсната армировка успоредно на надлъжната ос на пробното тяло.

Индексите на пластично разрушение отразяват интегралното поведение на материала и са особено показателни за неговата дуктиленост – колкото тези индекси са по-високи, толкова материалът е по-дуктилен – т.е. има капацитет за развитие на пластични деформации след появата на първа пукнатина (табл. I. 3).

табл. I. 3: Основни параметри при дисперсно армираните композити съгласно ASTM C 1018-97

Енергия на разрушението $Gf$	Индекси на пластично разрушение	Фактор на остатъчна якост
$A(\delta)$	$I_5 = \frac{A(3\delta)}{A(\delta)}$	$R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5)$
$A(3\delta)$	$I_{10} = \frac{A(5,5\delta)}{A(\delta)}$	
$A(5,5\delta)$	$I_{20} = \frac{A(10,5\delta)}{A(\delta)}$	$R_{5,10} = 10(I_{20} - I_{10})$
$A(10,5\delta)$		

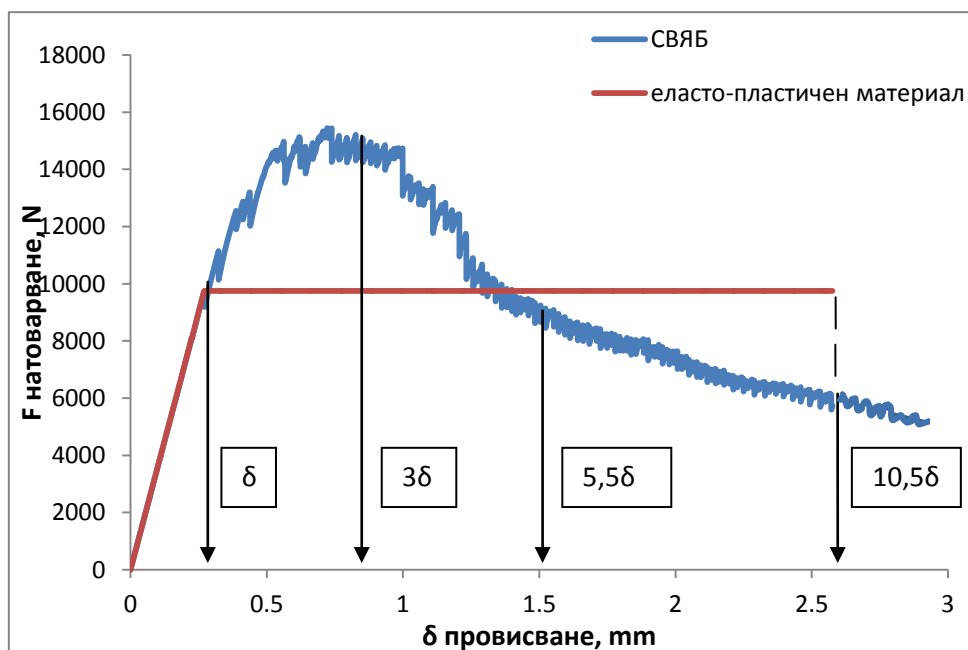
Интерес представлява изчисляването на индексите на енергията на разрушение при идеално еласто-пластичен материал, с които се моделира поведението на обикновените дисперсно-армирани композити: след еластичен стадий се счита, че материалът пластифицира, в резултат на възникването на множество пукнатини, поради което напреженията спират да нарастват. На фиг. I. 36 е представена деформационна крива при СВЯБ и на идеално еласто-пластичен материал, с което се вижда приноса на дисперсната армировка за нарастване на енергията на разрушение. До появата на първа пукнатина  $\delta$ , двата материала имат еластично поведение. Изчисляването на площите  $A$  и съответните индекси и фактор на остатъчните якости при идеално еласто-пластичен материал са представени в табл. I. 4.



табл. I. 4: Основни параметри на еласто-пластичен материал съгласно ASTM C 1018-97

Енергия на разрушението $Gf$	Индекси на пластично разрушение	Фактор на остатъчна якост
$A(\delta) = \frac{\delta \cdot F}{2}$ $A(3\delta) = \frac{\delta \cdot F}{2} + 2\delta \cdot F$ $A(5,5\delta) = \frac{\delta \cdot F}{2} + 4,5\delta \cdot F$	$I_5 = \frac{A(3\delta)}{A(\delta)} = \frac{\frac{\delta \cdot F}{2} + 2\delta \cdot F}{\frac{\delta \cdot F}{2}} = 5$ $I_{10} = \frac{A(5,5\delta)}{A(\delta)} = \frac{\frac{\delta \cdot F}{2} + 4,5\delta \cdot F}{\frac{\delta \cdot F}{2}} = 10$	$R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5) = 100$

Индексите  $I_5$  и  $I_{10}$  отразяват идеално пластичното поведение на материала [Ростовски, Найденов, 2012], с което дисперсно армираните композити се отличава от останалите бетони, които имат изцяло крехко разрушение. Без зоната на уякчаване, при обинования бетон, индексите  $I_5$  и  $I_{10}$ , след първа пукнатина, биха имали стойност единица. При идеално еластично-пластично поведение се изчисляват максимални им стойности – съответно  $I_{10}=5$  и  $I_{10}=10$  (табл. I. 4).



фиг. I. 36: Примерна работна диаграма (натоварване-провисване) на СВЯБ и на идеално еласто-пластичен материал

#### 6.4.1.2.2 Фактор на остатъчна якост

Факторите на остатъчна якост -  $R_{5,10}$  и  $R_{10,20}$ , при идеален еласто-пластичен материал, биха имали максимална стойност от 100 [Ростовски, Найденов, 2012]. Според ASTM C 1609, те се дефинират като разликата между индексите на пластично разрушение, умножени съответно по 20 и по 10. Колкото по-ниска е стойността на всеки един от факторите на остатъчна якост, толкова материалът е по-крехък.

#### 6.4.1.2.3 Характеристична дължина ( $l_{ch}$ ) и дуктилна дължина ( $D_l$ )

Характеристичната дължина  $l_{ch}$  ('characteristic length') е друг параметър, който дава представа за дуктилното поведение на влакнесто-армираните композити.  $l_{ch}$  се изчислява на база на енергията на разрушение  $G_f$ , като дава връзка между якостта на огъване и получената, в резултат на огъващата сила, опънна якост. Характеристичната дължина зависи от изчислената средна дължина на пукнатината или височината на опънната зона. Използваната опитна постановка представлява проста греда, натоварена на огъване, с една концентрирана сила по средата [Brameshuber, 2004].

Според [Hillerborg, 1976] за определянето на характеристичната дължина ( $l_{ch}$ ) се използва четири-точково натоварване на греди с размери 100/100/500 mm, без предварително подрязване.  $l_{ch}$  се изчислява като:

$$l_{ch} = \frac{G_f \cdot E}{f_{ct}^2},$$

където:

$l_{ch}$  е характеристична дължина, mm;

$G_f$  е енергия на разрушение, N/m;

$E$  е модул на еластичност, МПа;

$f_{ct}$  е якост на опън, МПа.

Установено е, че по-крехките материала се описват с по-къса характеристична дължина, а по-дуктилните с по-голяма дължина.

При СВЯБ обаче, имаме едновременно висока якост на опън, поради вложената влакнеста-армировка, но и висока енергия на разрушението, дължаща се по-голямата деформируемост. В зависимост от типа (къси или дълги влакна) и процента на влакнестото армиране се променят както енергията на разрушение, така и якостта на опън. Следователно характеристичната дължина се оказва неподходящ параметър, за оценяване на дуктилността на СВЯБ, дори според някои литературни източници характеристичната дължина при СВЯБ отбелязва по-ниски стойности, в сравнение с обикновените дисперсно-армирани бетони, и дефинира СВЯБ като крехък материал [Fehling, 2004].

По подобие на характеристичната дължина се дефинира и понятието дуктилната дължина ('ductility length'), като отношение на  $G_f$  към якостта на опън, без да се отчита приноса на модула на еластичност.

$$D_l = \frac{G_f}{f_{ct}}$$

където:

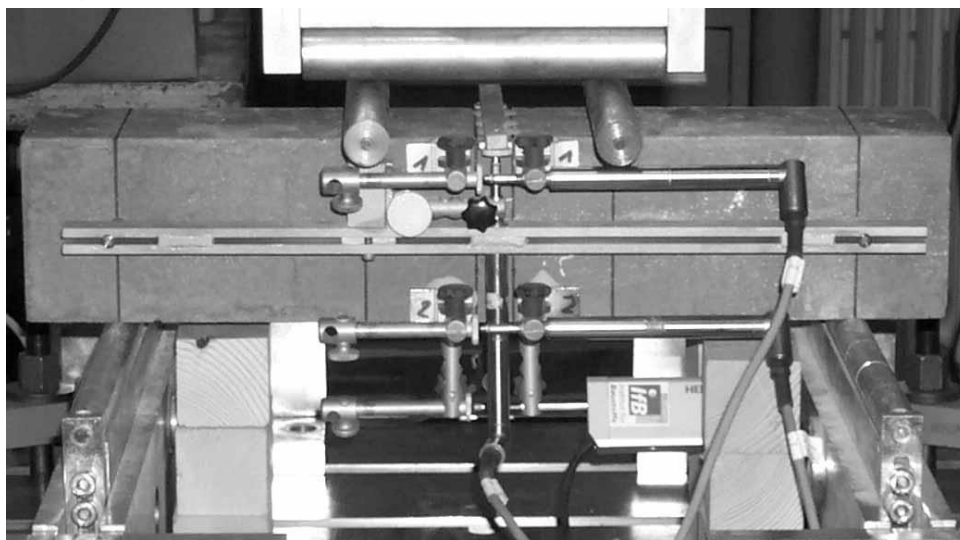
$D_l$  е дуктилната дължина, mm;

$G_f$  е енергия на разрушение, N/m;

$f_{ct}$  е якост на опън, МПа.

6.4.1.2.4 Необходима енергия за пукнатинообразуване ( $G_{ci}^*$ )

Необходимата енергия за пукнатинообразуване ('*crack-formation energy*') представлява онова необходимо количество енергия  $G_{ci}$ , което се десипира в пробното тяло за образуването на пукнатина [Корр, 1998]. Използваната опитна постановка е проста греда 100/100/500 mm, натоварена на просто огъване, като е проследено провисването в средната зона. Изпитването е реализирано до фиксирана максимално провисване от 0,25 mm. Използвана е работна диаграма на зависимостта 'напрежения-провисване'. Изчислена е площта  $G_{ci}$ , заключена между диаграмата и абцисата, за определяне на необходимата енергия за пукнатинообразуване ( $G_{ci}^*$ ). Само невъзвратимите деформации са взети под внимание при определянето на площта  $G_{ci}$ . Изследването на момента, в който микропукнатината нараства и се превръща в макропукнатина, е изключително трудно. Методиката определя началото на микропукнатинообразуване, като моментът, в който опънните деформации превишат натисковите деформации, измервани съответно в долната опънна и горната натискова част на пробното тяло. В този момент се изчерпва еластичния стадий. Според ASTM C 1018-97, това е точката в която се появява първата пукнатина. Методиката на *Коор* е адаптирана според препоръките на *CEB-FIB Mode I Code 1990* [CEB-FIB, 1993], с цел да бъде приложена към СВЯБ. Измерването на деформациите в опънната и натисковата зона се извършва посредством датчици (сн. I. 4).



сн. I. 4: Четири точково натоварване на огъване, с датчици в опънна (1) и натискова(2) зона [Корр, 1998]

Определяне на необходимата енергия за пукнатинообразуване според *Корр* [Корр, 1998] се изчислява като:

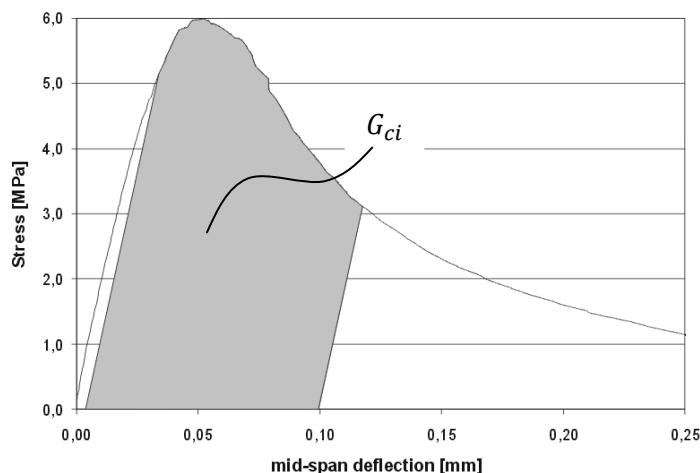
$$G_{ci}^* = \frac{G_{ci}}{u^*}$$

където:

$G_{ci}^*$  е необходимата енергия за пукнатинообразуване, N/m;

$G_{ci}$  е площта под диаграмата 'напрежение-провисване', N/m;

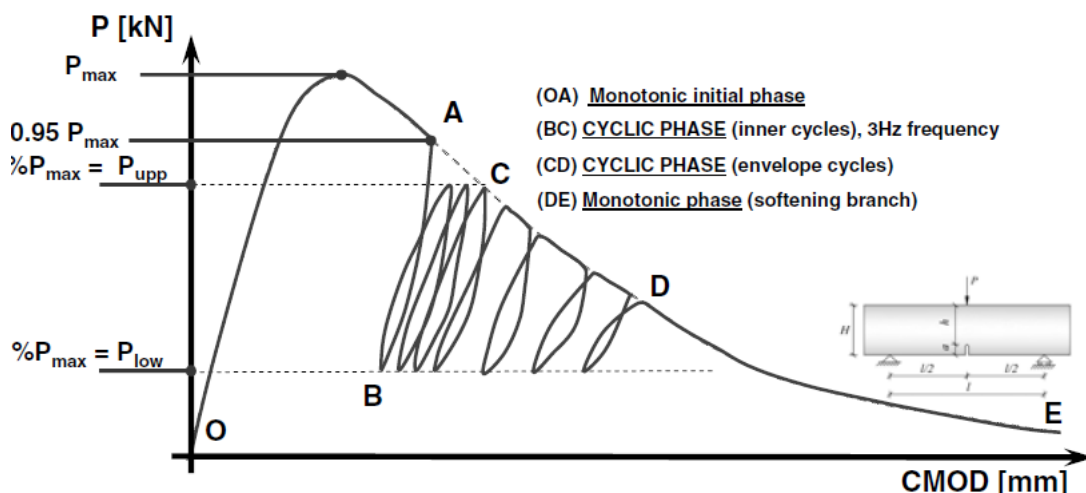
$u^*$  реализирана деформация при провисване от 0,1 mm, отговаряща на съответна стойност в падащата част на диаграмата, паралелно на зоната на пропорционалност (фиг. I. 37).



фиг. I. 37: Определяне на необходимата енергия за пукнатинообразуване, според Коор [Коор, 1998]

#### 6.4.2 Енергия на разрушението (*Fracture energy ( $G_f$ )*)

'Fracture energy' е понятие, свързано с енергията на разрушение на композитен материал, но при прилагане на динамично въздействие при продължително циклично натоварване (или още наречено якост на умора). Според схемата си на натоварване, това са въздействия с несиметричен цикъл на натоварване, т.е. в бетона възникват еднознакови напрежения, или само на натиск, или само на опън. След влагането на дисперсна-армировка в състава на СВЯБ се повишава стойността на максималната достигната сила над 1,5 пъти и на 'fracture energy' над 4 пъти [ACI 544.1R-96, 2002].



фиг. I. 38: Работна диаграма 'натоварване-надлъжна деформация в опънна зона', получена при изпитване на три-точково огъване при циклично натоварване [Germano, 2012]

Фиг. I. 38 показва циклично натоварване, съгласно [БДС EN 14651:2005+A1:2007], което позволява три-точково изпитване на огъване, с малки пробни тела 150/150/550 mm. Осъществено е измерване на Crack Mouth Opening Displacement (CMOD) (виж. гл. I. т. 5.4.1.1.2), като контролиращ параметър, при реализиран прорез в средната третина с височина от 25 mm. Едновременно с това са поставени контролни датчици, които да следят за провисването в точката непосредствено под приложената сила и в точката във върха на прореза – CTOD (Crack

*Tip Opening Displacement*). Експеримента има за цел да проследи поведението на материала при циклично натоварване при различни състави с вложена дисперсна-армировка от стоманени влакна. С използването ѝ се наблюдава значително увеличение на '*fracture energy*' и намаляване на крехкостта на материала.

#### 6.4.3 Абсорбционна способност (*Energy absorption* ( $I_t$ ))

Способността на дисперсно-армираните бетони да се съпротивляват при разрушение, се свързва с измерване на енергията, която те могат да акумулират в себе си. Определянето на '*energy absorption*' използва предварително избраната схема на натоварване, независимо от вида ѝ - статично или динамично натоварване, краткотрайно или продължително, като съпровожда изследването на '*fracture toughness*' или '*fracture energy*'. Тя прави съпоставка между резултатите, получени при армирани и неармирани пробни образци

Най-често се прилага статично натоварване на опън при огъване, до определено максимално фиксирано провисване. Способността на материала да абсорбира в себе си енергия се дефинира като отношението между площта под диаграмата 'натоварване-провисване' при дисперсно армирани бетони, отнесено към аналогично определената площта при неармирани пробни тела, до същата реализирана деформация. Използва се една и съща композиционна матрица и размери на изпитваните образци, подложени на едно и също натоварване. Влиянието на добавените в състава стоманени влакна се оценява чрез т.н. получен бездименсионен коефициент  $I_t$ . Използването на '*energy absorption*', може да служи като помощен параметър, характеризиращ дуктилността на СВЯБ, но по-често се предпочита изчисляване на енергията на разрушението посредством '*fracture toughness*' ( $G_f$ ) [ACI 544.1R-96].

Друг използван метод за определяне на '*energy absorption*' е на базата на стандарт ASTM C1550-12a [ASTM C1550-12a]. Той описва способността на дисперсно-армираните бетони да преразпределят напрежения след пукнатинообразуване. Използваната статическа схема на натоварване е бетонов панел, с диаметър 800 mm и дебелина 75 mm. Прилага се натоварване посредством сферично тяло в центъра на пробното тяло и три други точки в окръжност от 75 cm, при скорост от 4 mm/min до максимална деформация от 4 cm. Получената площ под диаграмата 'натоварване-провисване' при армираните плочи се сравнява с площта под диаграмата на неармираните такива, натоварени по същата схема. Използването на този метод има няколко предимства пред изпитването на греди на огъване: много по-голямо количество микропукнатини преди разрушение, много по-малко разсейване на резултатите и като цяло много по-представително изпитване свързано с работата на реални плочи. Поради тези причини този метод често се прилага за изпитване на елементи '*insitu*'.

В резултат на направения литературен анализ, са обобщени основните предизвикателства, свързани с изследването на механичните свойства на СВЯБ и са формулирани целта и задачите на дисертационния труд в глава II.

## ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА, I-ВА ГЛАВА

**AASHTO** (American Association of State Highway and Transportation Officials), *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Customary U.S. Units*, Third Edition. AASHTO, **2004**;

**Abdalla H., Karihaloo B.:** Determination of size-independent specific fracture energy of concrete from three-point bend and wedge splitting tests, *Magazine of Concrete Research*, v.55, i.2, April **2003**, Pages:133-141;

**ACI** (American Concrete Institute), *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)*. ACI, Farmington Hills, Michigan, **2005**;

**ACI 544.1R-96** (Reapproved 2002), *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, **2002**;

**Acker P., Behloul M.:** Ductal© Technology: A Large Spectrum of Properties, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 11-23;

**AFGC/SETRA:** Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes. Recommendations. Documentes scientifiques et techniques. In Association Française de Génie Civil, SETRA, Bagnaux Cedex, June **2013**, Pages: 1 :318;

**Ahlborn T., Misson D., Peuse E., Gilbertson C.:** Durability and strength Characterization of Ultra-High Performance concrete under Variable Curing Regimes, *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages: 197-204;

**Aïtcin P.-C.:** *High Performance Concrete*, Modern Concrete Technology, Taylor & Francis, London and New York, **1998**;

**Aïtcin P.-C.:** Cement of yesterday and today. Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, v. 30, July **2000**, Pages 1349-1359;

**Alarcon-Ruiz L., Platret B., Massieu E., Ehrlacher A.:** The Use of Thermal Analysis in Assessing the Effect of Temperature on the Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, v. 35, **2005**, Pages: 609-613;

**Andreasen A., Andersen J.:** Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Koernern (mit einigen Experimenten). *Kolloid-Zeitschrift*, v.50, **1930**, Pages: 217-228;

**Aronoff J., Frostig Y., Katz A.:** The behavior of very high strength concrete structures with CFRP reinforcing bars, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 567-558;

**ASTM C 1018-97:** Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading);

**ASTM C 1609/C 1609M-10:** Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading);

**ASTM C1550-12a:** Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel);

**ASTM E1820-06:** Standard Test Method for Measurement of Flexural Toughness;

**Bache HH:** Densified cement ultrafine particle-based materials, *CBL Report* no. 40. Aalborg Portland, Denmark, **1981**.

**Bayard O., Plé O.:** Fracture mechanics of reactive powder concrete: material modelling and experimental investigations, *Engineering Fracture Mechanics*, v.70, May 2003, Pages: 839-851;

**Bonneau O., Lachemi M., Dallaire E., Dugat J., Aïtcin P.:** Mechanical Properties and durability of Two Industrial Reactive Power Concretes, *American Concrete Institute Material Journal*, July-August **1997**, v.94, i.4, Pages: 286-290;

**Bornemann R., Faber S.:** UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibers under static and cyclic loading, *Proceeding First International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages:673-682;

**Boyd D.:** The Residual Set Dimension of the Apollonian Packing, *Mathematika*, v.20, i.2, **1973**, Pages: 170-174;

**Brameshuber W., Brockmann T., Banholzer B.:** Textile reinforced ultra high performance concrete, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 511-522;

**Cadoni E., Teruzzi T., Muttoni A., Suter R., Brühwiler E.:** FRC in Switzerland: research, applications and perspectives, *International Workshop on Advanced Fiber Reinforced Concrete*, Bergamo, Italy, **2004**.

**Carransquilio R. L., Nilson A.H., Slate F. O.:** Properties of High Strength Concrete Subjected to Short-Term Loads. *ACI Journal*, v. 78. i. 3, May **1981**, Pages 171-178.

**CEB-FIB Model Code 1990**, *Comité Euro-International du Béton*, Thomas Telford Services Ltd., London, **1993**;

**Cement and Concrete Association of Australia:** Drying Shrinkage of Cement and Concrete, *Cement and Concrete Association of Australia*, July **2002**;

**Cheyrezy M., Behloul M.:** Creep and Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete. *Creep, Shrinkage and Durability Mechanisms of concrete and other Quasi-Brittle Materials – Proceedings of the Sixth International Conference CONCREEP-6@MIT*, Cambridge, MA, SUA, August, **2001**. Ed. By Ulm, Bažant, Wittmann. Elsevier, Pages: 527-538;

**Cheyrezy M., Marat V., Frouin L.:** Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). *Cement and Concrete Research*, v.25, i.7, October **1995**, Pages: 1491-1500;

**Cong X., Kirkpatrick R.J.:** Effects of the temperature and relative humidity on the structure of C-S-H gel, *Cement and Concrete Research*. v. 25, **1995**, Pages: 1237-1245;

**Cook J.:** 10,000 psi concrete. *Concrete International*, v.11, October **1989**, Pages: 67-75;

**Detlef H., Ludwig H-M.:** Heat treatment and the risk of DEF Delayed ettringite formation in UHPC, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 717-730;

**Dils J., Schutter G, Veerle B., Braem E. :** Influence fo vacuum mixing on the mechanical properties of UHPC, *Proceeding the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel, Germany, March, 07-09, **2012**, Pages: 241-247;

**Dinger D., Funk J.:** Particle Packing , Part I and Part II, *Interceram*, **1992 & 1993**, Pages: 332-334 and Pages: 150-152;

**Droll K.:** Influence of additions on high performance concretes – grain size optimisation; *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-



15, **2004**, Pages 285-303;

**Dugat J.**, Roux N., Bernier G.: Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, *Material Structures*, **1996**, v.29, Pages: 233-240;

**Empelmann M.**, Teutsch M., Steven G.: Improvement of the Post Fracture Behavior of UHPC by Fibers, *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 177-184;

**Ewert J.**, Budelmann H., Krauß M.: Heat of Hydration and Hardening of Ultra High Performance Concrete (UHPC), *Proceeding of the second International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, March 05-07, **2008**, Pages: 409-416;

**Farnam Y.**, Shekarchi M., Mirdamadi A.: Experimental investigation of impact behaviour of high strength fiber reinforced concrete panels, , *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 751-758;

**Fehling E.**, Bunje K., Leutbecher T.: Design relevant properties of hardened Ultra High Performance Concrete, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 327-338;

**Feylessoufi A.**, Tenoudji F., Mirin V., Richard P. : Early ages shrinkage mechanisms of ultra-high performance cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, v.31, i.11, November **2001**, Pages: 1573-1579;

**FHWA**, Material Property Characterization of Ultra High Performance Concrete, *Federation Highway Administration Report*, VA. 22101-2296.1(1):1231, **2006**;

**Freettlöhr B.**, Reineck K., Reinhardt H.: Size and Shape Effect of UHPFRC Prisms Tested under Axial Tension and Bending, *Proceeding High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6, RILEM*, **2012**, Pages 365-372;

**Frommenwiler A.**: New generation of superplasticizers for high performance concrete (HPC), Switzerland, **1998**;

**Fuller W. Thompson S.**: The laws of proportioning concrete. *American society of civil engineers*, v.33, **1907**, Pages: 223-298;

**Funk J.**, Dinger D.: Predictive process control of crowded particulate suspensions – applied to ceramic

manufacturing. Kluwer Academic Publishers – Boston/Dordrecht/London, **1994**;

**Furnas C.:** Grading Aggregates. Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.23, **1931**, Pages: 1052-1058;

**Ganesan N., Indira P., Abraham R.:** Steel fiber reinforces high performance concrete beam-column joints subjected to cyclic loading, *ISET Journal of Earthquake Technology*, v.44, September-December **2007**, Pages: 445-456;

**Gao, R., Liu, Z.-M., Zhang, L.-Q., Stroeven P.:** Static Properties of Reactive Powder Concrete Beams. *Key Engineering Materials*, January **2006**, v.302-303, Pages: 521-527;

**Garas V., Kahn L., Kurtis K.:** Short-term creep and shrinkage of ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Composites*, v.31, i3, **2009**, Pages:147-152;

**Geisenhanslüke C., Schmidt M.:** Methods for Modelling and Calculations of High Density Packing for Cement and Fillers in UHPC. *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages 303-311;

**Germano F., Plizzari G. :** Post-Peak Cyclic Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete under Bending, *RILEM High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*, **2012**, Pages: 313-320;

**Gerrit L., Dietmar S.:** Nanoparticles as accelerators for cement hydration, *Proceeding the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction*, Kassel, Germany, March, 7-9, **2012**, Pages: 93-99;

**Ghosh S.:** *Self-Healing Materials, Design Strategies, and Applications*, Wiley-VCH, **2009**;

**Graf O.:** Erkenntnisse über Straßenbeton. Zusammengestellt aus Versuchen in der Materialprüfanstalt der Stuttgart (Art. Bauwesen), Berlin Zementverlag, **1935**;

**Granger S., Loukili A., Pijaudier-Cabot G., Chanvillard G. :** Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis., *Cement and concrete Research*, v.37, i.4, April **2006**, Pages: 519-527;

**Graybeal B. Hartman J.:** Ultra-High Performance Concrete for Prestressed Concrete Bridge Girders, *Proceedings Concrete Bridge Conference*, Charlotte, USA, May **2004**;

**Graybeal B.** Characterization of the behaviour of Ultra-high performance concrete, *dissertation*, University of Maryland, **2005**;

**Graybeal B.:** Compressive Behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete, *American Concrete Institute Materials Journal*, March-April **2007**, Pages: 146-152;

**Graybeal B., Marshall D.:** Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11,6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete, *American Concrete Institute Materials Journal*, v.105, i.6, November/December **2008**, Pages: 603-609;

**Güvensoy G., Bayramov F., Ilki A., Sengül C., Tasdemir M., Kocatürk A.:** Mechanical behavior of High Performance Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites under Static Loading Conditions, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 649-660;

**Habel K., Viviani M., Denarié E., Brühwiler E.:** Development of the Mechanical Properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC). *Cement and Concrete Research*, v. 36, i. 7, July **2006-1**, Pages 1362-1370;

**Habel K., Charron J., Denarié E., Brühwiler E.:** Autogenous Deformations and Viscoelasticity of UHPRFC in Structures. *Magazine of Concrete Research*, v. 58, i.3, April, **2006-2**, Pages: 135-145;

**Heikal M., Morsy M., Aiad I.:** Effect of polycarboxylate superplasticizer on hydration characteristics of cement pastes containing silica fume, *Ceramics-Silikaty*, v. 50, i.1, November **2005**, Pages: 5-14;

**Heinz D., Dehn F., Urbonos L.:** Fire resistance of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) – Testing of Laboratory Samples and Columns under Load. *Proceeding of the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, September 13-15, **2004**, Germany, Pages: 703-715;

**Hertel, C.; Orgass, M.; Dehn, F.:** Brandschutztechnische Aspekte bei Faserbeton, *Innovationen im Bauwesen-Faserbeton*, Bauwerk-Verlag, November, Berlin, **2002**;

**Hillerborg A., Modeer M., Petersson P.:** Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements, *Cement and Concrete Research*, v.6, **1976**, Pages: 773-782;

**Hilleborg A.:** Existing Methods to Determine and Evaluate Fracture Toughness of Aggregative Materials, *RILEM Recommendations on Concrete, Fracture Toughness and Fracture Energy. Test Methods for Concrete and Rock*, ed. Mihashi H., Balkema, Rotterdam **1989**, Pages:145-151;

**Illston J., Momone P.:** *Construction Materials: Their Nature and Behaviour* (4<sup>th</sup> Edition), Spon Press, London and New York, **2010**;

**Ipek M.**, Yilmanz K., Sümer M., Saribiyik M.: Effect of pre-setting pressure applied to mechanical behaviour of reactive powder concrete during setting phase, *Construction and Building Materials*, v.25, **2011**, Pages: 61-68.

**ISO 1920-10-2010**: Determination of static modulus of elasticity in compression;

**Janotka I.**, Nürnbergerová T.: Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume. *Nuclear Engineering and Design*, v. 235, May **2005**, Pages: 2019-2032;

**Janasson J.**: Modelling of Temperature, Moisture and Stresses in Young Concrete, *Dissertation*, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, **1994**;

**Joongwon L.**, Choi K., Hong K: The Effect of High Temperature on Color and Residual Compressive Strength of Concrete, *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, v. 7, **2010**, Pages: 1772-1775;

**Kalihhaloo B.**, Abdalla H., Imjai T.: A simple method for determining the true specific fracture energy of concrete, *Magazine of Concrete Research*, v.55, i.5, October **2003**, Pages: 471-481;

**Kalihhaloo B.**, Ramachandra Murthy A., Iyer N.: Determination of size-independent specific fracture energy of concrete mixes by the tri-linear model, *Cement and Concrete Research*, v.49, **2013**, Pages: 82-88;

**Kopp S.**: Nachweis, Beurteilung und Quantifizierung von Gefügeveränderungen im Beton mit energetischen Kenngrößen, *Dissertation*, Ruhr-Universität Bochum, **1998**;

**Korpa A.**, Trettin R.: The use of synthetic silica dispersions for making HPC and UHPC systems, preliminary comparison results between colloidal silica dispersions and silica fumes (SF), *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 155-164;

**Krell J.**: Die Konsistenz von Zementleim , Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung. Schriftenreihe der Zementindustrie, v.46, *Forschungsinstitut der Zementindustrie*, Düsseldorf, **1985**;

**Kurts K.**, Metha P., Monteiro P.: *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, 2ed edition, Prentice Hall, **1993**;

**Lachovski E.**: Structure of Hydrated Cement Paste, <http://people.ce.gatech.edu/~kk92/hcp.pdf>

**Le Chatelier H.:** Recherches Expérimentales sur la Construction des Mortiers Hydrauliques. Dunod, Paris, **1904**, Pages : 163-167;

**Lee, N.P., Chisholm D.H.:** *Reactive Powder Concrete*, Branz, **2006**.  
<http://www.branz.co.nz/branzltd/publications/pdfs/SR146.pdf>;

**Lohaus L., Anders S.:** Effects of polymer- and fibre modifications on the ductility, fracture properties and micro-crack development of ultra-high performance concrete, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 625-636;

**Loukili A., Khelidj A., Richard P.:** Hydration Kinetics, change of Relative Humidity, and Autogenous Shrinkage of Ultra-High-strength Concrete. *Cement and concrete Research*, v.29, i.4, April **1999**, Page: 577-584;

**Lowke D., Stengel T., Schießl P., Gehlen C.:** Control of Rheology, Strength and Fiber Bond of UHPC with Additions – Effect of Packing Density and Addition Type, *Proceeding the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction*, Kassel, Germany, March, 7-9, **2012**, Pages: 215-224;

**Ma J., Orgass D., Schmidt F., Tue N.:** Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 205-212;

**Ma J., Schneider H.:** Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER)*, i. 7, **2002**, Pages 25-32;

**Mazanec O., Schießl P.:** Mixing Time Optimisation for UHPC, *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 401-409;

**Mills R.:** Factors influencing cessation of hydration in water cured cement pastes. *ACI-SP60*, Washington **1966**;

**Mindess, S.:** Bonding in Cementitious Composites: How Important is It?, *Proceedings, Symposium on Bonding in Cementitious Composites*, Boston, ed. S. Mindess and S. P. Shah, v. 114, *Materials Research Society*, Pittsburgh, **1988**, Pages: 3-10;

**Mörnd M., Pfeifer C.:** Microstructure and Durability of Ultra-High Performance Concrete, *Proceeding*

*the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 5-7, **2008**, Pages: 417-424;

**Müller U.**, Meng B., Kühne H-C., Nemecek J., Fontana P.: Micro texture and mechanical properties of heat treated and autoclaved Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 213-220;

**Myhre B.**, Hundere A. M. The use of particle size distribution in development of refractory castables, *Presented at XXV ALAFAR Congress*, San Carlos de Bariloche, Argentine Dec, 1-4, **1996**.

**Naaman A. E.:** Engineering Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v.1, i3, November **2003**, Pages: 241-251;

**Naaman A. E.:** High Performance Fiber Reinforced Cement Compositions: Classification and Applications, *Proceeding the CBM-CI International Workshop*, Karachi, Pakistan, **2007**, Pages: 389-401;

**Naaman A.E.**, Wille K., Tawil El.: Strain Rate Dependent Tensile Behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. *Proceeding High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*, RILEM, **2012**, Pages 381-387;

**Neville A.M.**, *Properties of Concrete*, UK, **2002**;

**Odelson J.B.**, Kerr E.A., Vichit-Vadakan W.: Young's modulus of Cement Paste at Elevated Temperature, *Cement and Concrete Research*, v. 37, **2007**, Pages: 258-263;

**Okamura H.**, Masahira O.: Self-Compacting Concrete, *Advanced Concrete Technology*, v.1, i.1, April **2003**, Pages: 1-15;

**Orgass M.**, Klug Y.: Fiber Reinforced Ultra-High Strength Concretes. *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages 637-647;

**Pansuk W.**, Sato Y., Sato H., Shionaga R.: Tensile Behaviors and Fiber Orientation of UHPC, *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 161-168;

**Park C. K.**, **Hoh. M. H.**, Park T. H.: Rheological properties of cementitious materials containing mineral

admixtures. *Cement and Concrete Research*, v.35, November **2004**, Pages 842-849;

**Park J. J., Kang S. T., Koh, K. T., Kim S. W.:** Influence of the Ingredients on the Compressive Strength of UHPC as a Fundamental Study to Optimize the Mixing Proportion. *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 105-113;

**Plank J., Schroefl Ch., Gruber M., Lesti M., Sieber R.:** Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The Importance of PCE Compatibility with Silica Fume, *Journal of Advanced Concrete Technology*. v.7.i.1, February **2009**, Pages:5-12;

**Ponteneuve C., Korb J., Petit D., Zanni H.:** Structure-texture correlation in ultra-high performance concrete : A nuclear magnetic resonance study. *Cement and Concrete Research*, v.31, i.12, January **2002**, Pages:97-101;

**Prince W., Lajnef M., Aïtcin P.-C.:**Interaction between ettringite and polynaphtalene sulfonate superplasticiser in a cementitious paste. *Cement and Concrete Research*, v.32, April **2001**, Pages: 79-85;

**Rashard A., Zeedan S.:** A preliminary study of blended pastes of cement and quartz powder under the effect of elevated temperature. *Construction and Building Materials*, v. 29, **2012**, Pages: 672-681;

**Reda M., Shrive N., Gillott J.:** Microstructural investigation of innovative UHPC, *Cement and Concrete Research*, v.29, **1999**, Pages: 323-329;

**Reineck K.-H., Greiner S :** Tests on ultra-high performance fibre reinforced concrete designing hot-water tanks and UHPFRC-shells. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, Sept. 13-15, **2004**, Pages: 361-374;

**Reschke T.:** Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. *Schriftenreihe der Zementindustrie*, v.62, **2001**;

**Richard P., Cheyrezy M.:** Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength. *Concrete Technology: Past, Present, and Future – Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium*. American concrete Institute, Detroit, USA, **1994**;

**Richard P., Cheyrezy M.:** Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and concrete Research*, v. 25, i.7, October **1995**, Pages: 1501-1511;

**RILEM** Technical Committee **50-FMC**: *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bending test on notched beams*, In *Materials and Structures*, v.18, i.106, **1985**, Pages: 287-291;

**Ronneberg** H., Sandvik M.: High Strength Concrete for North Sea platforms. *Concrete international*, v.12, January **1990**, Pages: 29-34;

**Schachinger** I., Schuber J., Mazanec O.: Effect of Mixing and Placing Methods on Fresh and Hardened High Performance Concrete (UHPC), *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 573-586;

**Schaller** I., Larrard F., Sudret J., Acker P., LeRoy R.: Experimental monitoring of the Joigny Bridge, in *High Performance Concrete: From Material to Structure* (ed.Y. Malier), E& FN SPON, London, **1992**, Pages: 432-457;

**Schmidt** M., Fehling E., Teichmann T., Bunje K., Bornemann.: Ultra High Performance Concrete: Perspective for the Precast Concrete industry. *Concrete Precasting Plant and Technology*. v.69, i.3, **2003**, Pages: 16-29;

**Schmidt** M., Fehling E.: Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe. *7<sup>th</sup> International Symposium on Utilization of High Strength High Performance Concrete*, **2005**, v.1, Pages: 51-57;

**Schwanda** F.: Der Bestwert der Kornzusammensetzung von Betonzuschlagstoffen. *Der Bauingenieur*, v.31, **1956**, Pages: 41-46;

**Setzer** M.: Einfluß der Feuchte auf die Mesoporenstruktur von Zementstein". erscheint in: GDCh-Monographie, *Tagung Bauchemie*, München **1997 (1998)**;

**Shah** S., Carpinteri A.: Fracture mechanics Test Methods for Concrete. *RILEM Report 5*, Chapman and Hall, Boca Raton, **1991**, Pages: 4-6;

**Si-Larbi** A., Hamelin P., Ferrier E. : Flexural Behaviour of Ultra High Performance Concrete reinforced with mixed short fibers and CFRP rebars, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 661-672;

**Singh** N.: Highly reactive  $\beta$ -Dicalcium silicate for ultra high performance concrete, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 105-116;



**Sorelli L.**, Constantinides G., Ulm F.-J., Toutlemonde F.: The nano-mechanical signature of Ultra High Performance Concrete by statistical nanoindentation techniques. *Cement and Concrete Research*, v.38, September **2008**, Pages: 1447-1456;

**Soutsos M.**, Millar S., Karaiskos K.: Mix Design, Mechanical Properties, and Impact Resistance of Reactive Powder Concrete (RPC). *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*, Honolulu, HI, May **2005**;

**Sritharan S.**, Bristow B., Perry V, Characterizing an Ultra-High Performance Material for bridge Applications under Extreme Loads, *Proceeding of the 3-rd International Symposium on High Performance Concrete*, Orlando, Florida, **2003**;

**Stark U.**, Mueller An: Optimization of packing density of aggregates. *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 121-127;

**Stengel T.**, Lin X., Schießl P., Gehlen C.: Tailor-Made Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete – Single Fiber Pull-Out, Bending Capacity and Fracture Toughness, *RILEM High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*, **2012**, Pages: 127-135;

**Tafraoui A.**, Escadeillas G., Lebailli S., Vidal T.: Metakaolin in the formulation of UHPC, *Construction and Building Materials*, v. 23, i. 2, February **2009**, Pages 669-674;

**Teichman T.**, Schmidt M.: Influence of the packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC, *Proceeding First International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 313-323;

**Terzijski I.**: Compatibility of Components of High and Ultra High Performance Concrete, *Proceeding First International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 175-186;

**Thienel K.**: Werkstoffe des Bauwesens Festbeton, *Institut für Werkstoffe des Bauwesens*, München, **2008**;

**Topçu İB.**, Karakurt C.:Reaktif pudra betonlari. *Turk Engineering News*, v.437 January **2005**, Pages: 25-30;

**Tuan N.**, Guang Ye., Klaas van Breugel, Copuroglu O.: Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice hush ash, *Cement and Concrete Research*, v.41, **2011**, Pages: 1104-1111;

**Tue N., Simsch G., Holger S., Detlef S.:** Bearing Capacity of Stub Columns made of NSC, HSC and UHPC confined by a Steel Tube, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 339-350;

**Ulm F.-J., Acker P.:** Nanoengineering UHPC Materials and Structures, *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 5-7, **2008**, Pages: 3-9;

**van Breugel K., Guang Y.:** Analysis of hydration processes and microstructural development of UHPC through numerical simulation, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 253-264;

**Vorg C., Hugo-Person T., Lagerblad B.:** Optimization of UHPC for selective stabilization of deep boreholes, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 769-781;

**Voo J., Foster S., Gilbert R., Gowripalan N.:** Design of Disturbed Regions in Reactive Powder Concrete Bridge Guilders, High Performance Materials in Bridges, *Proceedings of the International Conference, Kona, Hawaii*, July 29-August 3, **2001**;

**Voort. Th. L., Suleiman M. T., Sritharan S.:** Design and Performance Verification of Ultra-High Performance Concrete for Deep Foundations, *Final Report*, November **2008**;

**Wallevik O., Gjørsv O.:** Development of the Coaxial Cylinder Viscometer for Fresh Concrete, Properties of Fresh concrete, *Proceeding of the RILEM Colloquium*, Chapman & Hall, October **1990**, Pages: 213-224;

**Wallevik O., Wallevik JE.:** Rheology as a tool on concrete science: the use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*, v.41, i12, December **2011**, Pages: 1279-1288;

**Walraven J.C.:** From Design of Structures to Design of Materials. Innovations and Development in Concrete Materials and Construction: *Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee*, Scotland, UK, 9-11 September **2002**, Pages: 806-818;

**Way R., Wille K.:** Material Characterization of an Ultra High-Performance-Fiber Reinforced Concrete under Elevated Temperatures. *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel, March 7-9, **2012**, Germany, Pages: 565-571;

**Wille K., Dehn F.:** Micro analytical investigation on the effect of polypropylene fibers in the fire exposed high-performance concrete (HPC), *6-th International RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concretes*, **2004**. Pages: 659-668;

**Xincheng, Pu.:** *Super-High-Strength High Performance Concrete*, CRC Press, **2013**;

**Yang S.L., Millard S.G., Soutsos M. N., Barnett S. J., Le T. T.:** Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, November **2008**, Pages: 2291-2298;

**Yazini H. Yardimci M. Y., Aydin S., Karabulut A. Ş.:** Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials*, v. 23, i. 3, August **2008**, Pages 1223-1231;

**Yin, J., Zhou S., Xie Y., Chen, Y., Yan Q.:** Investigation on compounding and application of C80–C100 high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, Feb., v. 32, i.2, **2002**, Pages: 173-177.

**Yunsheng Z., Wei S., Sifeng L., Chujie J., Jianzhong L.:** Preparation of C200 green reactive power concrete and its static-dynamic behaviors, *Cement and Concrete Composites*, v. 30, June **2008**, Pages: 831-838;

**Zanni H., Cheyrezy M, Maret M., Philippot V., Nieto P. :** Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) Using <sup>29</sup>Si NMR. *Cement and Concrete Research*, v. 26, i.1, January **1996**, Pages: 93-100;

**Zenati A., Arroudj., Lanez M., Oudjit M. :** Influence of cementitious additions on rheological and mechanical properties of reactive power concretes, *Physical Procedia*, v.2, **2009**, Pages: 1255-1261;

**БДС EN 14651:2005+A1:2007:** Метод за изпитване на бетон, армиран с метални влакна. Определяне на якостта на опън при огъване (граница на пропорционалност (LOP), остатъчна);

**БДС EN 1992-1-1:2005/NA:2011: Еврокод 2:** Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради. Национално приложение;

**БДС EN 934-2:2009+A1:2012/NA:2013:** Химични добавки за бетон, разтвор и инжекционен разтвор. Част 2: Химични добавки за бетон. Определения, изисквания, съответствие, маркиране и етикетиране. Национално приложение (NA);

**БДС EN 12350-7:2009:** Изпитване на бетонна смес. Част 7: Определяне на съдържанието на

въздух. Методи с налягане;

**БДС EN 206-1:2002/NA:2008:** Бетон. Част 1: Спецификация, свойства, производство и съответствие. Национално приложение (НА) на БДС EN 206-1:2002;

**БДС EN 13263-1: 2005+A1:2009:** Микросилициев прах за бетон. Част 1: Определения, изисквания и критерии за съответствие;

**Гочев Г., Червенков С., Назърски Д., Данчев И., Крумов В., Захариева Б., Петров Б.,** Напрегнато и деформирано състояние на стоманобетонни елементи от високоякоостен бетон, натоварени на огъване, *Строителство*, № 8, **1989-1**, стр:15-20;

**Гочев Г., Червенков С., Назърски Д., Данчев И., Крумов В., Захариева Б., Петров Б.:** Високоякоостният бетон- една алтернатива за икономия на материали в строителството, *Научно техническа конференция "Нови строителни материали"*, 29 май- 2 юни, Варна, **1989-2**;

**Динев Д.:** Изследване на конструкции, работещи на огъване, усилен с композитни материали, *дисертация*, **2006**;

**Дойков, И.:** Подобряване на якоостните и деформативните свойства на циментови композити посредством модифицирането им с акрилатни вододиспергируеми полимери, *дисертация*, декември **2007**;

**Захариева-Георгиева Б.:** Гранична натискова деформация на високоякоостни бетони, *Пътища*, № 7, **1990-1**;

**Захариева-Георгиева Б., Гочев Г.:** Работна диаграма на високоякоостни бетони, *Пътища*, № 8, **1990-2**;

**Иванов Я., Стоянов В.:** Self-healing concretes, *Международна конференция ДСБ*, Варна, **2010**, стр: 22-32;

**Иванов Я., Стоянов В., Иванова М.:** Високотехнологични бетони, *XII Международна научна конференция ВСУ*, Юни, **2013**, том III стр: IV - 1-6;

**Иванова М., Миронава М.:** Анализ на изискванията за технологичност на цимнетсъдържащи бетони, *XIII Международна научна конференция ВСУ*, Юни, **2013**, том III стр: IV – 132-138;

**Лилков В., Величкова К., Колев К., Косто Н., Джабаров Н.:** Проект: „Изследване пуцолановата активност на минерална добавка „Пуцолит“ за смесени цименти“, дог. N 55-06 - НИС - МГУ.

Срок: I-XII. **1994** г.

**Назърски Д.**, Крумов В., Петров Б.: Високоякоостни бетони в промишленото строителство, *Трета научно техническа конференция с международно участие "Съвременни технологии в промишленото и енергино строителство"*, 10-11 май, София, **1988-1**;

**Назърски Д.**, Крумов В., Петров Б., Високоякоостни бетони в промишленото строителство, *Строителни конструкции и изделия*, №.5, **1988-2**;

**Назърски Д.**, Крумов В., Петров Б.: Технологични аспекти на високоякоостни бетони с подобрени хидрофизични свойства, *Пета национална школа с международно участие "Ефективни строителни технологии"*, 9-13 май, Приморско, **1989**;

**Найденев В.**, Ростовски И.: Дисперсно-армирани дребнозърнести бетони с повишена износоустойчивост, *XII Международна научна конференция ВСУ*, Юни, **2012**, том II стр: V –25-30;

**Найденев В.**, Ростовски И.: Дребнозърнести дисперсно-армирани бетони с висока износоустойчивост – структурни изследвания, *XIII Международна научна конференция ВСУ*, Юни, **2013**, том III стр: IV –72-77;

**Николов И.**, Колев К., Петров Б.: Връзка между марка и клас по якост на натиск на бетона, *Строителни материали*, № 6, **1989**, стр.19-23;

**Петров Б.**: Изменение на якостните и деформационни свойства на бетона при комбинирано въздействие на цикличното натисково натоварване и сулфатна агресивна среда, *дисертация*, София, **2005**;

**Ростовски И.**, **Найденев В.**: Конструирание и оразмеряване на дисперсно амирани плочи на земна основа, *Международна юбилейна научно-приложна конференция УАСГ*, ноември, **2012**, том.2, стр: 23-28;

**Симеонов Й.**, Даракчиев Б., Николов И.: *Строителни материали*, София, Техника, 1991;

[www.ductal-lafarge.com](http://www.ductal-lafarge.com) (последно посетено 31.01.2014)

[www.basf.bg](http://www.basf.bg) (последно посетено 31.01.2014)

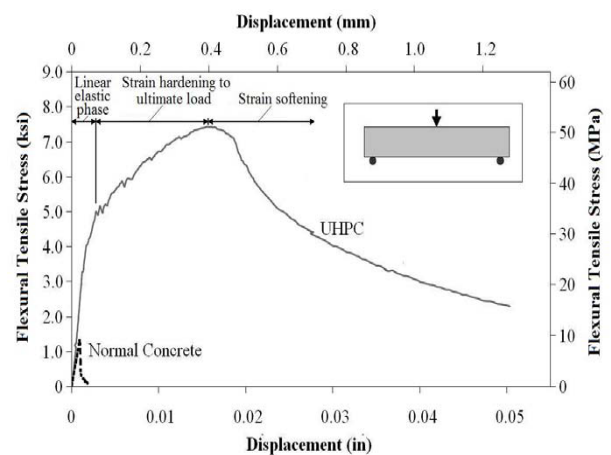
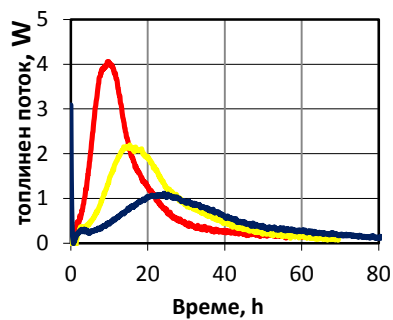
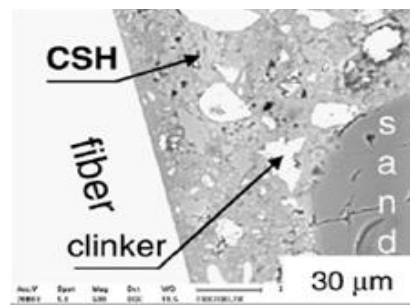
[http://www.inzynierbudownictwa.pl/technika,materialy\\_i\\_technologie,artykul,wspolczesne\\_fibroko\\_mpozyty\\_cementowe,2701](http://www.inzynierbudownictwa.pl/technika,materialy_i_technologie,artykul,wspolczesne_fibroko_mpozyty_cementowe,2701) (последно посетено 31.01.2014)

<http://rebar.ecn.purdue.edu/ect/images/civil/simcon1.jpg> (последно посетено 31.01.2014)

<http://www.scribd.com/doc/22018215/Fibre-Reinforced-Concrete> (последно посетено 31.01.2014)

## II ГЛАВА

### ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА





Целта на дисертационната работа е формулирана в резултат на извършен обширен анализ на литературните данни, свързани с темата на дисертацията и след оценка на актуалността на проблема и на възможността работата по него да доприне за развитието на строителното материалознание.

В резултат на направения литературен анализ, могат да бъдат обобщени накратко следните предизвикателства, свързани с изследването на механичните свойства на СВЯБ:

- 1) Няма единна методика за проектиране на състава на СВЯБ, а някои от традиционните подходи са неподходящи;
- 2) Структурата и свойствата на СВЯБ зависят силно от свойствата на изходните материали пропорциите и съвместимостта между тях;
- 3) Противоречиви са данните относно възможността да се използва ЕДМ за направата на СВЯБ;
- 4) Изборът на вида и количеството на химичните добавки трябва да е съобразен със спецификата на СВЯБ, за да се постигнат на желаните свойства на пресния бетон, без да се компрометира поведението и дълготрайността на втвърдения бетон;
- 5) Данните по отношение на екзотермията и реологията на СВЯБ са твърде ограничени;
- 6) Свойствата на СВЯБ се влияят от технологичните параметри (начин на изготвяне, условия на отлежаване и режими на топло-влажностна обработка) в по-голяма степен, отколкото обикновените бетони;
- 7) Процесите на хидратация и микроструктурата на СВЯБ се характеризират с редица особености в сравнение с обикновените бетони и имат определящо значение за неговите механични свойства;
- 8) Противоречиви са някои резултати относно влиянието на влакнестата армировка върху механичното поведение на СВЯБ;
- 9) Малобройни са изследванията, свързани с определяне на коефициента на Поасон на СВЯБ;
- 10) Някои методите за изпитване се нуждаят от адаптиране към особеностите на СВЯБ, а други са неприложими.

За постигането на поставената цел са формулирани конкретни задачи, въз основа на които са проведени изследванията в дисертационния труд.





## ЦЕЛ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

Целта на дисертационната работа е да бъдат разкрити определящите взаимовръзки между състава, структурата и свойствата на супервисокоякоостния бетон (СВЯБ) и да бъдат изследвани основните рецептурно-технологични параметри за модифициране на механичното му поведение при кратковременни статични и динамични натоварвания, с оглед създаване на научни и научно-приложни предпоставки за приложение на този иновативен материал в българската строителна практика.

## ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. Чрез прилагане система от предварителни изследвания, комплексен подход и математическа теория на планирания експеримент, да се създадат и оптимизират такива състави на матрицата на СВЯБ, които да осигуряват желани свойства на пресния и втвърдения бетон.
2. Да бъде изследвано влиянието на основни технологични параметри, свързани с изготвянето на СВЯБ, така че да се даде възможност, при минимален разход на ресурси, свойствата на пресния и втвърдения бетон да бъдат целенасочено управлявани.
3. Посредством подходящи макро- и микроструктурни изследвания да се характеризират кинетиката на хидратацията на СВЯБ, екзотермията, вида и количеството на хидратационните продукти, особеностите на поровото пространство и да се идентифицират начини за тяхното модифициране, водещо до постигане на определени механични свойства на СВЯБ.
4. Да се определят стойностите на основните якостно-деформационни характеристики, необходими за проектиране на конструктивни елементи от СВЯБ, като се оцени влиянието на меродавните фактори за изменението им във времето, с оглед прогнозиране на поведението на СВЯБ и изготвяне на препоръки за приложението му;
5. Посредством анализ и обработка на работните диаграми при огъване и оценка на издръжливостта на удар, да се открие спецификата на действие на влакнестата армировка в матрицата на СВЯБ, като за описание на поведението на композита да бъдат използвани интегрални характеристики на основата на енергия на разрушение.
6. Да се оцени пригодността към СВЯБ на някои от традиционните методи за охарактеризиране на циментови състави и да се предложат нови или адаптирани методи, позволяващи получаването на достоверна информация.



### III ГЛАВА

## МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА





## 1. Подход

Бетонът е най-използваният строителен материал на ХХ век, което води след себе си и наличието на множество методи за определяне на неговите свойства. Създаването на нови видове бетони много често изисква и създаването на нови, по-подходящи методи за характеризирането им, както и адаптирането на съществуващите такива.

Към тази група нови материали принадлежат и супервисокоякоостните бетони, тъй като те представляват специфични композити на циментова основа, различаващи се значително, като състав и свойства, от обикновения бетон, което в много случаи затруднява прилагането на стандартните методи за определяне поведението на прясната бетонна смес и на втвърдения бетон, а в други случаи – тези методи се оказват недостатъчни за открояване на особеностите на СВЯБ. От гледна точка структурата на СВЯБ, той е материал в който или изцяло липсва ЕДМ, или ЕДМ е от дребнозърнеста фракция, което позволява да се използват и модифицират някои стандартни методи за изпитване на разтвори. Все още няма въведени стандартни методи за изпитване на СВЯБ, но литературната справка показва, че новите теоретични положения изискват специални експериментални постановки. Както бе посочено в глава I, адаптирането на изследователските методи и създаването на нови е само по себе си отделно научно направление в областта на СВЯБ.

От друга страна, наличието на много фини фракции със силно развита специфична повърхност и ниските В/Ц поставят предизвикателства пред обработваемостта на смесите и начина за тяхното характеризиране. Част от класическите методи за определяне на обработваемостта, като слягането по конуса на Абрамс [БДС EN 12350-2], са напълно неприложими към СВЯБ. Използването на голямо количество суперпластифициращи добавки повишава тиксотропията на смесите и изисква използването на динамични въздействия, така че методите за определяне на обработваемостта трябва да ги имитират – стръскваща и вибро маса.

Към изследванията за създаване и характеризиране на СВЯБ в български условия е приложен системен подход - някои от рецептурно-технологичните параметри са определяни върху моделни (опростени) състави, а за други е използвана матрица с оптимизирана зърнометрия. На следващ етап системата е допълнително усложнена с използването на влакната армировка и е изследвано механичното поведение на няколко състава на СВЯБ. Използването на стоманени влакна в състава на СВЯБ налага прилагане на нови методи за определяне на дуктилния им капацитет. Допълнителното подобряване на огнеустойчивостта, пукнатинуостойчивостта и ограничаване на съсъхването се реализира чрез използване на полипропиленови влакна (фиг. III. 1). Микроструктурата на СВЯБ се модифицира допълнително в резултат на прилагането на топло-влажностна обработка (пропарване или автоклавиране).



фиг. III. 1: Системен подход при създаването и модифициране състава на СВЯБ

При всеки етап от изследванията са дискутирани методите на изследване и тяхната надеждност.

Съставът на СВЯБ е различен от този на обикновените бетони. Изследвани са взаимовръзките по веригата „състав – структура – свойства – приложение“, СВЯБ са изследвани както на макро-, така и на микро-ниво. Големите количества цимент, активна минерална добавка и фини фракции кварцов пясък служат не само за постигане на плътен скелет, но и за създаване на по-голямо количество хидратационни продукти, които да повишат механичните характеристики и дълготрайността на материала.

## 2. Предварителни изследвания

Изследванията върху СВЯБ започват с моделни състави, чиито параметри са избрани въз основа на литературни данни [Teichman, 2004; Geisenhanslüke, 2004; Park, 2008]. Тези предварителни изследвания имат за цел:

- да бъдат определени границите на водо-циментовото отношение (В/Ц), с оглед едновременното постигане на високи якости на бетона и добра обработваемост на сместа;
- да бъде избран вида на суперпластификатора и да се оптимизира неговото количество;
- да се установи влиянието на основните технологични параметри (последователност на смесване, време и скорост на забъркване, начини на уплътняване и др.) върху якостните характеристики;

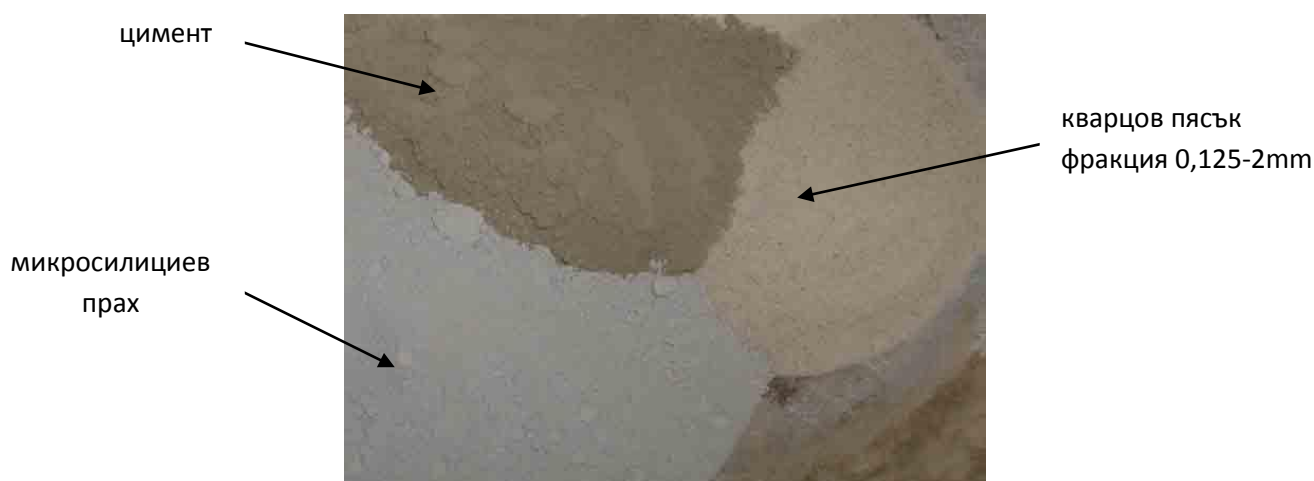
Моделните състави са изготвени с отношение на микросилициевия прах (МСП) към цимента равно на 1:5 и на цимента към пясъка равно на 1:1,4. Определящите критерии при избора на суперпластифицираща добавка (СП) са постигането и запазването на желаната обработваемост при зададени водо-циментни отношения, както и достигането до максимални якостните показатели.

В табл. III. 1 са представени количествено материалите, използвани за направата на първите лабораторни замеси на база моделни състави. Те съдържат само дребнозърнест добавъчен материал (кварцов пясък с максимална едрина на зърната 0,5 mm) и поради това за определяне на обработваемостта на бетонната смес са приложени методите за изпитване на строителни разтвори. Варирани са количеството на цимента, В/Ц отношение, видът и количеството на суперпластификатора. Оценен е техният ефект върху поведението на прясната бетонна смес и свойствата на втвърдения бетон.

табл. III. 1: Моделни състави

Материал	Граници/Отношения
Цимент	от 778 до 850 kg/m <sup>3</sup>
МСП:Цимент	1:5
Цимент:Пясък	1:1,4
СП:Цимент	1% до 2,5%

Сн. III. 1 показва нагледно материалите, които са използвани за забъркване на бетонната смес на моделния състав в лабораторен миксер.



сн. III. 1: Материали за изготвяне на лабораторен замес от СВЯБ

Въз основа на моделните състави първоначално са избрани подходящи суперпластифициращи добавки. Установено е, че на този етап, разстилането на сместа (снимка III. 2), по метода на стръскваща масичка [БДС EN 1015-3], е подходящ метод за оценка на обработваемостта. По-подробно методът е описан в гл. III т. 5.2. Сместа е изготвена в следната последователност: първо е извършено сухо смесване на компонентите на СВЯБ в продължение на две минути на бавна скорост, в следствие е добавена водата в рамките на една минута на бавна скорост и сместа е разбъркана до пълното ѝ хомогенизиране в продължение на още 2 минути на бърза скорост.

Първоначално е изследвано действието на пет вида суперпластифициращи добавки, на поликорбоксилатна основа, налични и често прилагани в строителната практика у нас – “ViscoCrete500” (Sika); “PC300” (Don Construction); “NRG1020” (MAPEI); “ЛСТ” (Полипласт);



“25C40” (Карбопласт). В тези състави количеството на цимента е  $778 \text{ kg/m}^3$ , В/Ц отношение е 0,33 и суперпластифициращата добавка 1% от масата на цимента.

След анализа на резултатите, В/Ц отношение е намалено до 0,22, като в същото време е увеличено количеството на цимента на  $850 \text{ kg/m}^3$ , при което вложената суперпластифицираща добавка е увеличена на 2,5% (табл. IV. 1). Тези промени са в съответствие с повечето литературни данни [Shah, 1998, 5; Bierwagen, 2005], но задачата в случая е да се провери доколко това са работещи състави при използването на конкретните материали. При този моделен състав е оценено действието на следните суперпластификатори: “PC280” (Don Construction), “Glenium 300; Glenium 440; Glenium 51” (BASF); “NRG 1020” (MAPEI) и “ViscoCrete-new” (Sika).

Наред с изследването на обработваемостта на моделните състави, е определяно и времето за запазване на консистенцията при употребата на два от суперпластификаторите, показали най-добър пластифициращ ефект *Glenium 440* и *Glenium 51*: през 15 минутни интервали смесите са поставяни на вибро-маса в продължение на 30 sec, след което е измервано разстилането им. Експериментът е реализиран до начало свързване на цимента (около 140 min).



сн. III. 2: Определяне на пластифициращия ефект от различни химически добавки

След измерване на разстилането, бетонната смес е положена в кофражни форми за греди 4/4/16 cm, като е уплътнена на стръскваща маса на два пласта, всеки подложен на 30 ударни стръсквания (съгласно БДС EN 196-1). Пробите престояват 24 часа във влажна камера, до декофрирането си на 1-ви ден (при температура и относителна влажност на въздуха

съответно от  $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$  и 95%), след което се поставят под вода, с поддържане на постоянна температура от  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ .

Изпитвания на механичните характеристики на пробните тела са направени последователно на 2, 7 и 28 ден, като първо е определена якостта на опън при огъване, а от половинките гредички е определена якостта на натиск (виж гл. IV. т. 2).

### **3. Характеризация на избраните материали**

Директното прилагането на чуждия опит при избора на подходящи материали за СВЯБ се оказва невъзможно, поради спецификата на всеки местен материал и взаимодействието му с останалите компоненти на сместа. Това налага да се направи задълбочено проучване на пазара на строителни материали в България, за да се идентифицират най-подходящите. Свойствата на изходните материали са определящи за структурирането на СВЯБ, поради което се направяват техните физични, химични и механични свойства.

Със серия от предварителни изпитвания, подобно представените в гл. IV. т. 2. е направен избор на основните материали за създаването на СВЯБ. За целта са изследвани различни видове високоякоостен цимент, активна минерална добавка - микросилициев прах, кварцов пясък с различна зърнометрия, кварцово брашно, получено в лабораторни условия чрез смилане в топкова мелница, суперластикатори на поликарбоксилатна основа, два вида вода – питейна и механично активирана, както и стоманени и полипропиленови фибри като дисперсна армировка.

#### **3.1 Цимент**

Характерно за направата на СВЯБ е влагането на големи количества цимент (между  $750$  и  $1000 \text{ kg/m}^3$ ) с висока активност. Поради това е важно използването на чист портландцимент от висок клас по якост на натиск. Следователно, като подходящ е идентифициран цимент СЕМ I 52,5 N по БДС EN 196-1.

В Университетската строително-изпитвателна лаборатория при УАСГ (УСИЛ) са определени техническите показатели от десет доставки цимент, произведен от три производители на цимент в България – Титан АД, Девня Цимент АД и Холсим България АД. След определянето на минералния състав в НИИСМ е установено, че част от доставените цименти не са от тип СЕМ I (доказано е наличие на добавки) и не отговарят на клас 52,5N. Вероятно последното се дължи както на минералния състав, така и на загубена активност в процеса на транспорт, доставка и съхранение.

Поради най-голяма надеждност и постоянство на свойствата, в изследванията е използван цимент СЕМ I 52,5N с производител Холсим България АД. Неговите физични и механични свойства са показани в табл. III. 2.

табл. III. 2: Физични свойства и механични характеристики на използвания цимент

Вид цимент	Бели Извор
Производител	Холсим
<b>Физични свойства</b>	
Обемна плътност ( $\rho_0$ ) /kg/m <sup>3</sup> /	1200
Специфична плътност ( $\rho_c$ ) /kg/m <sup>3</sup> /	3000
Специфична повърхнина /cm <sup>2</sup> /g/	3800
Стандартна консистенция	0,272
Начало свързване /min/	105
Край свързване /min/	310
Обемопостоянство /mm/	<1,0
<b>Механични характеристики</b>	
Якост на натиск-2-ри ден /MPa/	27,0
Якост на натиск -7-ми ден /MPa/	47,9
Якост на натиск -28-ми ден /MPa/	54,9

Якостните характеристики на 2, 7 и 28 ден и времето на свързване са контролирани за всяка доставка на цимента.

Поради непостоянните характеристики (физико-механични свойства и химичен състав) на предлаганите в България цименти, бяха проведени сравнителни изпитвания с френски цимент СЕМ 52,5 N на фирма *Lafarge*.

По своя минерален състав използваният френски цимент е също алитов ( $C_3S=60\%$ ), с нормално количество на  $C_3A$  от 8,5% и гипс от 5,5%. Количеството на основните оксиди -  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  и  $MgO$  на българския и на френския цимент са от един и същи порядък. Получените якостни характеристики на българския цимент са под 40% по-ниски в сравнение с цимента на *Lafarge*. Това се дължи до голяма степен заради силно развитата му специфична повърхност в съчетание с по-бързото набиране на якост на българския цимент, в сравнение с френския.

: Физични свойства и механични характеристики на използваните цименти

Вид на цимента	Специфична плътност, g/cm <sup>3</sup>	Специфична повърхност, cm <sup>2</sup> /g	Стандартна консистенция	Начало свързване, mins	Обемопостоянство, mm	Якост на натиск (MPa) на:		
						2 ден	7 ден	28 ден
Холсим	3,0	4100	0,290	110	<1	28,7	40,3	43,8
<i>Lafarge</i>	3,1	4200	0,302	160	<1	37,0	-	62,0

### 3.2 Микросилициев прах (МСП)

В СВЯБ се влага значително количество активна минерална добавка (АМД), като процент (от 10 до 30%) от вложеното количество цимент, което се равнява на количества от 150-250 kg/m<sup>3</sup>. Най-често използваните АМД за направата на СВЯБ са микросилициев прах, пепел от ТЕЦ, метакаолин, гранулирано доменна шлака и др [Aitcin, 1998].

Световният опит показва, че най-ефективната АМД за СВЯБ е микросилициевият прах (МСП). Както бе посочено в литературния обзор, влагането му в бетона води до уплътняване структурата на втвърдения бетон, посредством намаляване на обема и размера на порите, модифициране на хидратационните продукти и образуване на допълнителни калциеви хидросиликати [Richard & Cheyrezy, 1995; Yazini, 2008]. Това от своя страна директно рефлектира върху заздравяване на контактната зона между циментовия камък и добавъчните материали, от една страна, и между влакнестата армировка и матрицата от друга [Taфраoui, 2009]. Положителен е ефектът от влагането на МСП и върху прясната бетонна смес, поради перфектната сферична форма на частиците му, която води до повишена подвижност на сместа.

Други възможни АМД-и са метакаолинът и пепелта от филтрите на ТЕЦ-ете. Те често се използват като алтернатива на МСП, най-вече поради високата му цена и сравнително малките количества, в които се произвежда. Пепелите у нас обаче се характеризират с непостоянен състав и свойства, поради различните суровини, съдържат голямо количество неизгорели частици и сулфати, което ги прави неподходящи за влагане в СВЯБ. Използването на метакаолин в бетонопроизводството също няма големи традиции у нас. Поради това изследванията се насочиха единствено към влагане на МСП. Понастоящем у нас няма регулярно производството на МСП (основно преди произвеждан от металургичния завод в Кремиковци) и поради това е използван МСП производство на *Elkem Island*. Той съдържа над 94% чист SiO<sub>2</sub> и много малки количества други примеси – табл. III. 3.

табл. III. 3: Физични свойства, химичен състав и микроскопска снимка на използвания микросилициев прах по БДС EN 196-2:2005

Показатели	Микросилициев прах
<b>Физични свойства *</b>	
Специфична повърхност /m <sup>2</sup> /g/	15,96
<b>Химичен състав **</b>	
SiO <sub>2</sub> /%/	94,80
CaO /%/	Няма
SO <sub>3</sub> /%/	0,38
Na <sub>2</sub> O /%/	0,44
Хлориди /%/	0,07

\* Изпитана в Института по Електрохимия и Енергийни Системи „Акад. Евгени Будевски“, към БАН

\*\*Изпитан в Изпитвателна лаборатория „Соли, разтвори и дисперсии“ при ХТМУ

### 3.3 Пясък

Като дребен добавъчен материал в състава на СВЯБ най-често се използват кварцов и/или базалтов пясък. Пясъкът играе роля на ограничител на циментовата матрица, което води до увеличаване на якостните характеристики и намаляване на съсъхването.

Поради наличието на висококачествени кварцови пясъци в България и по-ниската им цена, те са избрани като основен материал в състава на СВЯБ. Табл. III. 4 представя използваните кварцови пясъци, добивани от „Каолин“ АД, с. Сеново, Русенско и закупени от „Кварцови пясъци“ АД, София.

С оглед постигане на максимална плътност на скелета на добавъчните материали (т.е. компактовка на зърната), са изследвани и използвани различни фракции кварцови пясъци (виж гл. IV. т. 3).

**табл. III. 4: Физически характеристики и химически състав на използваните кварцови пясъци (изпитвания съгласно методите, специфицирани в [БДС EN 12620:2013])**

Вид пясък	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Физични свойства</b>									
Обемна плътност ( $\rho_0$ ) /kg/m <sup>3</sup> /	1410	1510	1460	1490	1360	1470	1450	1370	1360
Специфична плътност ( $\rho_s$ ) /kg/m <sup>3</sup> /	2500	2670	2500	2500	2610	2660	2610	2560	2540
Отмиваеми примеси /%/	< 0,1								
Специфична повърхност по Blaine /cm <sup>2</sup> /g/	16,8	48,6	13,5	18,6	165	33,2	39,4	70,8	69,8
Преминало количество /4,0 mm/ /%/	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Преминало количество /2,0 mm/ /%/	40,0	98,5	48,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Преминало количество /1,0 mm/ /%/	1,5	26,5	6,5	11,8	100,0	93,8	98,9	100,0	100,0
Преминало количество /0,5 mm/ /%/	1,3	5,5	0,1	0,0	100,0	7,9	24,1	100,0	100,0
Преминало количество /0,25 mm/ /%/	1,0	5,0	0,0	0,0	97,9	0,4	0,0	9,3	6,8
Преминало количество /0,125 mm/ /%/	0,8	4,5	0,0	0,0	18,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Преминало количество /0,063 mm/ /%/	0,5	3,5	0,0	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Преминало количество /0,0 mm/ /%/	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Вид пясък	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Химичен състав (деклариран от Производителя)</b>									
SiO <sub>2</sub> /%/	99,30								
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%/	0,028-0,045								
CaO+MgO /%/	0,07-0,11								
Съдържание на глина /%/	0,19								

### 3.4 Кварцово брашно

С цел постигане на максимално плътна структура, влагането на кварцово брашно (средната едрина е между 5 и 10  $\mu\text{m}$ ) в състава на СВЯБ е наложително, тъй като то е необходимият компонент за ефективно попълване на празнините между циментовите частици. Въпреки че при нормални температури кварцовото брашно се явява инертен пълнител, при определени условия на третиране (пропарване, автоклавиране) на СВЯБ, то реагира с продуктите от хидратацията на цимента и МСП и води до образуване на вторични продукти на хидратация, което модифицира структурата на бетона (виж г. V т. 4.1). От друга страна, тъй като кварцовото брашно, за разлика от цимента, не влиза веднага във взаимодействие с водата, то обуславя подобрена подвижност на смесите и затова се прилага заместване на част от количеството на цимента с кварцово брашно.

Използваното кварцово брашно е смляно в УСИЛ до подходящата ситност. Зърнометричният състав (табл. III. 5) е определен с помощта на реометров анализ в Лабораторията по геофизика към УАСГ.

табл. III. 5: Ситов анализ на използваното кварцово брашно

Показатели	Кварцово брашно
Специфична плътност /kg/m <sup>3</sup> /	2680
Преминало количество през сито 0,250 mm /%/	100,0
Преминало количество през сито 0,125 mm /%/	100,0
Преминало количество през сито 0,063 mm /%/	94,0
Преминало количество през сито 0,010 mm /%/	62,0
Преминало количество през сито 0,005 mm /%/	38,0
Преминало количество през сито 0,001 mm /%/	0,0

### 3.5 Едър добавъчен материал (ЕДМ)

Едрият добавъчен материал (ЕДМ) е ключов за якостните свойства на обикновените бетони. За разлика от тях, при СВЯБ обикновеният ЕДМ се явява по-скоро като слабо звено, от една страна поради качеството на контактната зона между ЕДМ и циментовата матрица, а от друга, поради по-малкият модул на еластичност на ЕДМ в сравнение с този на матрицата (виж гл. I т.2.1.2). Затова най-често в рецептурните състави на СВЯБ, ЕДМ изцяло липсва [Graybeal, 2005]. Съществува, обаче, чисто икономически интерес от използването на ЕДМ, с оглед

поевтиняване на СВЯБ. Поради това, макар и с компромис по отношение на якостта, в СВЯБ е допустимо да се използва ЕДМ (предимно дребнозърнести фракции с максимален размер 8 мм) на базалтова и/или гранитна основа.

Поради тази причина, както и с оглед изследване на ефекта на ЕДМ върху СВЯБ, са изпитвани две фракции трахиандезити (4-8 mm и 8-11,5 mm) от каменна кариера „Еневи Могили“, община Тунджа, област Ямбол. (табл. III. 6).

**табл. III. 6: Физични и механични характеристики на използвания едър добавъчен материал**

Едър добавъчен материал	Фракция 4-8 mm	Фракция 8-11,5 mm
Обемна плътност ( $\rho_0$ ) /kg/m <sup>3</sup> /	1480	1480
Специфична плътност ( $\rho_c$ ) /kg/m <sup>3</sup> /	2540	2690
Отмиваеми примеси /%/	<1,0	<1,0
Водопопиваемост /%/	<1,0	<1,0
Плоски и игловидни зърна /%/	3,6	4,1
Преминало количество (8,0 mm) /%/	100,0	100,0
Преминало количество (5,6 mm) /%/	100,0	50,6
Преминало количество (4,0 mm) /%/	12,7	14,4
Преминало количество (2,0 mm) /%/	0,1	0,0
Дробимост /%/	4,0	3,8

### 3.6 Суперпластифицираща химическа добавка (СП)

СВЯБ е материал, който дължи усъвършенстването си благодарение на създаването на мощни суперпластификатори (СП), предимно на основата на поликарбоксилати [Frommenwiler, 1998]. Техният пластифициращ ефект се дължи на формирането на отблъскване между отделните циментовите частици. То се основава на електростатични сили на отблъскване, породени от негативния заряд на карбоксилните групи, както и на раздалечаване, дължащо се на дългите главни вериги на полимерите, които формират пространствени бариери пред флокулацията/агрегирането на циментовите частици.

След провеждане на предварителни изследвания за избор на суперпластификатор и анализ на получените резултати (виж г. IV. т. 2), е установено, че най-подходящият вид суперпластификатор при използването на описания горе цимент, е този с търговско наименование *Glenium 51* на фирма *BASF*, на поликарбоксилатна етерна основа. Основните му характеристики са показани в табл. III. 7.

**табл. III. 7: Характеристики на поликарбоксилатна химическа добавка *BASF Glenium 51***

Показатели	Glenium 51
Външен вид	Кафява течност
Специфична плътност /g/cm <sup>3</sup> /	1,08±0,02
pH	7,0±1
Алкален компонент /%/	≤5,0
Съдържание на хлориди /%/	≤0,1

На основата на алилефер, този суперпластификатор притежава изключително добър разпръскващ ефект при наличието на МСП, което го прави много ефективен при СВЯБ, който съдържа големи количество АМД. Подобрените физични свойства на бетона обуславят и увеличената му дълготрайност.

### 3.7 Вода

Предварителните изследвания, при които е използвана механично активирана вода [Бошнаков, 2011], не потвърждават очакванията за съществен принос върху якостите на СВЯБ и поради разсейване на резултатите не е възможно ефектът ѝ да се определи категорично.

По тази причина, за направата на СВЯБ е използвана питейна вода, отговаряща на БДС EN 1008:2003.

Необходимо е да се проведат допълнителни целенасочени експерименти за установяване влиянието на механично активираната, или третирана по друг начин, вода върху поведението на СВЯБ.

### 3.8 Дисперсна армировка

Дисперсната армировка е задължителен компонент за направата на СВЯБ, тъй като матрицата има много уплътнена структура, но е и много крехка - с цел да бъде подобро поведението на материала под въздействието на статични и динамични натоварвания, в състава на СВЯБ се включва и дисперсна армировка. По принцип за армирането на циментови композити се използват два вида влакна/фибри/нишки – високомодулни (стоманени, стъклени и въглеродни), главно за уякчаване и подобряване на поведението в стадия след пукнатинообразуване, и нискомодулни (полипропиленови и полиетиленови), за подобряване на други характеристики [Orgass, 2004].

В изследванията върху СВЯБ е предвидено да се използват два размера стоманени микро влакна, с различно съотношение L/D, и два размера полипропиленови влакна от типа „*fibrillated*” във вид на мрежа, с цел установяване на действието всеки вид влакна поотделно и на комбинациите от различните видове (хибридна армировка). Целенасочени изследвания за влиянието на вида, количеството и размера на влакната, с оглед постигане на определени якостни, деформационни и якостно-деформационни характеристики при СВЯБ, са подробно представени в гл. IV т.5.

#### 3.8.1 Стоманени влакна

Стоманените фибри служат за увеличаване на както на якостните свойства на бетона (якост на опън при огъване, якост на директен опън, якост на натиск), така и за подобряване на деформируемостта (дуктилността) на композита, което пък води до значително увеличаване на енергията на разрушение.

Поради опасност от поява на корозионни процеси при стоманените фибри (тъй като конструкциите от СВЯБ са тънкостенни и при дисперсноармиране не може да се осигури



бетонно покритие на всички влакна за пасивация на стоманата), са използвани влакна с антикорозионно покритие (медно), производство на *Ganzhou Daye Metallic Fibers Co., Ltd*, Китай.

Изследвано е влиянието на два вида стоманени фибри:

- Първи вид, наречени условно „дълги“ (със заводско означение WSF0213): с диаметър  $D=0.2\text{mm}\pm 0.02\text{mm}$ , дължина  $L=13\text{mm}\pm 1\text{mm}$  и отношение  $L/D=65$ .
- Втори вид, наречени условно „къси“ (със заводско означение WSF017506): с диаметър  $D=0.175\text{mm}\pm 0.02\text{mm}$ , дължина  $L=6\text{mm}\pm 1\text{mm}$  и отношение  $L/D=34$ .

Основните технически параметри на стоманените фибри са представени в табл. III. 8.

**табл. III. 8: Технически данни на използваните стоманени фибри (данни на Производителя)**

Показатели	Стоманени фибри с медно покритие
<b>Химичен състав</b>	
C /%/	0,69-0,75
Si /%/	0,15-0,30
P /%/	>0,03
S /%/	>0,03
Cu /%/	<0,05
Ni /%/	<0,05
Cr /%/	<0,05
Мед в покритието /%/	67,55±3
Тегло на покритието /g/kg/	3,5-4,5
<b>Физични и механични характеристики</b>	
Външен вид/форма	Гладки влакна
Специфична плътност /g/cm <sup>3</sup> /	9,8
Точка на топене /°C/	1470
Корозионна устойчивост	Неустойчиви на действието на натриев карбид, халоген, водороден перексид, азотен оксид, сярна киселина
Якост на опън /MPa/	>2500

### 3.8.2 Полипропиленови влакна

Полипропиленовите (ПП) фибри се влагат с основна цел подобряване поведението на СВЯБ при пожар, като също така намаляват пластичното съсъхване и микропукнатините при тежки натоварвания. Една от причините за положителното действие на ПП фибри е, че при изготвянето на бетона, част от водните молекули се разполагат върху повърхността на фибрите и така изпаряването на водата в ранните часове се намалява. Следователно, негативните

последници в следствие изпарение на част от направната вода като пластично съсъхване, отваряне на пукнатини и развитие на капилярна структура, се редуцират [Orgass, 2004].

Най-често използваните в света ПП фибри за направата на СВЯБ, са микрофибри от типа „fibrillated“ във вид на мрежа, с дължина между 12 и 20 mm [Graybeal, 2005]. Поради това са вложени два размера микро ПП фибри, с оглед изготвяне на състави с различен размер и количество влакна:

- С диаметър  $D=0.02\text{mm}\pm 0.015\text{mm}$ , дължина  $L=12\text{mm}\pm 1\text{mm}$  и отношение  $L/D=600$ , наречени условно „дълги“.
- С диаметър  $D=0.05\text{mm}\pm 0.015\text{mm}$ , дължина  $L=19\text{mm}\pm 1\text{mm}$  и отношение  $L/D=950$ , наречени условно „къси“.

В табл. III. 9 са представени основните им технически характеристики.

табл. III. 9: Технически данни на използваните полипропиленови фибри

Показатели	Полипропиленови фибри
Външен вид	във вид на мрежа
Суровина	полипропилен
Плътност /g/cm <sup>3</sup> /	0,91± 0,01
Точка на топене /°C/	160-170
Удължение /%/	15-20
Устойчивост на киселини и основи	Висока
Якост на опън /MPa/	> 400

#### 4. Планиране на експеримента

С оглед изследване на влиянието на няколко параметъра едновременно, при рационално използване на ресурсите, за оптимизиране на състава на матрицата на СВЯБ, е използвана математическата теория на планиране експеримента.

Планираният експеримент позволява с ограничен брой опити, по предварително избран план, да бъде определена математическа зависимост между изходната величина  $Y$  (наричана функция на отклик в статистиката) и няколко фактора, от които тя зависи [Симеонов, 1991]. С математическия модел могат да бъдат решени интерполационни задачи, да се даде прогноза за стойността на изходната величина за точки извън факторното пространство (екстраполационна задача) и заедно с това да се оцени точността на прогнозната стойност [Вознесенский, 1983].

Факторите, които оказват влияние, така наречените входни величини, могат да бъдат много на брой, като се означават поотделно с:

$$x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ \dots \ x_i \ \dots \ x_n,$$

където:

$x_1$  е първият фактор;

$x_i$  е поредният фактор;

$x_n$  е броят на всички фактори;

Всеки от посочените фактори се изменя в дадени граници на вариране от  $\overline{x_{i_{min}}}$  до  $\overline{x_{i_{max}}}$ , където:

$\overline{x_{i_{min}}}$  е минималната стойност на  $i$  – тият фактор в натурален вид;

$\overline{x_{i_{max}}}$  е максималната стойност на  $i$  – тият фактор в натурален вид.

Центърът на интервала на вариране на всеки фактор в натурален вид е:

$$\overline{\Delta x_i} = \frac{|\overline{x_{i_{max}}} - \overline{x_{i_{min}}}|}{2}$$

В строителното материалознание, когато се изследва влиянието на 3 фактора и влиянието на всеки фактор може да се опише с квадратна парабола, т.е. най-малко по 3 точки, което предполага 3 нива на факторите (минимално, средно и максимално), изходната величина много често се описва с полиномен математически модел от втора степен, представен с уравнението:

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^3 (B_i \cdot X_i) + \sum_{i=1}^3 (B_{ii} \cdot X_i^2) + \sum_{i < j}^3 (B_{ij} \cdot X_i \cdot X_j)$$

където  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  са контролираните променливи (фактори), а за намиране на коефициентите на регресия  $B_0$ ,  $B_i$ ,  $B_{ii}$  и  $B_{ij}$  се прилага план **B3** (план на Бокс – Бенкин), състоящ се от 13 опитни точки. Планът **B3** е близък до **D**-оптималните планове (при които се минимизира детерминантата на ковариационната матрица), осигуряващи висока точност на оценката на регресионните коефициенти и даващи възможност за тяхното независимо изчисляване.

Въз основа на литературния обзор и резултатите от предварителните изпитвания, при прилагането на математическата теория на планирания експеримент са подбрани следните фактори:

Фактор **X1**: Максимален диаметър на използваното зърно (**D<sub>max</sub>**);

Фактор **X2**: Водо-циментното отношение (**В/Ц**);

Фактор **X3**: Количество суперпластификатор в процент от масата на цимента (**СП**);

Факторите и техните граници на вариация са избрани от следните съображения:

- Максимален диаметър на използваното зърно (**D<sub>max</sub>**)

Той има много голям ефект не само върху механичните свойства на СВЯБ, но и върху подбора на останалите зърнести компоненти, за да бъде описана референтната зърнометрична крива по модела на *Modified Andreassen* (виж г. IV. т. 3.2). За да бъде оценен този ефект, са избрани минимална стойност  $D_{max}=0,5$  mm, максимална стойност  $D_{max}=8$  mm и съответно средна стойност  $D_{max}=2$  mm, т.е. имаме състави без ЕДМ и такива с ЕДМ. Въз основа на  $D_{max}$  при проектиране на зърнометричните криви, са изчислени количествата на другите зърнести материали, т.е.  $D_{max}$  представлява скрит параметър, от който зависи количеството на цимента

(при  $D_{max}=0,5$  mm - 930 kg;  $D_{max}=2$  mm - 830 kg и  $D_{max}=8$  mm - 730 kg) от вложените материали за всеки състав в плана на експеримента.

- Водо-циментно отношение (В/Ц)

Долната граница на водо-циментното отношение ( $V/C=0,2$ ) е подбрана от технологична гледна точка, с оглед на това да бъде възможно хомогенизирането и уплътняването на сместа. Според направените предварителни експерименти, В/Ц по-малко от 0,20 води до земновлажна смес, с невъзможност да се хомогенизира (при наличното оборудване) и да се положи в кофражните форми. Изборът на сравнително ниска стойност на В/Ц като горна граница ( $V/C=0,24$ ) е продиктуван от стремежа да се намали негативното влияние на увеличеното В/Ц върху якостните характеристики.

- Количество на суперпластифициращата добавка

Количеството суперпластификатор (СП) е избрано с оглед да бъде осигурена задоволителна обработваемост на сместа. Минималното му количество е 3 % от масата на цимента, а максималното - 4 %. Тези стойности са значително по-високи от обичайно използваните при обикновените бетони, но се налагат поради силно развитата специфична повърхност на СВЯБ (особено при използването на кварцово брашно), с което част от добавката бива блокирана и не въздейства върху цимента, което бе потвърдено и в предварителните изследвания (виж т. IV г. 3).

За удобство, стойностите на всеки един от факторите, са преобразувани от натурален в кодиран вид (табл. III. 10).

табл. III. 10: Фактори на планирания експеримент в кодиран вид

№	Фактор	Мярка	Стойности на факторите в кодиран и натурален вид					
			Долна граница		Средна граница		Горна граница	
			Натурален вид	Кодиран вид	Натурален вид	Кодиран вид	Натурален вид	Кодиран вид
1.	$D_{max}$	mm	0,50	-1	2,00	0	8,00	+1
2.	В/Ц	-	0,20	-1	0,22	0	0,24	+1
3.	СП	%	3,00	-1	3,50	0	4,00	+1

Табл. III. 11 показва плана на Бокс-Бенкин при избран три факторен модел, с една централна точка.

табл. III. 11: Стойности на приетите фактори в определените опитни точки

№ на опита	План на експеримента		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
	Dmax	В/Ц	СП
1.	+1	+1	0
2.	+1	-1	0
3.	-1	+1	0
4.	-1	-1	0
5.	+1	0	+1
6.	+1	0	-1
7.	-1	0	+1
8.	-1	0	-1
9.	0	+1	+1
10.	0	+1	-1
11.	0	-1	+1
12.	0	-1	-1
13.	0	0	0

Във всяка точка от плана са проведени серия от  $n$  дублиращи се опити, с по едно измерване. Като основна функция на отклик, спрямо която е оптимизиран състава на матрицата на СВЯБ, е избрана якостта на натиск на бетона на 28-дневна възраст. След изпитване на 28-дневна възраст на пробните тела от Плана на експеримента, е извършена предварителна обработка на експерименталните данни (проверки за груби грешки и за еднородност на дисперсиите) и са изчислени коефициентите на регресионния модел, като е получена полиномиална зависимост за якостта на бетона на 28-ми ден от изследваните фактори.

Направена е проверка за значимост на коефициентите на регресия и за адекватността на модела, посредством сравняване на средното отклонение на теоретичните ( $f_{c,28 calc.}$ ) от експерименталните ( $f_{c,28 exp.}$ ) стойности, което не бива да надвишава 10%, а максималното отклонение не бива да надвишава 20%.

Анализът на влиянието на отделните фактори върху якостта на СВЯБ е извършен на базата на квази-еднофакторни модели за якостта на бетона на 28-дневна възраст.

За по-пълното изследване на влиянието на факторите, като спомагателни са построени и полиномиалните модели на якостта в ранна възраст (2-ри и 7-ми ден), якостта в по-късна възраст (3-ти и 12-ти месец) и на модула на еластичност на 28-ми ден.

## 5. Изследвания върху пресния бетон

### 5.1 Приготвяне на бетонната смес

Изполвани са два миксера с различна вместимост – от 4л (в УСИЛ) и от 20 литра (в Лабораторията по геоматериали на Университета Артоа, Франция - ЛГУА). Поради различната мощност на двата уреда е приложена и различна технология на забъркване на сместа, по отношение на продължителността на забъркване при дадена скорост.



сн. III. 3: Миксери за приготвяне на бетонна смес: а)4л; б)20л

На сн. III. 3-а е показан използваният 4 литров миксер. Максималната вместимост на прясна бетонна смес в него е 0,75 литра. Първоначално е извършено сухо разбъркване на компонентите в продължение на една минута, при планетарна скорост на въртене на перката от 140 оборота. Следва добавяне на водата в рамките на още една минута при същата скорост (предварително във водата е прибавено цялото количество суперпластификатор). В последствие скоростта е увеличена до максималната от 280 оборота, като времето необходимо за разбъркване се определя от момента на „протичане“ на сместа. След този момент сместа от земновлажна се превръща в пластична. Според различните състави, времето за това варира между 1 и 10 минути. След получаване на напълно хомогенна смес, при използване на влакнеста армировка тя се добавя и разбърква за още 2 минути на бърза скорост. Приготвянето на сместа завършва с допълнителни две минути при 280 оборота.

На сн. III. 3-б е показан използваният 20 литров миксер, с максимална вместимост на прясна бетонна смес от 6 литра. Последователността на действие при изготвяне на сместа не се различава значително от тази на 3 литровия уред. Поради по-големия обем обаче е необходимо по-дълго сухо забъркване на сместа (2 минути), последвано от още 2 минути за добавяне на водата. Това се извършва при най-бавната планетарна скорост на уреда, която е 180 оборота. Следват 7 минути при скорост от 275 оборота и увеличаване на скоростта до максималната възможната от 520 оборота до момента на „протичане“. След пълното

хомогенизиране на сместа уреда се остава да работи още 2 минути при 520 оборота. При наличие на влакна в състава процедурата по добавянето им съвпада с тази при малкия миксер.

Изследвано е влиянието на различните технологични параметри на приготвяне на смесите върху свойствата на бетонната смес и втвърдилият СВЯБ.

## 5.2 Обработваемост

### 5.2.1 Определяне на консистенцията чрез стръскваща масичка по [БДС EN 1015-3:2001/A2:2008]

Използването на стандартен метод, за определяне на консистенцията на прясната бетонна смес чрез стръскваща масичка за разтвори, е породено от спецификата на зърнометрията на СВЯБ, която е по-близка до разтворите отколкото до бетоните.

Приготвеният замес се полага на два пласта в конична форма, всеки пласт от който се уплътнява с минимум 10 удара, с помощта на трамбовка. С въртеливи движения формата се отстранява и сместа, разположена в средата на уреда, като се стръсква 15 последователни пъти. С помощта на шублер се измерват два взаимно перпендикулярни диаметъра от разлятата смес, като се определя средноаритметичната им стойност.



сн. III. 4: Стръскваща маса, за определяне на обработваемостта на бетонната смес

В табл. III. 12 са представени стандартните класове по които се разделят смесите според метода на стръскващата масичка.

табл. III. 12: Класове по разстилане според метода на стръскваща масичка

Консистенция на разтвора чрез стръскваща масичка	Разстилане на стръскваща масичка, mm
Гъст разтвор	100 - 140
Пластичен разтвор	140 - 200
Течен разтвор	≥ 200

### 5.2.2 Определяне на консистенцията чрез уреда на Vebe по [БДС EN 12350-3:2009]

Стандартизираният метод Vebe е подходящ начин за измерване на обработваемостта при СВЯБ, тъй като моделира и усилията, необходими за уплътняване на бетонната смес в кофражните форми с помощта на вибратори.

Обработваемостта, измерена с уреда на Vebe се изразява с времето, което е необходимо на бетонната смес, положена с помощта на пресечен конус да се хоризонтира в цилиндричен съд и да осъществи плътен контакт с плексигласовата плочка, следваща движението на сместа, подложена на вибрационно въздействие. Колкото по-кратко е това време, толкова по-обработваема е сместа.



сн. III. 5: Уред на Vebe, за определяне на обработваемостта на бетонната смес

Според това време, бетоните се разделят на 5 класа по обработваемост от V0 до V4 (табл. III. 13).

табл. III. 13: Класове по разстилане според уреда на Vebe

Клас по Vebe	Време по Vebe, sec
V0	≥31
V1	30 до 21
V2	20 до 11
V3	10 до 6
V4	5 до 3

### 5.3 Съдържание на въздух

Приложен е методът, даден в [БДС EN 12350-7:2009], но е използва по-малък обем на съда (0,75 l) тъй като сместа на СВЯБ е дребнозърнеста.

Бетонната смес от СВЯБ се полага в съда на 3 пласта, като стремежът е да се запази съдържащият се в нея въздух, без да се въвлеча допълнително количество. През винтил в съда се впръсква вода, която да запълни въздушното пространство над сместа (докато започне да излиза от другата му страна през друг отвор). С напompване се създава определено налягане, което се следи по манометър, при което въздухът в бетонната смес се свива (водата се приема за несвиваема течност). В последствие се отпуска главният винтил и се възстановява атмосферното налягане. По скалата на уреда се отчита директно стойност, която показва процентното съдържание на въздух в прясната бетонна смес.



сн. III. 6: Уред за определяне съдържанието на въздух



#### 5.4 Време за структуриране на сместа

Тъй като при СВЯБ времето на свързване се определя не само от цимента, но и от взаимодействието между компонентите на сместа, е приложен метод, при който времето на свързване се определя върху разтвор [БДС EN 480-2:2006], а не върху циментова паста.

От гледна точка промяната в структурата на циментовата паста, по-коректна формулировка е време на структуриране. При СВЯБ то е определено посредством уреда на *Vicat*, подобно на това при циментовите паста. Изпитването се отличава по допълнителната тежест, която се поставя върху уреда. Тя увеличава масата на падащата игла, като сумарната тежест, която прониква в сместа е равна на  $(1000 \pm 2)$  g. Изготвеният замес от СВЯБ се поставя във форма от пресечен конус. Измерванията се извършват във въздушно-суха среда (температура 20°C и относителна влажност от порядъка на 65%). Измерва се времето от началото на смесване на компонентите на сместа с водата, до момента в който иглата на уреда потъва на разстояние  $4 \pm 1$  mm, измерено от дъното на съда. Използван е електронен уред на *Vicat* в ЛГУА, Франция.



сн. III. 7: Електронен уред на Вика за определяне начало свързване на разтвори

#### 5.5 Калориметрия

Особеностите на състава на СВЯБ предполагат, че процесите на хидратация се различават съществено от тези при обикновените бетони - от една страна СВЯБ имат голям екзотермичен потенциал, поради наличието на голямо количество свързващо вещество, а от друга - водата е малко и това не позволява пълна хидратация. Използването на голямо количество суперпластификатор допълнително усложнява системата. По тази причина калориметричните измервания представляват особен интерес, тъй като те позволяват да се проследи процеса на хидратация в ранна възраст.

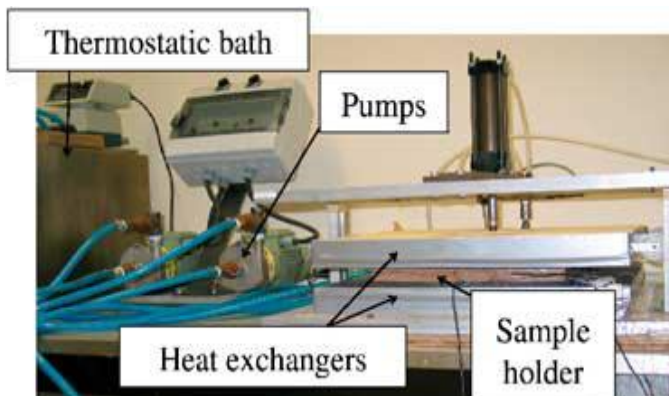
Уредът, създаден и калибриран в ЛГУА – Франция, дава възможност изотермичната калориметрия да бъде приложена за изследване на бетони (а не само на циментови паста), тъй като масата на образеца е от порядъка на 3 kg. При това, предимството на изотермичната калориметрия пред полу-адиабатната (която традиционно се използва за изследване на екзотермията на цимента) е, че тя е по-



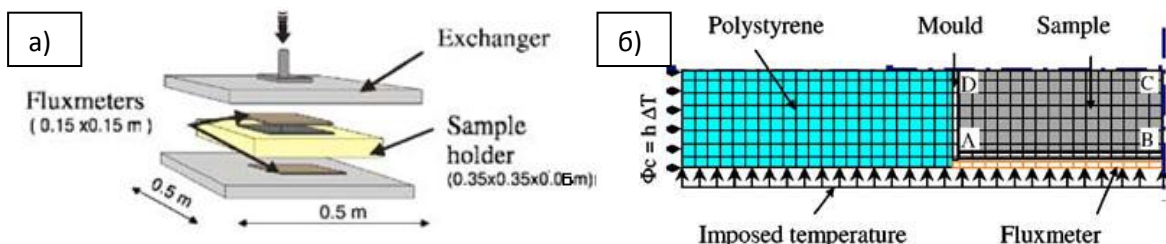
точна, когато става дума за количествени данни, тъй като се мерят директно характеристиките на топлинния поток, а не температурата, с което се минимизира влиянието на масата на образеца и на изолацията му от околната среда [ www.cptechcenter.org].

Принципът на измерванията се състои в това, че в условията на постоянна (зададена) температура, осигурена с топлинна изолация от полистирен от страни и с топлообменници горе и долу, се измерва конвекционният топлинен

поток от бетонната проба нагоре и надолу посредством сензори за топлинния поток, наречени флуксметри (*fluxmeter*) - фиг. III. 2а и 2б. Параметрите (термично съпротивление, дебелина и др.) на флуксметрите са така подбрани, че да осигурят нужната прецизност на измерванията. Постоянството на температурата се следи в средата и по двете повърхности на бетонния образец с термодвойки тип "Т" [Wirquin, 2008].



сн. III. 8: Експериментална постановка за определяне на хидратационните процеси в ранна възраст на бетон, чрез пробни тела с размери 15/15/6 cm [Wirquin, 2008]



фиг. III. 2а и 2б: Принципна схема на използвания калориметър [Wirquin, 2008]

Топлинният поток е сума от измерваните топлинни потоци през горната и долната повърхности на образеца. За да бъде определено количеството топлина, отделяна от един грам свързващо вещество, общото изчилено количество топлина се разделя на масата на свързващо вещество в изпитвания образец. Възприето е, по подобие на концепцията за еквивалентно свързващо вещество (съгласно БДС EN 206-1), само 11% от масата на МСП да бъде включена в общата маса на свързващото вещество. За да бъде оценено влиянието на температурата на околната среда върху кинетиката на хидратацията, са избрани 3 изотермични режима: при +10°C, +20°C и +30°C. Още преди изготвянето на пробите, материалите са темперирани в климатизирано помещение при съответните условия, а забъркването на смесите става в същото помещение.

## 6. Изготвяне, отлежаване и третиране на пробни тела

### 6.1 Пробни тела

Изготвянето на пробните тела е извършено съгласно [БДС EN 12390-1:2012]. За различните изпитвания са използвани следните пробни тела: греди с размери 4/4/16 cm и кубчета с ръб 4/4/4 cm, 5/5/5 cm и 7/7/7 cm. Непосредствено след приготвянето, бетонната

смес е поставена в кофражните форми, чиято повърхност предварително е намазана с кофражно масло. Нанасянето се осъществява на два пласта, като всеки един от тях е с дебелина от 2-2,5 см. Уплътняването се извършва последователно с 2x30 удара, на всеки пласт, на специализирана машина за уплътняване на пробни тела. При излизане на въздушни мехури по повърхността на пробното тяло уплътняването се продължава, с цикли от по 30 стръсквания, до тяхното отстраняване. В следствие се отстранява излишното количество бетон, което надвишава размерите на кофражната форма и повърхността се заглажда. Поставя се етикет върху всяко едно пробно тяло, даващ информация за състава, начина на отлежаване и датата му на изготвяне. Спазени са изискванията за подготовка и запълване на кофражните форми, съгласно [БДС EN 12390-1:2009]. След изготвяне, пробните тела отлежават във влажна камера до момента на декофриране. Допълнително са взети мерки срещу изпаряване на вода в ранна възраст.

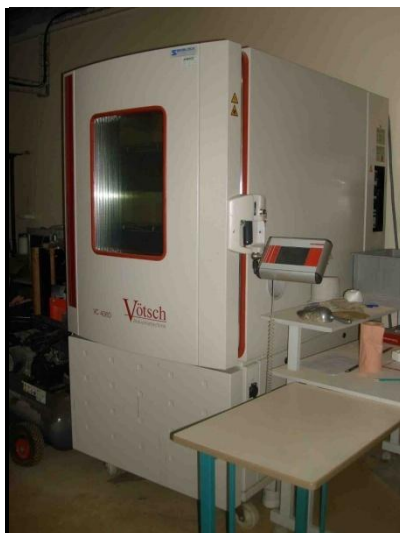
## 6.2 Режими на отлежаване на пробни тела

### 6.2.1 Суха среда

За изследване на влиянието на температурата на околната среда върху процесите на съсъхване, кинетиката на хидратация и отражението им върху якостните свойства на СВЯБ, част от пробните тела са изготвени и отлежават в суха среда при температури съответно 10<sup>0</sup>С, 20<sup>0</sup>С и 30<sup>0</sup>С и относителната влажност на въздуха около (50±2)%. За целта са използвани три климатични камери на ЛГУА, Франция. След забъркване на всяка една смес е измерена температурата ѝ с цел да бъде проследено изменението ѝ спрямо температурата на околната среда и да се оцени ефекта на времето за приготвяне.



сн. III. 9: Камера за отлежаване при 10<sup>0</sup>С



сн. III. 10: Камера за отлежаване при 20<sup>0</sup>С



сн. III. 11: Камера за отлежаване при 30<sup>0</sup>С

### 6.2.2 Въздушно-суха среда

След декофрирането на пробните тела на възраст 1 ден, те отлежават при температура на околната среда от (20±5)<sup>0</sup>С и относителна влажност на въздуха (65±10)% до момента на изпитване.

### 6.2.3 Влажна среда

За отлежаване на пробни тела във влажни условия е приложен стандарт [БДС EN 12390-2: 2009] за стандартни условия на отлежаване за бетон клас „С“. След декофрирането на пробните тела на възраст 1 ден, те престояват във влажни условия, при температура на околната среда от  $(20\pm 5)^\circ\text{C}$  и относителна влажност на въздуха минимум 95%, до момента на изпитване.

### 6.2.4 Под вода

За отлежаване на пробни тела под вода е приложен стандарт [БДС EN 12390-2:2009], при стандартна процедура на отлежаване на пробните тела от клас „С“. След декофрирането на 1 ден, пробните тела са поставени изцяло под вода с постоянна температура  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ , до момента на изпитването им, като водният стълб не превишава 2 cm. Така отлежалите образци служат за контролни, за оценка на влиянието на условията на отлежаване върху якостните и деформационните характеристики на материала.

## 6.3 Топло-влажностна обработка

Прилагането на топло-влажностна обработка е основен елемент, който отличава СВЯБ от бетоните с високи якости. По този начин не просто се ускоряват процесите на хидратация, но и се стимулира образуването на допълнителни хидратационни продукти, в резултат на пуцоланови реакции, които водят до промяна на механичните характеристики на СВЯБ.

Избраните параметри на третиране на СВЯБ, като продължителност на въздействието, температура и налягане на средата са въз основа на литературни данни [Yazini, 2008; Tafraoui, 2009]. Реализираните топло-влажностни режими при СВЯБ са по-скоро моделни изследвания, а не отразяват непременно производствени условия за елементи от СВЯБ.

### 6.3.1 Пропарване

Методът представлява прилагане на топла пара, от изпарението на кипяща вода, в затворен съд, в който образците са третирани в продължение на 48 часа при температура от  $(95\pm 5)^\circ\text{C}$ . Пробите са разположени върху мрежа, над скара с цел пълен контакт на повърхността им с образувалата се пара. След третирането те престояват при влажни условия на отлежаване до момента на изпитването им.



сн. III. 12: Пробни тела гредички 4/4/16 cm, подложени на пропарване в продължение на 48 часа

### 6.3.2 Автоклавиране

Използвани са два уреда за автоклавиране - заводски автоклав на фирма Xella Bulgaria (сн. 13-а), който поддържа постоянно налягане от 2,0 МПа и температура от 110 °С и лабораторен автоклав (сн. III. 13-б), при температура около 100±5°С и налягане около 1300



сн. III. 13: Пробни тела 4/4/16 см, подложени на автоклавна обработка в а) заводски условия; б) лабораторен автоклав

Продължителността на обработката е осем часа. След приключване на обработката образците престояват във влажна среда до момента на изпитването им.

## 7. Микроструктурни изследвания

Изследванията имат за цел да се характеризира микроструктурата на СВЯБ, по отношение на образувалите се хидратационни продукти, количество на свободната и химически свързаната вода, количество и разпределение на порите по размери и др.

Използваните образци са на различна възраст (от 3-ти ден до 3 месеца), с цел да се проследи промяната на микроструктурата във времето. Образците са взети от средата на пробните тела, с цел да бъде избегнато влиянието на кофражните форми и контакта с околната среда.

### 7.1 Диференциално термичен Анализ (ДТА)

ДТА е метод, който се основава на изучаването на топлинните ефекти, които протичат в резултат на химически реакции и/или фазови превръщания при изотермична или неоиотермична обработка.

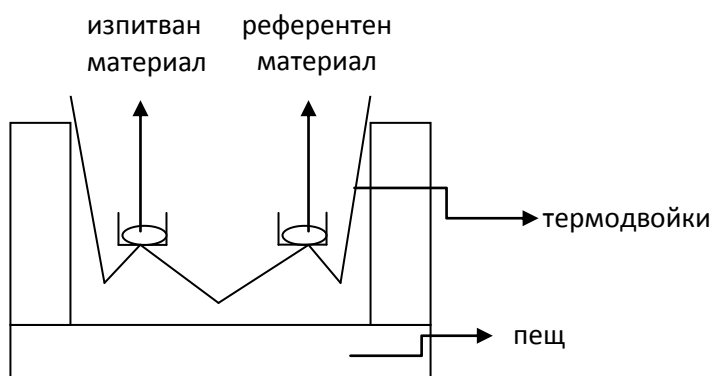
Изследванията са проведени в Института по физикохимия „Акад. Р. Каишев“ към БАН. Използван е апарат „PerkinElmer-Diamond“. Температурният интервал, при който са проведени изследванията, е 50-1000°C. Скоростта на нагряване е 10°C/min. Използваните пробни тела са с тегло от 30-40 милиграма.



сн. III. 14: Уред за измерване на ДТА и ТГА

Принципът на действие на уреда се базира на едновременно нагряване на пробното тяло от СВЯБ и референтен образец от термоинертно вещество (материал, който не променят своето физическото си състояние при нагряване). Най-често се избират материали като двуалуминиев триоксид и силициев карбид. Двата образца – изпитваният и референтният, са поставени върху държачи, разположени във високо-термична камера (фиг. III. 3). Под всеки един от тях е поставена термодвойка, която отчита разликата в температурата между тях.

Двата образца се нагряват постепенно при контролирани условия. При промяната на физическото състояние или при възникване на химична реакция температурата на изследвания образец се изменя, в сравнение с референтния образец, което е в резултат на промяна в енталпията (топлосъдържанието) в образца.



фиг. III. 3: Принципна схема на използвания уред [www.pysicalchemistryresources.com]

Промените, които протичат в изпитвания образец се отчитат от получената диаграма, която показва текущата разлика между температурата на СВЯБ и термоинертното вещество, при нагряване. Методът дава възможност за определяне на температурните и фазовите превръщания, вида на химичните промени в състава, фазови изменения, да се прави

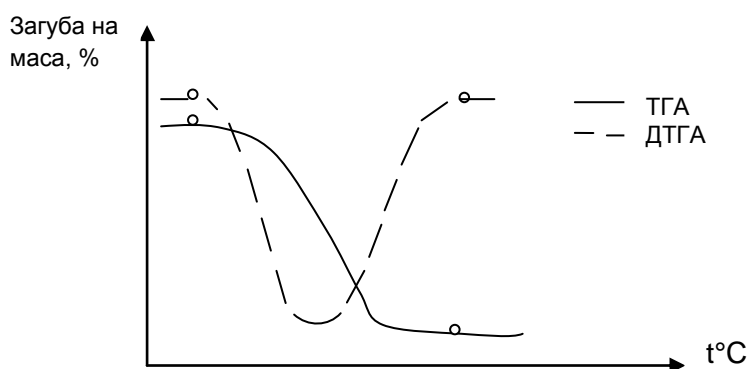
сравнение между различни състави на СВЯБ, както и да се оцени влиянието на топло-влажностните обработки при изготвянето му.

## 7.2 Термогравиметричен анализ/ Диференциален термогравиметричен анализ (ТГА/ДТГА)

Термогравиметричният анализ (ТГА) измерва количеството и степента на загуба на маса на материала, във функция на температурата, при контролирани условия. Този метод служи основно за определяне на съставните елементи на материала. Методът е подходящ за материали, при които се наблюдава загуба и нарастване на масата, в следствие на разтапяне, окисляване или дехидратация, т.е. подходящ е за изследване на СВЯБ.

Образецът се поставя върху държач, който е част от прецизна везна (до 0,00001g). Едновременно с държача се поставят във високо термична камера, с цел нагряване и последваща охлаждане (фиг. III. 3). Записва се електронно всяко едно изменение на масата на образеца. Изпитването на ТГА се извършва едновременно с това на ДТА анализа.

Всяко едно вертикално отместване на диаграмата (фиг. III. 4) показва загуба на маса при определена температура на нагряване. За по-прецизно и отчетливо определяне на началната и крайната стойност на загубата на масата на образеца се изчислява първата производна на ТГА, което показва Диференциалният термогравиметричен Анализ (ДТГА). ДТГА изразява интензивността на изменение на масата, чрез пикове в диаграмата. Чрез нея се дефинират точките, с най-голяма степен на промяна на масата, представена като инфлексна точка на кривата на ТГА, наложени върху кривата на ДТГА (фиг. III. 4). Едновременното налагане на двете криви – ТГА и ДТГА, дава възможност за по-точно определяне на началната и крайна точка при изчисляване на загубата на маса.



фиг. III. 4: Загуба на маса при нагряване, представена чрез диаграмите на ТГА и ДТГА

## 7.3 Порьозиметрия

Живачна порьозиметрия е метод, който се прилага за определяне на общия обем на порите в материала, като едновременно с това дава и представа за разпределението им по размери.

Методът дава възможност за измерване само на проводящите и отворени пори. Затворените пори остават незапълнени с живак и техният брой, количество и разположение в общия обем остава неизяснен.

Друг традиционно алтернативен метод е чрез адсорбция на азот, но при него не е възможно да се наблюдава промяна в структурата на абсорбента в процеса на изследване [Кирилова, 2013]. Пощвременен метод се явява използването на галий (Ga), който притежава свойството да се превръща с твърдо тяло при температура от 29,8°C. Разпределението на галия се проследява чрез електронен микроанализ (ЕРМА), като се определят формата и разпределението на порите [Тапака, 2002].



сн. III. 15: Уред за определяне на живачна порьозиметрия

Въпреки прилагането на различни методи за изследване на поровото пространство на бетона, живачната порьозиметрия остава най-традиционният и използван сред тях.

Методът на живачната порьозиметрия се базира на предпоставката, че порите са цилиндрични, като радиусът им се определя от уравнението на *Washburn*:

$$R = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{P_{Hg}}$$

където:

$\sigma$  е повърхностното напрежение на живака;

$\theta$  е ъгълът на омокряне на живака и стените на пората (за изпитване на циментовия камък  $\theta=141^\circ$ );

$P_{Hg}$  е налягането, при което живакът навлиза в порите.

При този метод е необходимо пробите първо да се дегазират, след което да се запълват с живак (Hg). Живакът може да проникне в порите на материала само под действието на външно налягане. По необходимото налягане за проникване на живака в порите се определя и техният размер от уравнението на *Washburn*.

Уредът, който е използван, е живачен порьозиметър тип „AutoPore 9200, MICROMERITICS” с високо налягане (150 МПа), който дава възможност за определяне на разпределение на порите по размери с радиуси в диапазона (0,006÷300)  $\mu\text{m}$ . Точността на измерването е 0,25%. Определени са интегралната и диференциалната крива на разпределението на порите по размери. Изследването е извършено в института по електрохимия и енергийни системи „Акад. Евгени Будевски”, към БАН.



#### 7.4 Сканираща електронна микроскопия (СЕМ)

Изследванията са проведени в Института по физикохимия „Акад. Р. Каишев“, към БАН. Използван е сканиращ електронен микроскоп (СЕМ) модел *JEOLJSM 6390*. Той разполага с приставка за елементарен анализ *EDS, INCAOxford*, с ускоряващо напрежение от 20 kV. Принципът на действие на СЕМ се реализира чрез електронен сноп, който обхожда точка по точка обекта, като го сканира. Сканирането на изпитвания обект е извършено чрез дефлектори, които имат за цел да



сн. III. 16: Сканиращ електронен микроскоп (СЕМ)

отклонят електронния лъч във взаимно перпендикулярни посоки. Отразените електрони се улавят от детектора и след като сигналът се обработи, се визуализира върху монитор. С цел получаване на качествен образ при наблюдение, е необходимо да се отразят максимално количество електрони, т.е обектът да е „непрозрачен за тях“. Това налага покриването на обекта с тънък слой благороден метал (злато). Полученият образ е обемен, в резултат на това, че детекторът за избитите и отразените електрони е поставен в единия край на тръбата. Снимките, получени по този начин, са записани във формат *SEI (Secondary Electron Image)*, т.нар. „светъл формат“. Ако електроните се отклонят в другата посока, съответната точка се отчита като „тъмна“ и се записва във формат *BSEI (Backscatter Electron Image)*.

## 8. Определяне на някои физични и хидрофизични свойства на втвърдения бетон

### 8.1 Физични свойства

#### 8.1.1 Обемна плътност

Обемната плътност ( $\rho_0$ ) е базова характеристика на бетона, която има отношение към изчисляването на носимоспособността в строителните конструкции. Тя би могла да служи за определяне на относителната порестост на СВЯБ. За изчисляване на обемната плътност са използвани пробни тела призми с размери 4/4/16 cm. Предварително са изсушени до постоянна маса -  $m_c$  (определена с точност 0,1 g), във вентилируема сушилня, при температура от + 110°C. Впоследствие са поставени под вода до водонапиване – до постоянна маса  $m_{wn}$ , измерена във въздух. По този начин пробните тела се доближават до тела с плътен обем. Измерва се масата  $m_{hyd}$  на водонапити тела, посредством хидростатична везна.



сн. III. 17: Хидростатична везна за определяне на обемна плътност на пробни тела гредички 4/4/16 cm

Обемната плътност ( $\rho_0$ ) се изчислява като:

$$\rho_0 = \frac{m_c}{m_{wn} - m_{hyd}} \cdot \rho_{c,w},$$

където:

$m_c$  е суха маса на бетона, kg;

$m_{wn}$  е водонапитата маса на пробата, kg;

$m_{hyd}$  е масата на пробата, потопена в хидростатична везна, kg;

$\rho_{c,w}$  е специфичната плътност на водата, kg/m<sup>3</sup>.

За определяне на обемната плътност на бетона от всеки състав са направени по три броя пробни тела, като е взета средно-аритметичната им стойност.

### 8.1.2 Специфична плътност

Специфичната плътност ( $\rho_c$ ) се използва за изчисляване на относителната плътност и порестост на бетона. Определена е по експериментален път с пикнометър с обем  $250 \text{ cm}^3$ . Използваните пробни тела са призми с размери  $4/4/16 \text{ cm}$ , които са смлени, до такава степен на ситност (до  $200 \mu\text{m}$ ), при която частиците се считат, че са плътни. Смленият материал се изсушава до постоянна маса (определена с точност  $0,1 \text{ g}$ ) във вентилируема сушилня, при температура от  $+110^\circ\text{C}$ .

Специфичната плътност ( $\rho_c$ ) на бетона е изчислява като:

$$\rho_c = \frac{m_{\text{прус+mat}} - m_{\text{прус}}}{m_{\text{const}} - (m_{\text{прус+mat+w}} - m_{\text{прус+mat}})} \cdot \rho_{c,w},$$

където:

$m_{\text{const}}$  е константата на пикнометъра, kg;

$m_{\text{прус}}$  е масата на пикнометъра, kg;

$m_{\text{прус+mat}}$  е масата на пикнометъра с материала, kg;

$m_{\text{прус+mat+w}}$  е масата на пикнометъра с материала и с водата, kg;

$\rho_{c,w}$  е специфичната плътност на водата,  $\text{kg/m}^3$ .

За определяне на специфичната плътност на бетона от всеки състав са направени по три броя измервания, като е взета средно-аритметичната им стойност.

### 8.1.3 Относителна плътност

Относителната плътност ( $d$ ) е структурна характеристика на бетона, която показва степента на запълване на порите на материала с вода. Изследването ѝ има пряко отношение към якостните характеристики на бетона. Относителната плътност се дефинира като отношението на плътния обем към обема в естествено състояние:

$$d = \frac{V_d}{V} \cdot 100 = \frac{\rho_o}{\rho_c} \cdot 100, \%$$

където:

$V_d$  е плътния обем на бетона,  $\text{m}^3$ ;

$V$  е общия обем на бетона,  $\text{m}^3$ ;

$\rho_o$  е обемната плътност,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\rho_c$  е специфичната плътност,  $\text{kg/m}^3$ .

Относителната плътност на даден състав е определена на база на средноаритметичните стойности на обеманите и специфичните плътности за този състав.



сн. III. 18: Пикнометър за определяне на специфична плътност на бетона, предварително смлян до ситност на частиците под  $200 \mu\text{m}$

#### 8.1.4 Относителна порестост

Относителната порестост ( $p$ ) показва степента на насищане на обема на материала с пори. Сумирането му с относителната плътност дава 100%. Относителната порестост се определя посредством отношението:

$$p = \left( \frac{V - V_d}{V} \right) \cdot 100 = \left( 1 - \frac{\rho_o}{\rho_c} \right) \cdot 100 = (1 - d), \%$$

където:

$d$  е относителната плътност, %;

Определянето на обемната плътност се извършва на база на средноаритметичните стойности на плътните и общите обеми на даден състав.

### 8.2 Хидрофизични свойства

Изследването на хидрофизичните свойства при СВЯБ има за цел да докаже наличието или липсата на капиларни пори в структурата му и изменението на поровото пространство в резултат на различни топло-влажностни обработки, т.е. по оценката на макропараметри като водопопиваемост, водонасищане и капиларна водопопиваемост, може да се оцени влиянието на рецептурните и технологичните параметри върху структурата на бетона. Този подход е често прилаган към обикновените бетони [Wirquin, Harjieva-Zaharieva, 2000], но адекватността му към СВЯБ следва да бъде анализирана.

#### 8.2.1 Водонапиване

Водонапиването ( $W_n$ ) е свойството на материала да поглъща и задържа вода под действието на молекулярни и капиларни сили, потопен при нормално атмосферно налягане. Водопопиваемостта дава представа за обема на порите, които се запълват с вода при нормални атмосферни условия. То е толкова по-голямо, колкото са по-големи порьозността, свободната повърхност на порите и хидрофилността на материала. Водата се поглъща от материала най-интензивно в началните часове, като колкото по-нееднородни по размер са капиларите, толкова по-голяма е скоростта на водопоглъщане.

За определяне на водонапиването са използвани пробни тела призми с размери 4/4/16 cm. Образците се изсушават до постоянна маса  $m_c$  (определена с точност 0,1 g) във вентилируема сушилня, при температура от + 110°C. След изстиването им в ексикатор до стайна температура, пробните тела се поставят във вана, върху пластмасова скара, така че долната им повърхност да не се допира до дъното на съда и се заливат с вода по следния начин: През интервал от 4 часа във ваната се налива вода, така че пробите да се потопят постепенно съответно до  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  и  $\frac{3}{4}$  от височината им, а накрая се покриват изцяло с вода, като водното ниво над пробните тела трябва да е в границите на 2-3 cm.

Пробите престояват 72 часа под вода, след което се изваждат, адсорбираната вода се попива с влажна кърпа и се претеглят. За да се провери дали пробите са напълно водонапити,

те се поставят за още 24 часа под вода, след което отново се претеглят. Пробните тела се считат за водонапити, ако разликата в масите при две последователни измервания не надвишава 1 %.

Водонапиването по маса  $W_{n,m}$ , се изчислява по следната формула:

$$W_{n,m} = \frac{m_{wn} - m_c}{m_c} \cdot 100, \%$$

където:

$m_{wn}$  е масата на пробното тяло във водонапито състояние, g;

$m_c$  е масата на пробното тяло в сухо състояние, g.

За определяне на водонапиването от всеки състав са направени по три броя пробни тела, като е взета средно-аритметичната им стойност.

### 8.2.2 Водонасищане

Практическото значение на водонасищането на бетона, е че дава представа за целия обем на откритите пори, достъпни за вода. Съществуват различни методи за определянето му (чрез изваряване, чрез повишено налягане и чрез вакуумиране). Избран е методът за водонасищане чрез вакуумиране.

За определяне на водонасищането са използвани пробни тела призми с размери 4/4/16 cm. Образците се изсушават до постоянна маса (определена с точност 0,1 g) във вентилируема сушилня, при температура от +110°C. След изстиването им в ексикатор, те се заливат с вода. Ексикаторът е свързан с вакуум-помпа, която има за цел да изтегля наличния въздух от системата. Вакуум-помпата работи и поддържа налягане от 650mm Hg дотогава, докато спре отделянето на мехурчета въздух във водата. За по пълно проникване на водата, в порите на материала, пробните тела престояват още 24 часа във вода, при нормално атмосферно налягане, след което се определя масата им във водонаситено състояние.



сн. III. 19: Пробни тела 4/4/16 cm, потопени във вода, в ексикатор, свързан с вакуум помпа

Водонасищането по маса  $W_{a,m}$  се изчислява по следната формула:

$$W_{a,m} = \frac{m_{wa} - m_c}{m_c} \cdot 100, \%$$

където:

$m_{wa}$  е масата на пробното тяло във водонаситено състояние, g;

$m_c$  е масата на пробното тяло в сухо състояние, g.

За определяне на водонасищането, от всеки състав са направени по три броя пробни тела, като е взета средно-аритметичната им стойност.

### 8.2.3 Коефициент на водонасищане

Отношението на водопопиваемостта към водонасищането на пробното тяло дава т.н. коефициент на водонасищане ( $K_H$ ). Той отразява степента на запълване на откритите пори с вода при обикновени атмосферни условия. При някои материали той се използва като косвен критерий за мразоустойчивостта.

$$K_H = \frac{W_{n,m}}{W_{a,m}}$$

където:

$K_H$  е коефициента на водонасищане;

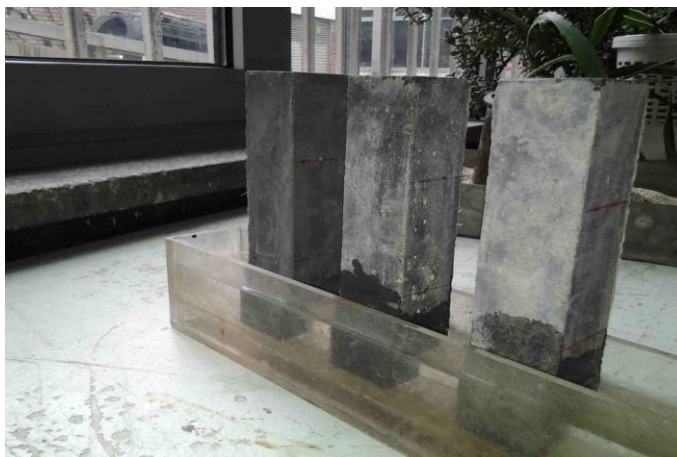
$W_{n,m}$  е водонапиването по маса на пробното тяло, %;

$W_{a,m}$  е водонасищането по маса на пробното тяло, %;

Коефициентът на водонасищане на даден състав е определен на база средноаритметичните стойности на водонапиването и водонасищането за този състав.

### 8.2.4 Капилярна водопопиваемост

Капилярната водопопиваемост е използвана като макропоказател за структурата на поровото пространство. Определена е чрез призматични пробни тела, с размери 4/4/16 cm. За определяне на капилярната водопопиваемост на всеки състав, са направени по три бройки пробни образци, като е изчислена средно аритметичната стойност на капилярната водопопиваемост.



сн. III. 20: Пробни тела гредички 4/4/16 cm, подложени на капилярна водопопиваемост, до постоянна маса

Образците се изсушават до постоянна маса, с точност 0,01g. След това се поставят върху скара във вана, в изправено положение, така че дълбочината им на потъване да бъде 1 cm. Във ваната се поддържа водното ниво, така че да се компенсира изпарението на водата и поглъщането ѝ от образците.

Периодично се измерва масата на пробните тела (водата по повърхността се отстранява с влажна кърпа). Изпитването продължава до постигането на постоянна маса.

Капилярната водопопиваемост  $i$  се изчислява по следната формула [Emerson, 1990]:

$$i = A + S\sqrt{t},$$

където:

$A$  е началната абсорбция;

$S$  е абсорбционната способност;

$\sqrt{t}$  е времето за провеждане на експеримента.

Капилярната водопопиваемост на всеки състав е определена на базата на средноаритметичната стойност на три изпитани пробни тела.

### 8.2.5 Съсъхване

Причините за съсъхване на бетона са комплексни (пластично, контракционно, от изсъхване и карбонизационно съсъхване), но то се проявява в намаляване на размерите на елементите. При СВЯБ, поради особеностите на състава, водещи до голямо количество на гелната компонента, малко количество свободна вода, липса на капилярна порестост и много ниска скорост на карбонизация, е трудно да се прогнозира развитието на процеса на съсъхване. Големината на съсъхването трябва да се познава, за да бъде контролирано пукнатинообразуването и загубата на напрежения (в предварително напрегнатите конструкции). Тъй като големината на съсъхване зависи изключително от условията на околната среда, е приложена методика, по подобие на описаната в стандарт [БДС EN 12617-4:2003], с измерване на промените в дължината на пробни образци призми с размери 4/4/16 см, отлежаващи в различни условия.

При изготвянето на пробните образци в краищата им са поставени неръждаеми щифтове, които завършват със полусферични гнезда. В първите 24 часа образците престояват във формите във влажна камера при температура от  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  и относителна влажност на въздуха  $95 \pm 5\%$ . При изваждането на образците от кофражните форми (на възраст 1 ден) се определя началната дължина на всяко едно пробно тяло. За измерване на дължината се използва уреда на Graf-Kaufman, с точност на измерването  $1\ \mu\text{m}$ . На всяко пробно тяло е определена промяната в дължината (съсъхването) на възраст 3, 7, 28, 90, 180 и 365 дни. За определяне на съсъхването на всеки състав е взета средната стойността от измерванията върху 3 пробни тела от този състав.

Условията на отлежаване са следните:

- Влажни условия (виж г. III т. 5.2.3), за да се оцени предимно приноса на контракционната компонента;
- Сухи условия (виж г. III т. 5.2.1), за да се оцени и приноса на влажностното съсъхване;
- Тепло-влажностна обработка (виж г. III т. 5.3), след което отново пробите са оставени във влажни условия.



сн. III. 21: Електронен уред за измерване на съсъхването на пробни тела гредички 4/4/16 см

## 9. Определяне на механичните свойства на втвърдения бетон

### 9.1 Якоствни характеристики при краткотрайно статично натоварване

#### 9.1.1 Якост на опън при огъване

Дребнозърнестият характер на СВЯБ позволява за изпитването на огъване да се прилага стандартът [БДС EN 197-1:2002]. Въпреки, че напрегнатото състояние в зоната на максималния момент не е чисто огъване (има и срязване), е избрана схема на три-точково натоварване – с концентрирана сила в средата на подпорното разстояние.

Подпорното разстояние е 10 cm, Пробното тяло се натоварва до разрушение с постоянна скорост от 0,5 МРа/s.

Якостта на опън при огъване се означава с  $f_f$  и се изчислява по следната формула:

$$f_f = 1,5 \frac{F.l}{b.h^2}, N/mm^2,$$

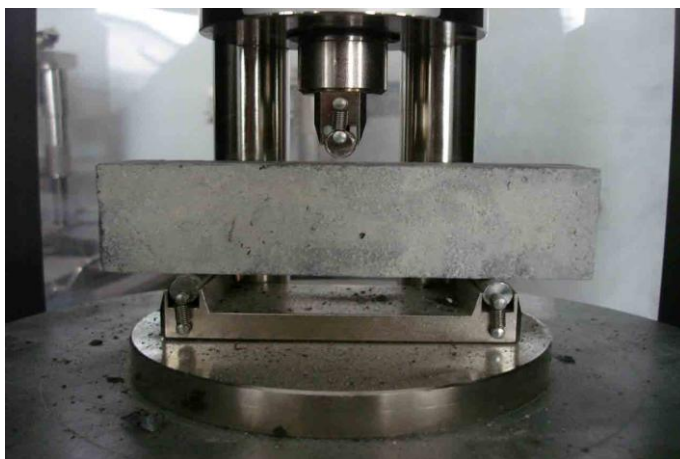
където:

$F$  е най-голямото натоварване, приложено върху пробното тяло, N;

$l$  е разстоянието между осите на опорните ролки, mm;

$b$  е широчината на пробното тяло, mm;

$h$  е височината на пробното тяло, mm;



сн. III. 22: Изпитване якост на опън при огъване на половинки гредички 4/4/16 cm

Както ще бъде коментирано по-нататък (виж гл. VI т. 3.2), поведението на СВЯБ се различава значително от това на линейно-еластичните материали, особено при влакнесто армираните композити, така че предпоставките, за които важи горната формула, не са изпълнени. Затова представените данни за якостта на опън при огъване трябва да се приемат като условни и служат само за сравнение между различните състави и за открояване на влиянието на рецептурно-технологичните фактори.

Якостта на опън при огъване, дадена за всеки състав, е получена като средноаритметична стойност, изчислена с точност до  $0,1N/mm^2$ , от единичните резултати, получени от изпитване на три броя пробни тела.



## 9.1.2 Якост на натиск

Якостта на натиск е определена върху пробни тела, представляващи половинки от трите пробни образци 4/4/16 cm, изпитвани на опън при огъване.

За определяне на якостта на натиск е приложен стандарт [БДС EN 196-1], като са модифицирани някои от условията на изпитване, като скорост и продължителност на натоварване, отговарящи на препоръките на [БДС EN 12390-3:2009].

Всеки образец се поставя в специална стоманена приставка, чрез която се осъществява натоварването върху площ  $A=16 \text{ cm}^2$ .

Използването на част от призматични пробни тела, а не кубчета или цилиндри, за определяне на якостта на натиск, дава известна неточност на получените резултати поради съдействащата широчина на ненатоварената част от образеца. При все това, най-важният параметър – отношение височина към основен ръб, е един и същ (1:1) с този на кубчета. т.е. задържащото деформациите влияние на силите на триене е разпределено по сходен начин.

Натоварването е осъществено посредством електронна преса с постоянна скорост от 0,8 МПа/s, което отговаря на скорост на натоварване на обикновен бетон.

Якостта на натиск се получава като средноаритметичната стойност от единичните резултати на шестте половинки гредички, изчислена с точност до  $0,1 \text{ N/mm}^2$ , по формулата:

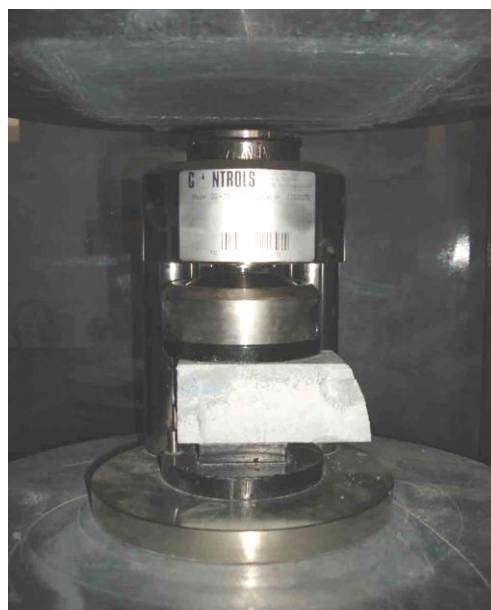
$$f_{c,pr} = \frac{F}{A}, \text{ N/mm}^2,$$

където:

$F$  е най-голямото натоварване, приложено върху пробното тяло, N;

$A$  е площта на стоманената приставка,  $\text{mm}^2$ .

По аналогичен начин протича изпитването за определяне на якостта на натиск на кубични пробните тела с размери 5/5/5 cm и на призми с височина 16 cm и основен ръб 4 cm.

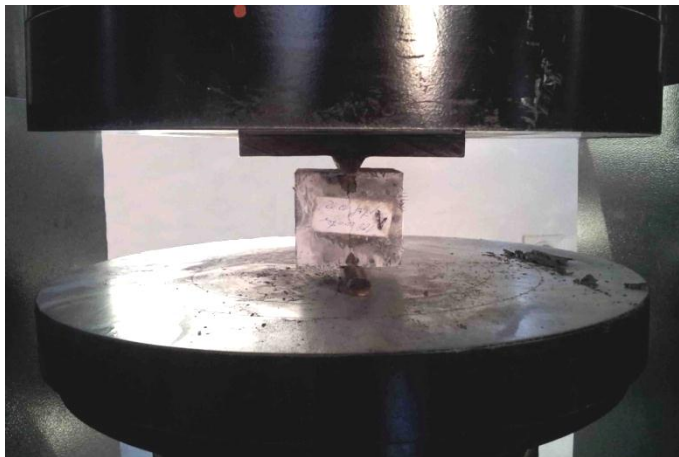


сн. III. 23: Изпитване на якост на натиск на половинки гредички 4/4/16 cm

### 9.1.3 Якост на опън при разцепване

Използван е стандартът [БДС EN 12390-6:2009], със своето приложение "Анекс А", където се определя якостта на опън при разцепване на пробни тела кубчета.

Якостта на опън при разцепване се определя като средноаритметична от единичните резултати на 3 броя пробни тела кубчета с размери 5/5/5 cm. Между плочите на пресата и пробното тяло, в средната линия на горната и долната му повърхност, се поставят стоманени пръти с диаметър  $\phi 10$ . По този начин се реализира ножовото натоварване в средната зона на образеца, водещо до разцепване. Зададена е скорост на натоварване на електронната преса от 0,05 MPa/s.



сн. III. 24: Изпитване якост на разцепване на кубчета 5/5/5 cm

Якостта на опън при разцепване се изчислява посредством формулата:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi \cdot a^2}, N/mm^2,$$

където:

$F$  е най-голямото натоварване, приложено върху пробното тяло, N;

$\pi$  е 3,14;

$a$  е дължината на контактната линия с основния ръб на кубичното тяло, mm;

### 9.2 Ударна жилавост/ударна якост

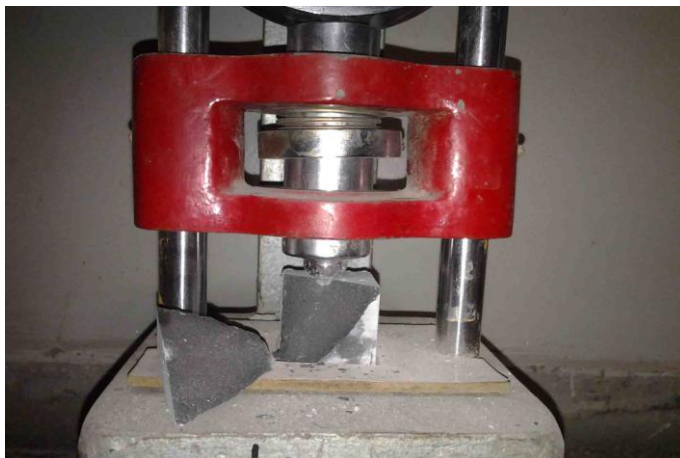
Ударната жилавост е изпитване, което дава представа за издръжливостта на материала на краткотрайни динамични въздействия, но служи и за определяне на енергията на разрушение на бетона (*fracture toughness*). Тък като ударна жилавост не е максималното напрежение в  $N/m^2$ , а се изразява като енергията, необходима за разрушаването на пробно тяло с единица обем (мерни единици  $J/m^3$ ) или с единица площ (мерни единици  $J/m^2$ ), е по-коректно да се нарича издръжливост на удар или удароустойчивост. При стоманата се използва термина „ударна жилавост“. Оценката се дава с отношението между удароустойчивостта на композита и удароустойчивостта на матрицата. Това отношение се означава „способността за абсорбиране на енергия“ (*energy absorbtion*) и се използва като показател за поведението на бетона при екстремни ударни въздействия или циклични ударни въздействия.

При СВЯБ влакнеста армировка води до повишаване на удароустойчивостта на материала. Поради това е извършен експеримент за установяване на ефекта от използването ѝ върху супервисокоякоостната матрица. Опитната постановка отчита поведението на композитите при поява на първа пукнатина и след пълното им разрушаване. Първата пукнатина има за цел да обособи полето на напрежения, формирано от микродефектите в

матрицата, и в последствие образуването на непрекъснати пукнатина от него, която напълно да разрушат пробното тяло. Това се реализира след изчерпване на десипативната енергия, акумулирана в дисперсната армировка, която има за цел да запази цялостта на пробата.

За определянето на удароустойчивостта няма стандартизиран метод, затова е използвана адаптирана методика, която се прилага към бетони.

Ударната жилавост е определена посредством пробни образци кубчета с размери 4/4/4 cm, предварително отлежали 28 дена под вода. Изпитването се реализира чрез апарата на *Paige* [Дойков, 2007], който представлява стоманен чук, с който се нанасят удари върху пробното тяло със сила на тежестта 20N, падаща от различна височина.



сн. III. 25: Уред на Пейдж, за определяне на ударната якост на кубчета 4/4/4 cm

Първият удар се осъществява от височина 1 cm, като всеки следващ удар се нанася от височина 1 cm по-нагоре от предходния. Изпитването приключва, когато пробното тяло напълно се разруши.

Ударната жилавост се изчислява съгласно формулата:

$$f_{imp} = \frac{F(1+2+3+\dots+n)}{V_s},$$

където:

$f_{imp}$  е ударната якост на образеца, J/cm<sup>3</sup>;

$F$  е теглото на чука, който се пуска върху пробното тяло, N;

$n$  е височината, при която пробното тяло се разрушава, cm;

$V_s$  е обема на изпитваното тяло, cm<sup>3</sup>.

За определяне на ударната жилавост от всеки един състав са изпитани по три пробни тела, като за ударната якост е представена средно аритметичната стойност от тях.

### 9.3 Изтриваемост/Износоустойчивост

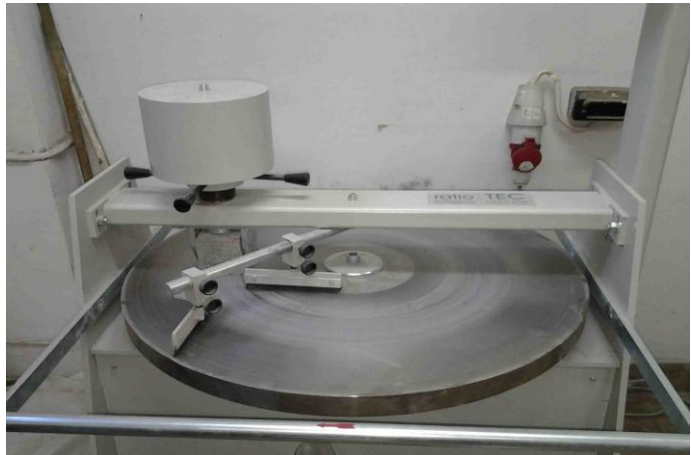
Изтриваемостта на СВЯБ е важен показател за механичното поведение на материал, подложен на абразивни въздействия. В случая, сравнявайки изтриваемостта на различни състави на СВЯБ, е оценено влиянието на количеството и вида на използваната влакнеста армировка.

Съществуват няколко известни метода, които дефинират устойчивостта на износване на бетоните, на база циментова матрица. Най-известният и често прилаган е методът на Böhme

[БДС EN 13892-3:2005], с които се отчита загубата на маса на пробните тела след прилагане на абразивно въздействие с помощта на въртящ се диск. Той е и избран за изпитването на СВЯБ. Останалите методи разглеждат максималната дълбочина на изтриване на повърхността в  $\mu\text{m}$  и количеството изтрит обем в  $\text{cm}^3$ , описани съответно в стандарти [БДС EN 13892-4:2003] и [EN 13892-5:2003].

Пробните тела, използвани за определяне на изтриваемостта са кубчета със страна  $71 \pm 1,5 \text{ mm}$ . Преди да започне изпитването, образците са почистени, измерени са размерите с точност до  $0,1 \text{ mm}$  и масата, с точност до  $0,1 \text{ g}$ .

Върху въртящия се диск на уреда „Vöhme“ е нанесен  $20 \text{ g}$  от абразивен материал. Всеки един от изпитваните образци се подлага на абразия, като се притиска (натоварване от  $294 \pm 3 \text{ N}$ , даващо площен товар около  $0,06 \text{ N/mm}^2$ ) с помощта на държач към диска, който се върти със скорост  $30 \text{ min}^{-1}$ . Изпитването обхваща  $16$  цикъла, като всеки цикъл се състои от  $22$  оборота на диска. След всеки цикъл образецът се изважда от държача, почиства се и се претегля. Пробното тяло се завърта на  $90^\circ$  в същата равнина на изпитване. Дискът на уреда се очиства и отново се насипва с абразивен материал.



сн. III. 26: Уред на „Vöhme“, за определяне изтриваемостта на кубчета  $7/7/7 \text{ cm}$

Изтриваемостта се изразява като загуба на обем  $\Delta V$  след  $16$ -тия цикъл по следния начин:

$$\Delta V = \frac{m_i - m_f}{\rho_o} = \frac{\Delta m}{\rho_o}, \text{ cm}^3,$$

където:

$m_i$  е масата на пробното тяло преди изпитването,  $\text{g}$ ;

$m_f$  е масата на пробното тяло след изпитването,  $\text{g}$ ;

$\rho_o$  е обемната плътност на пробното тяло в  $\text{g/cm}^3$ ;

За определяне изтриваемостта са изпитани три броя пробни тела от всеки един изследван състав, като е взета средно аритметичната им стойност.

В табл. III. 14 са дадени класовете по устойчивост на износване по Vöhme. Колкото е по-висок класът по износване, толкова е по-намалена способността на материала да противодейства на абразивно въздействие.

табл. III. 14: Класове по устойчивост на износване по Vöhme за материали на база циментова матрица при подови настилки

Класове по Vöhme	A22*	A15	A12	A9	A6	A3	A1,5
Износване, изразено количествено в $\text{cm}^3$ , отнесено към площ $50 \text{ cm}^2$	22	15	12	9	6	3	1,5

\* А е абривиатура от 'Abrasion' (износване)

#### 9.4 Деформационни характеристики при натоварване

##### 9.4.1 Модул на линейни еластични деформации (Е-модул)

Използвана е методиката по EuroCode 2 [БДС EN 1992-1-1:2005/NA:2011], която се прилага у нас за определяне на Е-модула на обикновени бетони. Изпитването е адаптирано към СВЯБ, като горната граница на натоварване е до 40% от максималната якост на натиск, поради по-високата граница на еластичност при СВЯБ. Натоварването е реализирано с постоянна скорост от 0,2 МРа/с. Изпитването е извършено при температурата  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  и относителна влажност на въздуха от  $60 \pm 10 \text{ \%}$ .

Принципът на определяне на Е-модула се състои в измерването на надлъжните деформации на образец при определена степен на натоварване. За целта са натоварени на натиск пробни образци призми с размери 4/4/16 cm, като деформациите са измервани в средната им третина, при база 6 cm. Използвани са деформометри от механичен тип, с точност на измерване 0,001 mm. Те са разположени на две срещуположни страни на призмата.



сн. III. 27: Изпитване модула на еластичност на пробни тела гредички 4/4/16 cm

Преди измерване на деформациите при същинското натоварване е извършено центриране на пробните тела, така че отчетите по двата деформометъра да имат близки стойности (разлика не повече от 5% при натоварвания между  $0,1 * f_{c,pr}$  до  $0,2 f_{c,pr}$  където  $f_{c,pr}$  е якост на натиск на половинки гредички 4/4/16 cm, определена по методика, описана в гл. III. т. 9.1.2.

Модулът на еластичност е изследван на възраст 28 дни и 1 година. Отлежаването на пробните тела е във вода (виж г. III т. 5.2.4).

Модулът на еластичност е определен и върху пробни тела, които са били подложени на топло-влажностни обработки (виж г. III т. 5.3.), както и след добавянето на дисперсна армировка от къси стоманени влакна (виж г. VI т. 1.2.1).

Модулът на еластичност се представя като отношението на промяната на напрежението отнесено към промяната на деформацията, т.е. изчислява се като тангенс от ъгъла на

секущата с абсцисата на работната диаграма „напрежение-относителна надлъжна деформация“.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon},$$

където:

$\Delta\sigma$  е промяната на напрежението между горната ( $\sigma_a$ ) и долната степен ( $\sigma_b$ ), на натоварването, т.е.  $\Delta\sigma = \sigma_a - \sigma_b$ .

$\Delta\varepsilon$  е промяната на относителната деформацията между долната и горната степен на натоварване и се изчислява по формулата:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta l}{l},$$

където:

$\Delta l$  е разликата в отчетите на деформометъра при горна и долна граница на натоварването;  $l$  е базата на деформометъра, mm.

Осреднени са отчетите между левия и десния деформометър.

Напреженията, при които са отчетени деформациите са съответно  $\sigma_b = 0,3MPa$  и  $\sigma_a = 0,40f_{c,pr}$ . По-високата горна граница е избрана по литературни данни, тъй като е известно, че линейната зависимост между напрежението и деформацията при СВЯБ се запазва дори до натоварване до около 80% от якостта на натиск [Richard & Cherezy, 1995].

Направени са по три цикъла „натоварване-разтоварване“ между горна и долна степен на натоварване и отчетите са снети след третия цикъл, тъй като се предполага, че няколкократното натоварване-разтоварване е изконсумирало пластичните деформации (макар и малки при ниски напрежения, те съществуват в бетона) и поведението е практически еластично, т.е. секущата практически припокрива работната диаграма.

За определяне на модула на еластичност са изпитани три бройки пробни тела от всеки един изследван състав, като е взета средно аритметичната им стойност.

#### 9.4.2 Коефициент на Поасон

Няма подробни данни за методите, по които се определя коефициентът на Поасон на СВЯБ. У нас няма общоприета методика за определянето му и при обикновените бетони. Обикновено стойностите му за обикновен бетон се приемат по литературни данни. За настоящото изследване е използвана адаптирана методика по стандарт ASTM C469 [ASTM C469 / C469M – 10]. Изпитванията са проведени в Института по механика на БАН. Спазени са стандартните схема на провеждане на изпитването, при скорост на натоварване от 1,25 mm/min. Поради по-малкият обхват на пресата, натоварването е от 0,25 до 0,35 от якостта на натиск  $f_c$ , определена съгласно [БДС EN 197-1:2002], според различните състави. Температурата, при която е извършено изпитването, е  $20\pm 5$  °C и относителна влажност на въздуха  $60\pm 10$  %.

Изпитваният образец, с размери 4/4/16 cm, е подложен на натиск, както е показано на сн. III. 28. Натоварването се отчита със силомер с обхват 100 kN, а деформациите са измерени чрез електросъпротивителни деформометри (200  $\Omega$ ) и тензометрична апаратура марка *Hottinger-Baldwin-Messtechnik UPM 60*. Точността на измерване на деформацията е 1%. На две срещуположни страни на всяка проба са залепени по два датчика – съответно за надлъжните и за напречните деформации. По този начин може да се осигури центрично натоварване на образците и деформациите да се изчислят като средно-аритметични от всяка двойка датчици.

Стойностите на натоварването и съответните им надлъжни и напречни деформации са записвани през 6 секунди, с помощта на мултиметър *ProtekD470* и компютър. Построена е графика на изменение на коефициента на Поасон в зависимост от надлъжната деформация  $\varepsilon_l$ .



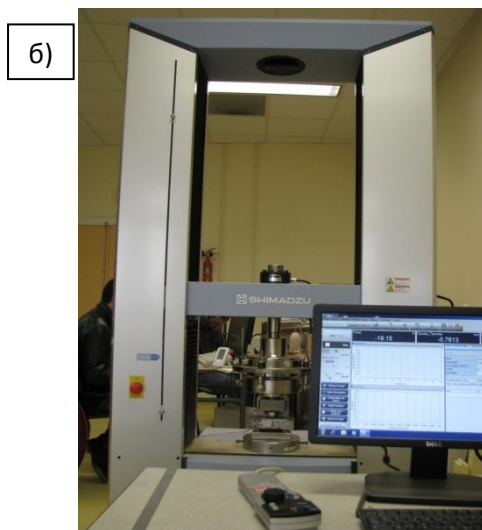
сн. III. 28: Определяне на коефициента на Поасон на пробни тела 4/4/16 cm

За определяне на коефициента на Поасон за всеки състав, са изпитани по три броя пробни тела и е взета средно-аритметичната им стойност.

#### 8.4.3 Провисване при огъване

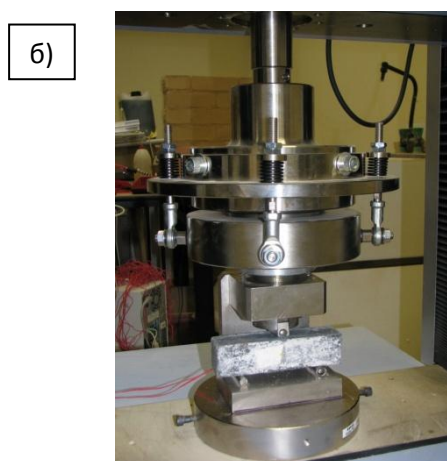
Определяне на провисването при огъване става при статическата схема проста греда, натоварена на огъване, със сила в средата на подпорното разстояние (т.нар. три-точково огъване), върху пробни образци призми с размери 4/4/16 cm, при подпорно разстояние 10 cm.

Натоварването на огъване е осъществено на две различни апаратури, базирани на два различни принципа на натоварване – с контролиране на скоростта на натоварване по сила (сн. III. 29-а) и по деформации (сн. III. 29-б).



сн. III. 29: Опитни постановки за определяне на връзката между натоварване и деформация (вертикално провисване и надлъжна деформация в опънна зона) на пробни тела призми 4/4/16 cm, посредством а) преса с натоварване по сила и б) преса с натоварване по деформации

В първия случай (сн. III. 30-а) вертикалното преместване (провисването) е измервано в средната третина на опънната зона с помощта на индикаторен деформометър, с точност на измерването 1µm, в долната страна на пробното тяло, под мястото, където се прилага товара. Отчетите са правени в характерни моменти от поведението при огъване - при поява на първа пукнатина, при достигане на максимална сила и след нея, в падащия клон на работната диаграма. Натоварването се осъществява плавно със скорост  $V=4$  MPa/min, до пълното разрушение на образца.



сн. III. 30: Определяне на провисването при огъване на пробни тела 4/4/16 cm, посредством: а) индикаторни деформометри б) цифров запис на полученото провисване

За оценка на деформируемостта на материала се дефинира провисването при първа пукнатина като отношението между деформацията на пробното тяло от провисване при огъване, отнесено към подпорното разстояние, съгласно формулата:

$$f_{1st\ cr} = \frac{\delta(F_{1stcr})}{l},$$

където:

$f_{1st\ cr}$  е граничното относително провисване, mm/m;



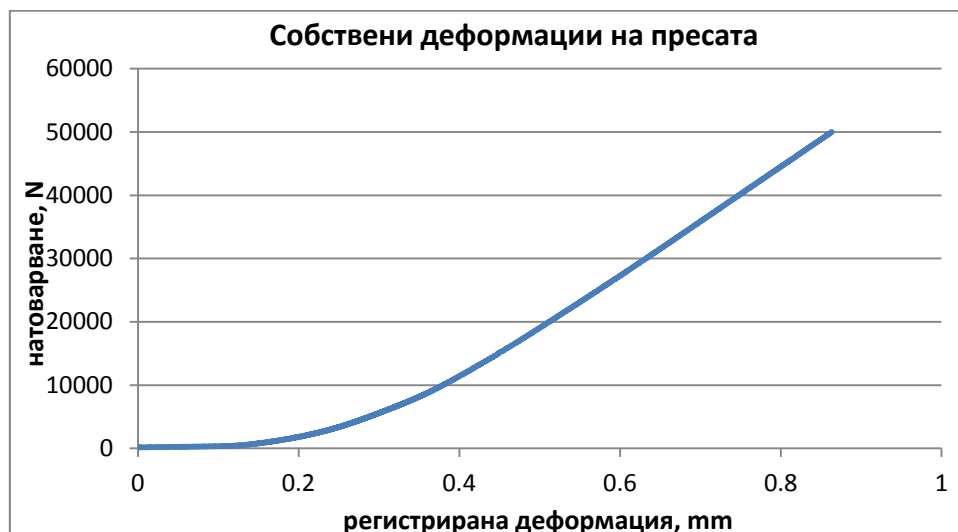
$\delta(F_{1stcr})$  е провисване, измерено при първа пукнатина, mm;

$l$  е подпорното разстояние на пробното тяло, m.

За определянето на провисването на всеки изследван състав от СВЯБ е взета средноаритметичната стойност от измерванията върху три броя пробни тела.

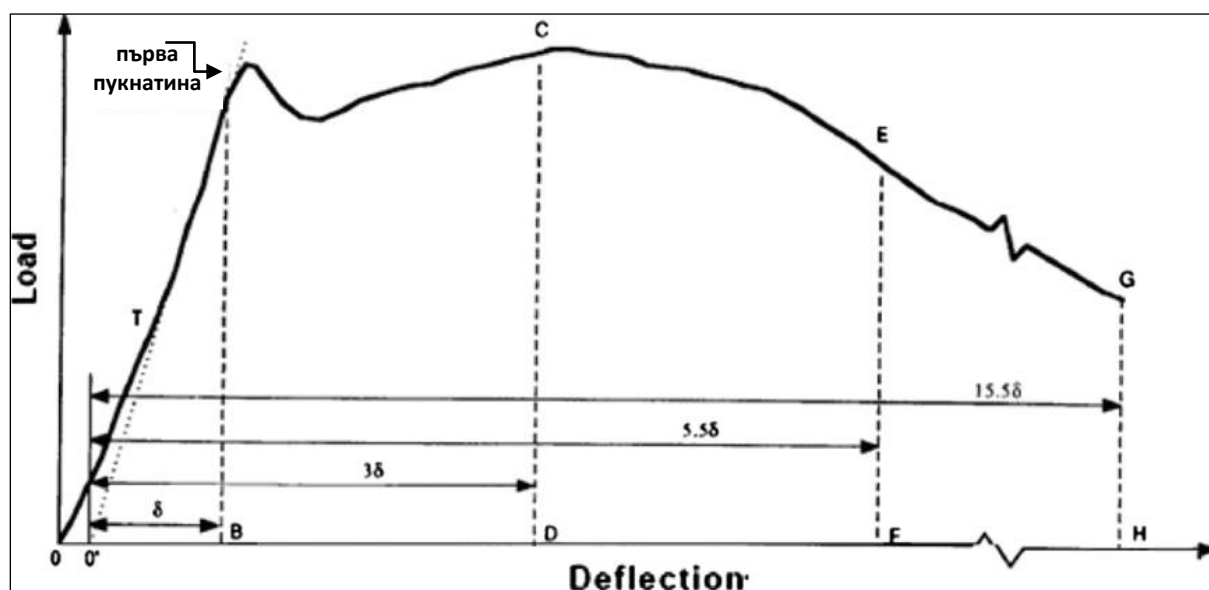
На снимка 29-б е представена пресата, която е използвана в ЛГУА, за осъществяване на натоварването на огъване при постоянна скорост на деформациите. Този начин позволява прецизно изпитване, особено в падащия клон на диаграмата, тъй като се елиминират неравномерностите в натоварването, водещи до саморазтоварването на образеца, вследствие на пукнатинообразуване и реализиране на големи премествания. От много важно значение е скоростта на натоварване. Целта е да се даде възможност в материала да се получи преразпределяне на усилията между различните компоненти и този ефект да бъде регистриран с работна диаграма. В стандарта [ASTM C 1018-97], скоростта на натоварване се регламентира в зависимост от нарастването на провисването в средната третина на образеца, както и в зависимост от размера на пробните тела и съответно големината на подпорното разстояние. Тъй като най-малката регламентирана скорост е 50  $\mu\text{m}/\text{min}$ , тя е приета и за скорост при изпитването (за опитни образци с размери 350/100/100 mm).

Използваната преса е модел *Shimadzu AG-50kNXplus*. Тя регистрира едновременно натоварването и вертикалното преместване на натоварващия прът:  $\Delta$  [mm] и  $F$  [N], представени с помощта на софтуер *TrapeziumX*. В действителност, съществува разлика между регистрираната деформация  $\Delta$  [mm] и провисването на пробното тяло  $\delta$  [mm], дължаща се на реакцията на пресата, т.е. на деформациите на нейните компоненти (например на скъсяването на натоварващия прът). Тази разлика е толкова по-малка, колкото по-голяма е разликата в коравините между пресата и пробното тяло. На фиг. III. 5 е илюстрирана реакцията на пресата (по данни на Производителя ѝ) при натоварване със скорост 50  $\mu\text{m}/\text{min}$ . В случая, при малките пробни тела, натоварвани до около едва 1/3 от максималния обхват на пресата (50kN) се оказва, че собствената деформация е 0,15 – 0,25 mm и може да бъде пренебрегната, особено когато става дума за сравнителни изследвания на пробни тела със сходни коравини. По тази причина е прието, че диаграмата „ $F - \Delta$ “ описва правдоподобно връзката „ $F - \delta$ “. Предвид нелинейността в поведението на материала, пукнатинообразуването и промяната на геометричните характеристики на опънатата и натисковата зона, не е подходящо да се изчислява напрежението на огъване по формулите за правоъгълно напречно сечение (гл. III т. 9.1.1), затова работната диаграма ‘напрежение – провисване’, при огъване, се илюстрира с връзката „ $F - \delta$ “.



фиг. III. 5: Собствени деформации на натоварващата преса, при 50  $\mu\text{m}/\text{min}$

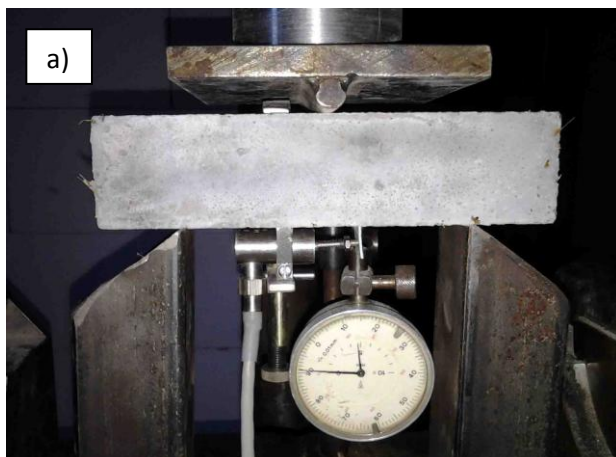
Известно е, че измерванията на провисването в началния участък (до около 20% от  $F_{max}$ ) могат да бъдат натоварени с известни неточности, породени от приплъзване, инерция на пресата, собствено тегло на натоварващото приспособление и др. ASTM C1018-97 отчита тези фактори и позволява корекция на началната стойност на диаграмата „ $F - \delta$ “, както е показано на фиг. III. 6.



фиг. III. 6: Крива натоварване-провисване, според ASTM C1018-97, с извършване на корекция на линейния участък

#### 8.4.4 Надлъжна деформация в опънна зона при изпитване на огъване

На снимка 29 са представени двете опитни постановки за определяне на опънната деформация при натоварване на огъване, осъществено по сила (сн. III. 29-а) и по деформации (сн. III. 29-б). Измерването на деформацията е осъществено посредством индуктивен датчик (сн. III. 31-а) и електро-съпротивителен датчик (сн. III. 31-б).



сн. III. 31: Определяне на надлъжната деформация в опънната зона на пробни тела гредички 4/4/16 см., посредством а) индуктивен датчик и б) съпротивителен датчик

На снимка 29-а е представена специална опитна постановка реализирана в УСИЛ при УАСГ. Осъществено е натоварване, с постоянно нарастване на силата от 100 тонна преса, като е определена зависимостта между натоварващата сила и реализираната надлъжна деформация в опънна зона. Това дава възможност да бъде изчерпан и падащия клон на *"F-ε"* диаграмата. Диаграмата е дефинирана при напрежения, възникнали при натоварване на опън при огъване, с една концентрирана сила посредата и получени надлъжни деформации в долния пояс на пробното тяло. Постановката съвпада с тази за определяне на граничното провисване.

Определянето на надлъжната деформация в опънната зона се осъществява чрез индуктивен датчик при база от 25 mm, като точността на измерване е 0,01 μm. Натоварването на пробното тяло продължава до пълното му разрушение, т.е. и след появата на първа пукнатина, така че е целесъобразно да се използва индуктивен датчик с максимален ход 1000 μm.

Данните от индуктивния датчик се предават на X-Y записвач, с помощта на който се изчертава *"F-ε"* диаграмата.

В този случай натоварването от пресата се прилага по индиректен път. Горната челюст на пресата се опира на стоманена греда посредством метална става. Стоманената греда е подпряна на две опори върху долната челюст на пресата. Получената система образува проста греда на две опори (сн. III. 29-а).

Изпитваният образец се намира под стоманената греда, също подпрян на две опори. По средата на долния пояс на стоманената греда е закрепена „мес доза“, която служи за отчитане на натоварването от пресата, посредством стоманената греда, което се предава върху изпитвания образец. Така направената система от две независими прости греди, всяка подпряна на две опори между челюстите на пресата, свързани чрез „мес доза“ образуват статическа неопределина система.

Ползата от тази система е, че натоварването от пресата се преразпределя между двете греди, пропорционално на коравините на елементите в системата. Тъй като коравината на стоманената греда надвишава многократно коравината на изпитвания образец, при поява на

пукнатини в образеца, водещи до понижаване в коравината му, стоманената греда започва да „изтегля“ още по-голяма част от товара към себе си, с което намалява лавинообразното образуване на пукнатината в бетонното тяло и предодвратява крехкото му разрушение. По този начин разрушението на образеца се контролира да стане по етапи и в работната диаграма може да бъде записан падащия клон, т.е. да се проследят деформациите след достигане на максималното натоварване.

От всеки състав са изпитани 3 броя пробни тела призми 4/4/16 cm. Анализирани са диаграмите „ $F-\varepsilon$ “ и е избрана най-представителната за състава – например, при наличие на една диаграма, която се различава рязко от другите две, тя е елиминирана от анализа. Също така, елиминирани са резултати, при които се наблюдават отклонения, дължащи се на случайни фактори, например дефект в матрицата или друга нехомогенност.

На снимка 29-б е показана опитната установка, при която е използван електосъпротивителен датчик KYOWA (KFG-5-120-C1-11L1MR), залепен върху предварително обработена чрез шлайф повърхност, за да се постигне гладкост. Тънък слой лепилен състав от СС-33А (циано-акрилатна основа) е положен върху датчика, като повърхността предварително е почистена с ацетон и е положен андхезионен слой, а изпитването е осъществено на следващия ден. Датчикът е свързан към мултиметър (Agilent 34970A), който извършва запис в реално време. Електронният импулс, предизвикан от промяната в съпротивлението на датчика (следваща деформацията на основата) се преобразува в търсената относителна надлъжна деформация посредством специфична константа на датчика.

Предизвикателството при този тип измерване на деформацията е свързано с осигуряване на плътен контакт между датчика и пробното тяло, както и с необходимостта да се използват датчици с голям обхват, за да не се разрушат (скъсат) при измерване на големи деформации.

## 8.5 Енергия на разрушението

За определяне на енергията на разрушение ( $G_f$ ) на СВЯБ са използвани няколко различни подхода, описани по подробно в направения литературен обзор (виж гл. I. т. 5.4), въз основа на снети работни диаграми при огъване „ $F-\delta$ “ и „ $F-\varepsilon$ “.

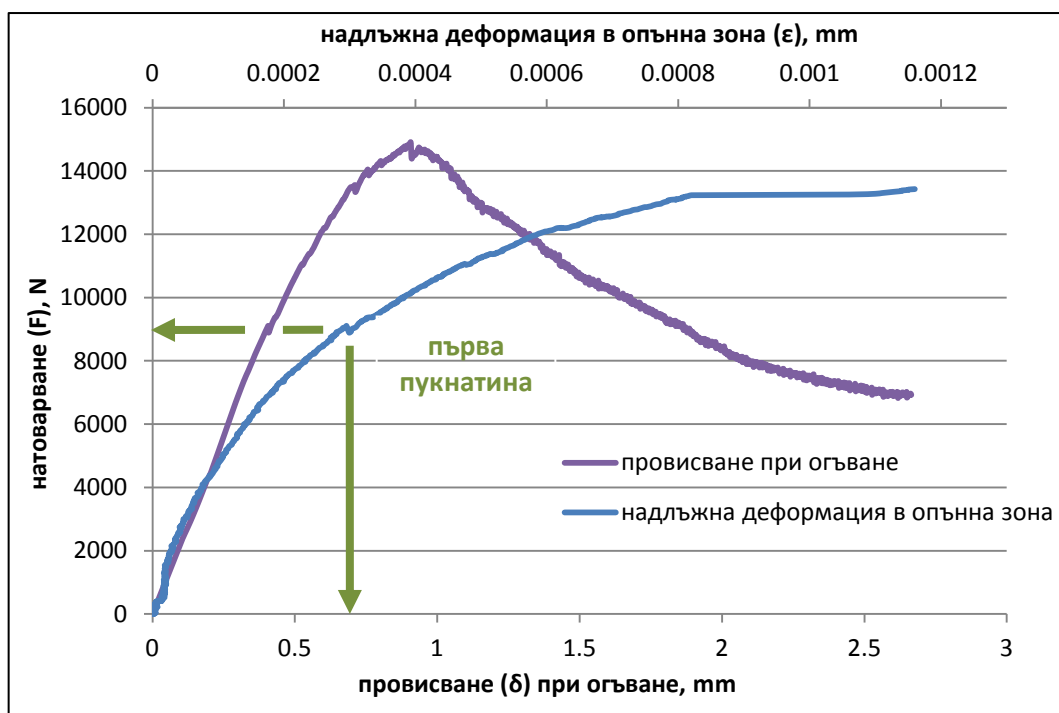
### 8.5.1 Определяне на индексите на пластично разрушение и фактора на остатъчна якост по методиката на ASTM C 1018-97 и ASTM C 1609/C 1609M-10

За изчисляване на енергията на разрушение  $G_f$  по този метод е необходимо да се определи провисването  $\delta$ , при което се образува т.нар. първа пукнатина в диаграмата ‘сила-провисване’ („ $F-\delta$ “).

ASTM стандартите дават числен метод за определянето на  $\delta$ , при влакнесто-армирани бетони, но той е неприложим в случая на СВЯБ, поради много по-големите му деформации (над 10 пъти), в сравнение с обикновения влакнесто-армиран бетон. Формирането на първата пукнатина в стандарт ASTM C 1609/C 1609M-10 е дефинирано условно в интервала от 0 до  $L/600$  (където  $L$  е подпорното разстояние) (виж г. I т. 4.5.1.2.1), което при дадената опитна постановка

отговаря на  $L/D=0,1666$  mm. Всъщност при СВЯБ, първата пукнатина се формира при  $\delta$  от порядъка на 0,40-0,50 mm.

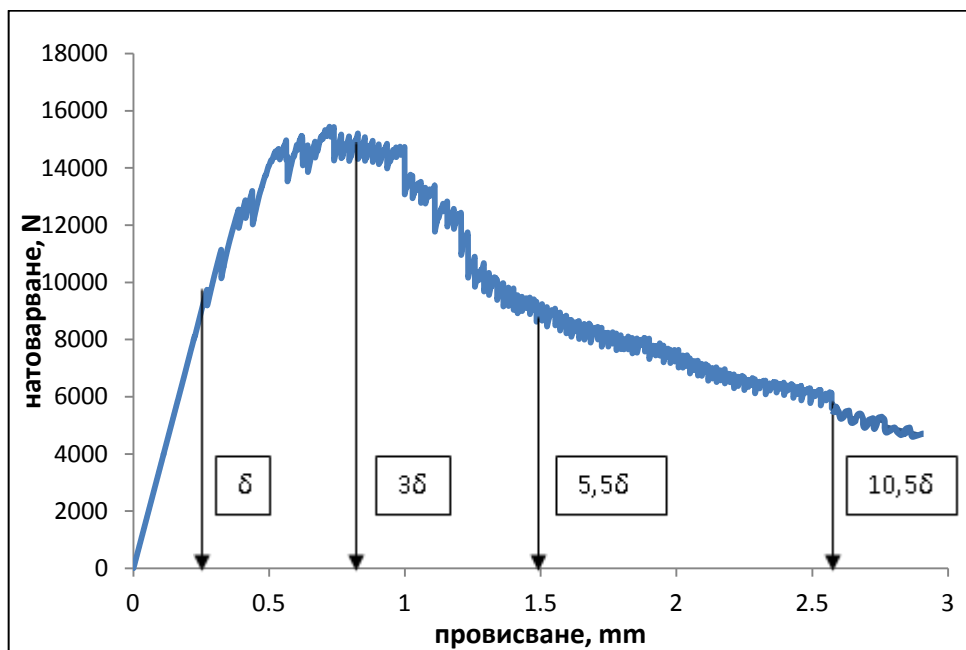
По тази причина, за да бъде отчетена появата на първа пукнатина, е направен съществен анализ на записаните диаграми „ $F-\delta$ ” и „ $F-\epsilon$ ” - (фиг. III. 7). В диаграмата „ $F-\delta$ ”, след дълъг участък, със зависимост близка до линейната, е отчетено формирането на първа пукнатина в композита. На същия момент в диаграмата „ $F-\epsilon$ ” се отчита също скок и промяна на наклона.



фиг. III. 7: Работни диаграми „ $F-\delta$ ” и „ $F-\epsilon$ ”

След това, съгласно методиката на ASTM C 1018-97, са изчислени т.нар. характерни точки на провисването от диаграмата „ $F-\delta$ ”, които са във функция на провисването  $\delta$ , получено при първа пукнатина. Тези характерни точки съответстват на провисвания  $3.\delta$  и  $5,5.\delta$  – фиг. III. 8.

Енергията на разрушение  $Gf$ , изразена в N.mm, се изчислява като площта под диаграмата, отчетена съответно до всяка една от характерните точки от графиката, т.е. като енергия за поява на първа пукнатина ( $Gf=A(\delta)$ ), енергия за провисване равно на  $3.\delta$  ( $Gf=A(3.\delta)$ ) и енергия за провисване равно на  $5,5.\delta$  ( $Gf=A(5,5.\delta)$ ). Тези стойности на енергията на разрушение (плещите) служат за определяне на индексите на пластично разрушение ( $I_5$  и  $I_{10}$ ) и на фактора  $R_{5,10}$  на остатъчна якост (виж гл. I. т. 5.4.1.2.1 и 5.4.1.2.2).



фиг. III. 8: Основни характеристики на работната диаграма „ $F-\delta$ ” при СВЯБ

Прилагането на стоманени влакна 1-2% по обем при СВЯБ не води до формиране на силно удължен падащ клон на диаграмата ‘натоварване-провисване’, което по-ясно се забелязва при увеличаване на количеството на влакна над 10% [Graybeal, 2005]. Тогава е възможно поведението на СВЯБ да стане близко до еласто-пластичното и двата фактора на остатъчна якост  $R_{5,10}$  и  $R_{10,20}$  да дадат стойности над 100. При СВЯБ обаче, с най-често използвано количество фибри от 2%, е достатъчно сравняването само на фактор  $R_{5,10}$ .

От всеки състав са изпитани 3 броя пробни тела призми 4/4/16 cm. Анализирани са диаграмите и е избрана най-представителната за съответния състав – например, при наличие на една диаграма, която се различава рязко от другите две, тя е елиминирана от анализа. Също така, елиминирани са резултати, при които се наблюдават отклонения, дължащи се на случайни фактори, например дефект в матрицата или друга нехомогенност.

#### 8.5.2 Определяне енергията на разрушение $G_f$ при фиксирано максимално провисване, съгласно препоръките на RILEM [RILEM 50-FMC]

Препоръките на RILEM50-FMC дават метод за изчисляване на енергията на разрушение  $G_f$  за влакнесто-армирани бетони. Тъй като те датират от 1985, те не са изготвени за СВЯБ, но анализът (виж гл. VI. т. 3.3) показва, че тази методика може да бъде приложена с цел оценка на влиянието на различни фактори.

Опитна постановка е три-точково огъване на пробните тела с размери 4/4/16 cm, с една концентрирана сила по средата, и подпорно разстояние от 10 cm. Поради много малкия размер на телата и спецификата на материала, е установено, че предписанието за подрязване от долната страна може да се пренебрегне. Тогава енергията на разрушение  $G_f$ , необходима

за реализирането на определено фиксирано провисване  $\delta_s$ , се изчислява по модифицирана формула (виж гл. I. т. 5.4.1.1.3), а именно:

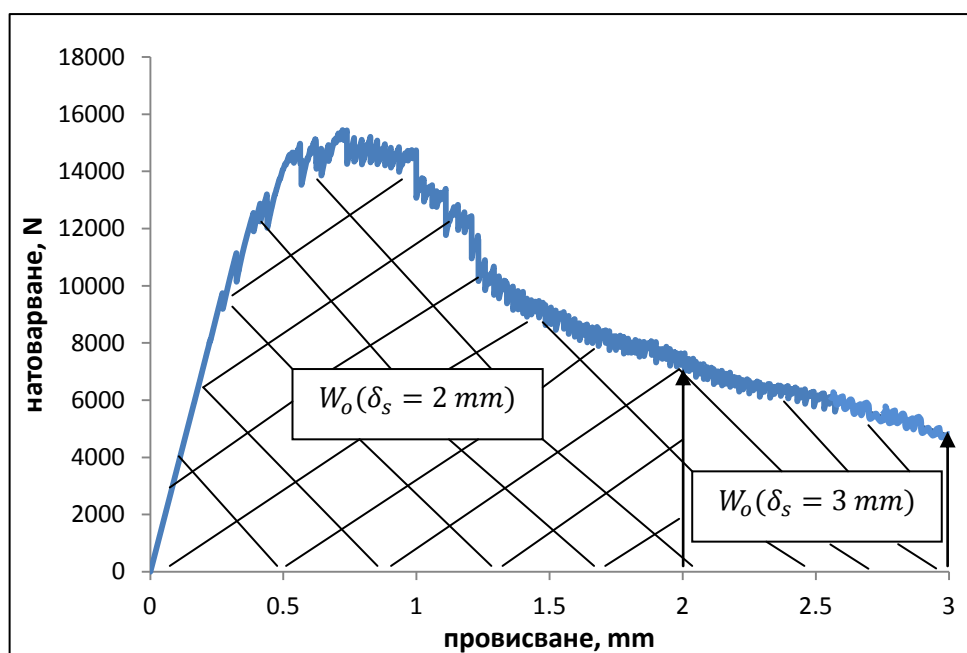
$$G_f = \frac{W_o + m \cdot g \cdot \frac{S_1}{L} \delta_s}{B \cdot h},$$

където:

- $W_o$  – площ под кривата, N.mm;
- $m$  – маса на гредата, kg;
- $g$  – земно ускорение, m/s<sup>2</sup>;
- $\delta_s$  – фиксирано провисване на гредата, mm;
- $S_1$  – отвор на гредата, mm;
- $L$  – дължина на гредата, mm;
- $B$  – широчина на гредата, mm;
- $h$  – височина на гредата, mm.

Поради нестандартния размер на гредите 4/4/16 cm (вместо залегналия в методиката 70/70/280 mm) и по-голямата очаквана деформативност на дисперсно-армирания СВЯБ, е избрано фиксирано провисване от  $\delta_s = 2$  mm и от  $\delta_s = 3$  mm (вместо 10 mm) – фиг. III. 10. Тази деформация се реализира в падащия клон на диаграмата, с което методът става съпоставим с методите предписани от ASTM C1018-97 и ASTM C 1609/C 1609 M-10.

От всеки състав са изпитани 3 броя пробни тела призми 4/4/16 cm. Анализирани са диаграмите и е избрана най-представителната за състава – например, при наличие на една диаграма, която се различава рязко от другите две, тя е елиминирана от анализа. Също така, елиминирани са резултати, при които се наблюдават отклонения, дължащи се на случайни фактори, например дефект в матрицата или друга нехомогенност.



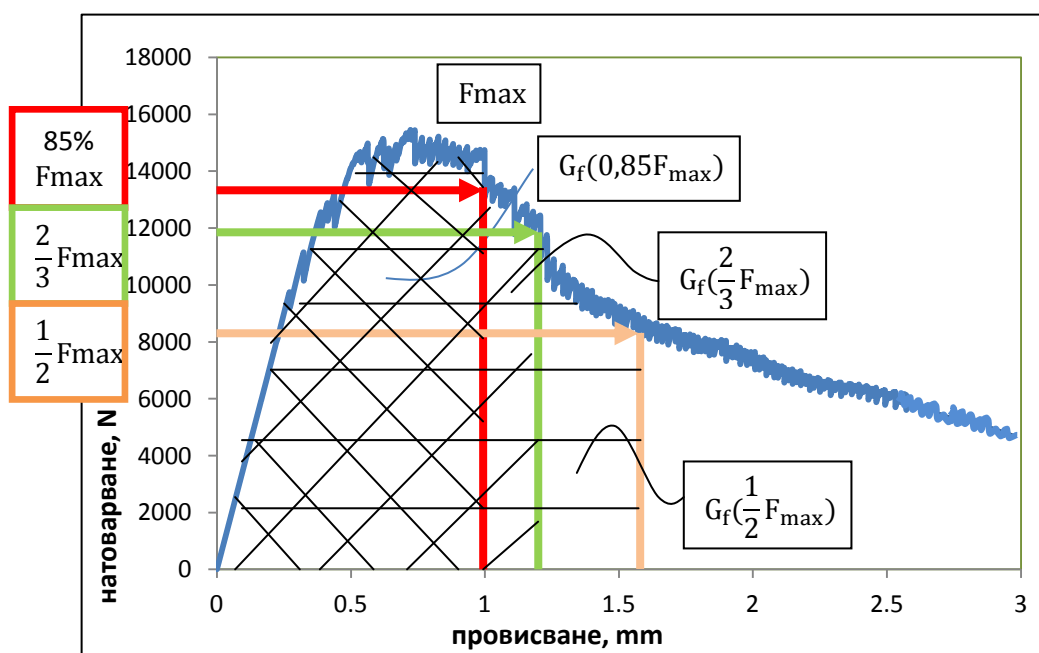
фиг. III. 9: Максимални стойности на провисване в работната диаграма „F-σ” при СВЯБ, за изчисляване на енергията на разрушение

### 8.5.3 Определяне енергията на разрушение $G_f$ , съответстваща на фиксирана остатъчна носимоспособност

Поведението между различните състави на СВЯБ е сравнявано при остатъчна носимоспособност от  $0,85 \cdot F_{max}$ ,  $\frac{2}{3} \cdot F_{max}$  и  $\frac{1}{3} \cdot F_{max}$ . При тези нива на натоварването отчетено съответното провисване и са изчислени площите  $A$ , които представят енергията на разрушение - фиг. III. 11.

Очевидно, тези стойности нямат отношение към проектирането на бетонни конструкции със СВЯБ, но позволяват да се оцени влиянието на различните рецептурни и технологични фактори, както и поведението на СВЯБ при екстремни въздействия.

Нивото на натоварване  $0,85 \cdot F_{max}$  се препоръчва от някои автори [Дойков, 2007]. Изборът на допълнителни нива от  $\frac{2}{3} \cdot F_{max}$  и  $\frac{1}{3} \cdot F_{max}$  е продиктувано от спецификата на СВЯБ, чиято деформативност предполага запазване на известна носимоспособност дълго време след достигане на максималното натоварване.



фиг. III. 10: Графично отчитане на стойностите на провисването в диаграмата ‘ $F$ - $\delta$ ’ при различни проценти остатъчна носимоспособност

От всеки състав са изпитани 3 броя пробни тела призма  $4/4/16$ cm. Анализирани са диаграмите и е избрана най-представителната за състава – например, при наличие на една диаграма, която се различава рязко от другите две, тя е елиминирана от анализа. Също така, елиминирани са резултати, при които се наблюдават отклонения, дължащи се на случайни фактори, например дефект в матрицата или друга нехомогенност.



## ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА, III-ТА ГЛАВА

**Aïtcin P.-C.:** *High Performance Concrete*, Modern Concrete Technology, Taylor & Francis, London and New York, **1998**;

**ASTM C469 / C469M:** Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression;

**ASTM C 1018-97:** Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading);

**ASTM C 1609/C 1609M-10:** Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading);

**Bierwagen D., Abu-Hawash.:** Ultra High Performance Concrete Highway Bridge, *Proceeding of the Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Ames, Iowa, August, **2005**, Pages:1-14;

**Emerson M.:** Mechanisms of water absorption by concrete, *Protection of Concrete*, Ed R.K. Dhir J. W. Green, E& FN Spon, London, **1990**, Pages: 689-700

**Frommenwiler A.:** New generation of superplasticizers for high performance concrete (HPC), Switzerland, **1998**;

**Geisenhanslüke C., Schmidt M.:** Methods for Modelling and Calculations of High Density Packing for Cement and Fillers in UHPC. *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages 303-311;

**ISO 1920-10-2010:** Determination of static modulus of elasticity in compression;

**Graybeal B.** Characterization of the behaviour of Ultra-high performance concrete, *dissertation*, University of Maryland, **2005**;

**Kuder k., Ozyurt N., Mu E., Shah M. :** Rheology of fiber-reinforced cementitious materials, *Cement and concrete Research*, v.37, **2007**, Pages : 191-199;

**Orgass M., Klug Y.:** Fiber Reinforced Ultra-High Strength Concretes. *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages 637-647;

**Park J. J., Kang S. T., Koh, K. T., Kim S. W.:** Influence of the Ingredients on the Compressive Strength of UHPC as a Fundamental Study to Optimize the Mixing Proportion. *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 105-113;

**Richard P., Cheyrezy M.:** Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and concrete Research*, v. 25, i.7, October **1995**, Pages: 1501-1511;

**RILEM Technical Committee 50-FMC:** Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams;

**Shah S., Weiss W.:** Ultra-High Performance Concrete: A look to the Future, *Presented at the Zia Symposium during the ACI Spring convention*, Houston, **1998**.

**Tafraoui A., Escadeillas G., Lebaili S., Vidal T.:** Metakaolin in the formulation of UHPC. *Construction and Building Materials*, v. 23, i. 2, February **2009**, Pages 669-674;

**Tanaka K., Kurumisawa K.:** Development of technique for observing pores in hardened cement paste, *Cement and Concrete Research*, v.32, i.9, September **2002**, Pages: 1435-1441;

**Teichman T., Schmidt M.:** Influence of the packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC. *Proceeding First International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 313-323;

**Wirquin E., H. Kada and P. Herin,** Development of a Plane Isothermal Calorimeter: Relating Apparent Activation Energy of Concrete and the Corresponding Mortar, *Journal of ASTM International*, v.. 5, v.1, Paper ID JAI101057, January, **2008**;

**Wirquin E., Hadjieva-Zaharieva R., Buyle-Bodin F.:** Use of water absorption by concrete as a criterion of the durability of concrete-application to recycled aggregated concrete, *Materials and Structures*, v.33, i.6, January **2000**, Pages: 403-408;

**Yazini H. Yardimci M. Y., Aydin S., Karabulut A. Ş.:** Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials*, v. 23, i. 3, August **2008**, Pages 1223-1231;

**БДС EN 12350-3:2009:** Изпитване на бетонна смес. Част 3: Изпитване по Vebe;

**БДС EN 1015-3:2001/A2:2008:** Методи за изпитване на разтвор за зидария. Част 3: Определяне на консистенцията на пресен разтвор чрез стръскваща масичка;

**БДС EN 12620:2013:** Добавъчни материали за бетон;

**БДС EN 1008: 2003:** Вода за направа на бетон. Изисквания за вземане на проби, изпитване и оценяване на годността на вода, включително на рециклирана вода от производството на бетон като вода за направа на бетон;

**БДС EN 12350-3:2009:** Изпитване на бетонна смес. Част 3: Изпитване по Vebe;

**БДС EN 12350-7:2009:** Изпитване на бетонна смес. Част 7: Определяне на съдържанието на въздух. Методи с налягане;

**БДС EN 480-2:2006:** Химични добавки за бетон, разтвор и инжекционен разтвор. Методи за изпитване. Част 2: Определяне на времето на свързване;

**БДС EN 12390-1:2012:** Изпитване на втвърден бетон. Част 1: Форма, размери и други изисквания за пробни тела и кофражни форми;

**БДС EN 12390-2:2009:** Изпитване на втвърден бетон. Част 2: Приготвяне и отлежаване на пробни тела за изпитване на якост;

**БДС EN 12617-4:2003:** Продукти и системи за предпазване и възстановяване на бетонни конструкции. Методи за изпитване. Част 4: Определяне на съсъхване и набъбване;

**БДС EN 197-1:2002:** Цимент. Част 1: Състав, технически изисквания и критерии за съответствие за обикновен цимент;

**БДС EN 196-1:2006:** Методи за изпитване на цимент. Част 1: Определяне на якост;

**БДС EN 12390-3:2009:** Изпитване на втвърден бетон. Част 3: Якост на натиск на пробни тела;

**БДС EN 12390-6:2009, Анекс А:** Изпитване на втвърден бетон. Част 6: Якост на опън при разцепване на пробни тела;

**БДС EN 13892-3:2005:** Методи за изпитване на подови замазки. Част 3: Определяне на устойчивост на износване – Bohme;

**БДС EN 13892-4:2003:** Методи за изпитване на подови замазки. Част 4: Определяне на устойчивост на износване – VCA;

**БДС EN 13892-5:2003:** Методи за изпитване на подови замазки. Част 5: Определяне на устойчивост на износване посредством въртящо се колело. Методи за подови замазки, използвани като износоустойчив слой;

**БДС EN 1992-1-1:2005/NA:2011: Еврокод 2:** Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради. Национално приложение;

**Бошнаков Д.:** Механично активирана вода за направата на бетон и влиянието ѝ върху якостта на натиск. *Годишник на УАСГ*, т. XLVI, **2011-12г.**

**Вознесенский В. и др.,** *Современные методы оптимизации композиционных материалов*, "Будівельник", Киев, **1983г.**

**Дойков, И.:** Подобряване на якостните и деформативните свойства на циментови композити посредством модифицирането им с акрилатни вододиспергируеми полимери, *дисертация*, декември **2007;**

**Киролова Е.:** Адсорбционни капацитети и физико-химични свойства на микропорести адсорбенти, *дисертация*, Химикотехнологичен и металургичен университет, **2013;**

**Симеонов Й., Даракчиев Б., Николов И.:** *Строителни материали*, София, Техника, 1991;

[http://www.cptechcenter.org/t2/documents/10PracticalSACTTCC-NCC9-23-08\\_000.pdf](http://www.cptechcenter.org/t2/documents/10PracticalSACTTCC-NCC9-23-08_000.pdf) (последно посетено на 03.01.2014);

[http://physicalchemistryresources.com/Book5\\_sections/TA\\_Differential%20Thermal%20AnalysisHTML\\_1.htm](http://physicalchemistryresources.com/Book5_sections/TA_Differential%20Thermal%20AnalysisHTML_1.htm) (последно посетено на 03.01.2014);



## IV ГЛАВА

### ОПТИМИЗИРАНЕ НА СЪСТАВА НА СВЯБ





## 1. Особенности при проектиране на състава на СВЯБ

Няма общоприета методика за проектиране състава на СВЯБ. С малки изключения [Teichmann, 2004; Geisenhanslüke, 2004; Droll, 2004], литературните източници не дават начините, по които е достигнато до един или друг състав на СВЯБ. Освен това, проектирането на състава зависи изключително от вида и характеристиките на изходните компоненти, така че всяка методика се нуждае от допълнителна проверка и адаптиране.

Основните особености при проектиране на СВЯБ са свързани с липсата (обикновено) на ЕДМ, който да създава скелета на бетона, да ограничава деформациите на матрицата (от свързващо вещество) и да осигурява якостните свойства посредством висок Е-модул. Класическият подход при проектиране на състава на обикновения бетон, според който матрицата от свързващо вещество или цименто-пясъчния разтвор запълват празнините между зърната на ЕДМ и ги обвиват, за да създадат обработваема и плътна смес, тук е неприложим. Съсхвателните процеси на матрицата се ограничават от пясъчната фракция, както и от влакнестата армировка, а якостта се осигурява от самата матрица и от дисперсната армировка от стоманени влакна.

Главната цел при проектирането на СВЯБ е да се създаде максимално плътна матрица, в която да бъде разположена дисперсна армировка от влакна. Постигането на тази цел се осъществява с подбор на фино-зърнестите компоненти и изключително редуциране на В/Ц (под 0,24). Друга съществена особеност при СВЯБ е, че фините компоненти, освен, че са със силно развита специфична повърхност, което налага употребата на завишени количества суперпластифициращи добавки, са и повече или по-малко активни при определени условия на втвърдяване (например топло-влажностна обработка).

При СВЯБ от важно значение е да се осигури добро сцепление между матрицата и влакната, което се постига най-често с топло-влажностна обработка. Тя се използва много често при изготвяне на елементи от СВЯБ в заводски условия, защото съдейства и за по-пълната реакция на активните компоненти в системата и води до модифициране на микроструктурата [Cheyrezy, Marat & Frouin, 1995; Scheydt, 2012]. По тази причина, възможностите за прилагане на пропарване и автоклавиране и техните последици, следва да се отчитат при проектиране на състава на СВЯБ.

Тъй като видът и качествата на изходните компоненти са определящи за състава на СВЯБ, в резултат на анализ на литературните източници и наличността/достъпността на нашия пазар на определени материали, бе прието СВЯБ да се проектира с използването на цимент СЕМ I 52,5, микросилициев прах, кварцово брашно и кварцов пясък и два вида влакнеста армировка (стоманени и полипропиленови влакна), чиито характеристики са представени в предходната глава (виж гл. III. т. 3.8).

Съгласно възприетия подход за проектиране на състава на СВЯБ посредством постепенно усложняване на системата (виж гл. III. т. 1.), оптимизирането на състава става на няколко етапа:



- създаване на моделни състави за определяне на границите на някои базови рецептурни параметри, върху които са проведени няколко серии от предварителни изследвания;
- модифициране на скелета от зърнести материали на матрицата;
- оптимизиране на състава на матрицата чрез прилагане на теорията на математическото планиране на експеримента и
- създаване на влакнестоармирани композити от СВЯБ посредством използване на два вида дисперсна армировка.

## 2. Резултати от изследванията с предварителен характер

Отначало, с оглед избор на суперпластифицираща добавка, е изследвано действието на 5 вида поликарбоксилатни суперпластификатори. При оценката на действието на суперпластификатора се има предвид не само полученото разстилане, но и общата обработваемост на сместа (по-кратко необходимо време за разбъркване, липса на водоотделяне, поведение при полагане в кофражните форми), както и якостните характеристики в по-ранна възраст (7ми ден). Установено е, че независимо от търговската марка на добавката, когато тя е в рамките на 1% от масата на цимента, водо-циментното отношение не може да бъде по-ниско от 0,33 (за да се получи пластифициране на сместа) и разстилането на сместа е от порядъка на 10-15 cm, което е недостатъчно за добро уплътняване в кофражните форми и се отразява върху постигането на относително ниски якости за СВЯБ, особено по отношение на якостта на натиск - табл. IV. 1.

табл. IV. 1: Представяне на пластифициращия ефект на различни поликарбоксилатни добавки (1% от масата на цимента) върху якостите на моделен състав, с В/Ц=0,33 и Ц= 778 kg/m<sup>3</sup>

Суперпластификатор- означение	Фирма производител	Разстила не (cm)	Якост на опън при огъване на 7ми ден (MPa)	Якост на натиск на 7ми ден (MPa)
ЛСТ	Полипласт	10,0	11,0	61,2
ViscoCrete500	SIKA	11,5	11,0	72,3
PC280	Don Construction	15,0	10,0	76,0
NRG 1020	MAPEI	14,5	9,6	76,5
25C40	Карбопласт	12,5	10,7	65,9

От получените първоначални резултати са селектирани добавките на SIKA®, на Don Construction® и MAPEI® като добавки с най-добър общ ефект са използвани във втората серия предварителни опити. В тях съдържанието на химичната добавка е увеличено, както и количеството цимент – на 850 kg/m<sup>3</sup>, а водо-циментно отношение е варирано в рамките на 0,20 до 0,25. Включени са и три добавки от серията Glenium на BASF® (по литературни данни те са сред най-използваните добавки за направата на СВЯБ [Empelmann, 2008; Heinz, 2012]). Освен горните критерии, при оценка на ефекта на добавките е анализиран и процесът на набиране на

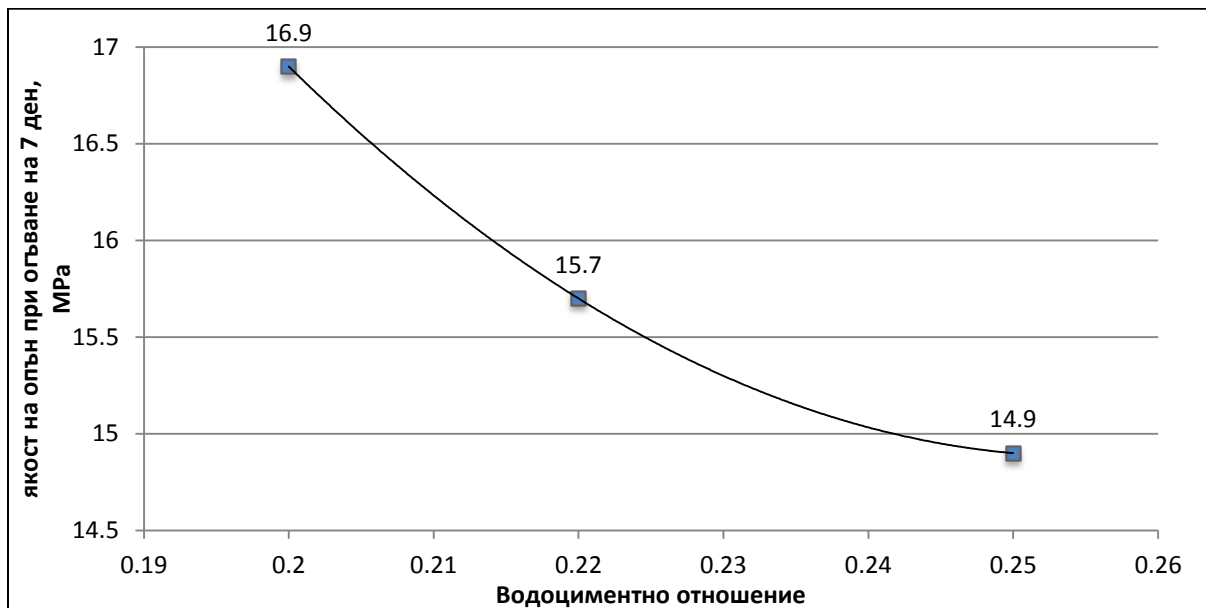
якост до 28-ми ден. Резултатите от втората серия на предварителните опити са обобщени в табл. IV. 2. Те доказват, че направените промени в моделните състави са целесъобразни – обработваемостта е подобрена, въпреки значително по-ниското В/Ц отношение, постигнати са по-високи ранни якости на опън при огъване и на натиск, както и задоволителни резултати за якостта на натиск на 28-я ден.

табл. IV. 2: Влияние на В/Ц отношение върху моделни състави с различни химически добавки, вложени в 2,5% от масата на цимента при съдържание на Ц=850 kg/m<sup>3</sup>

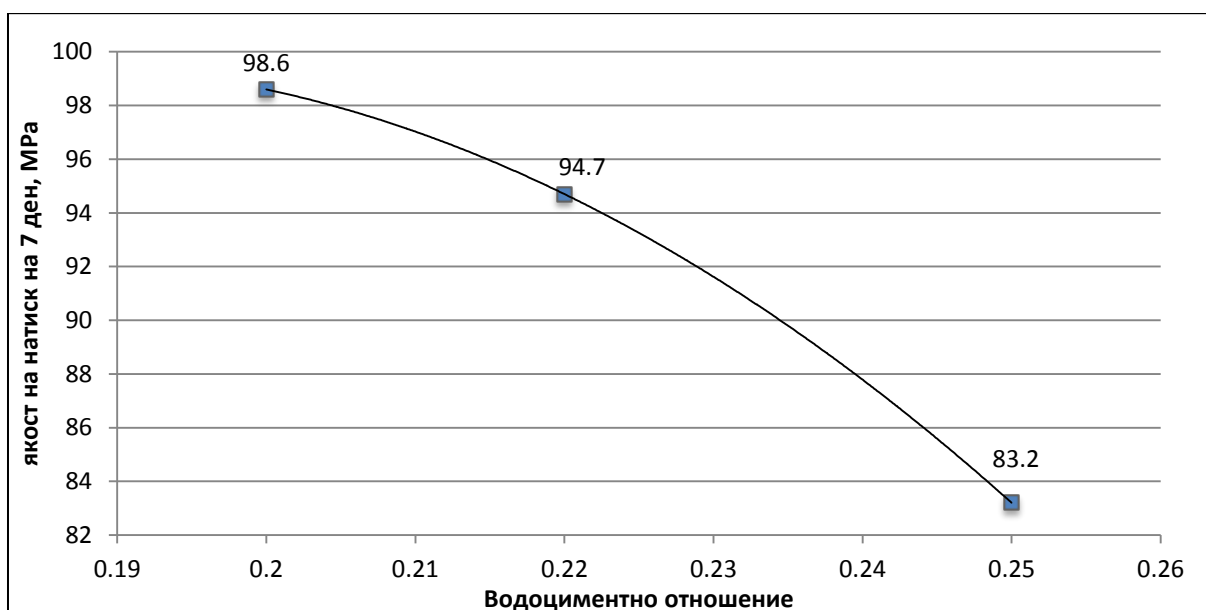
В/Ц	Суперпластифицираща добавка	Разстилане cm	Якост на опън при огъване на 7ден в МПа	Якост на натиск на 7ден в МПа	Якост на натиск на 28 ден в МПа
0,25	PC 280	16,0	14,9	83,2	107,0
0,22	PC 280	15,5	15,7	94,7	119,2
	ViscoCrete	18,0	14,9	111,0	126,4
	Glenium 300	15,5	11,9	103,9	125,3
	Glenium 440	19,5	12,5	121,8	131,2
	Glenium 51	17,5	13,3	103,8	143,7
	NRG 1020	14,0	10,0	83,0	123,0
0,20	PC 280	11,5	16,9	98,6	132,0

По отношение обаче на обработваемостта, при смесите с В/Ц под 0,22, разстилането силно се редуцира (до 11,5 cm при използване на PC 280). Това създава определени технологични проблеми (необходимост от много дълго време за забъркване, трудности при полагане и уплътняване в кофражните форми), което създава риск от възникването на по-голямо количество макродефекти в структурата на СВЯБ.

Фиг. IV. 1 илюстрира зависимостта на якостта на опън при огъване от водо-циментното отношение от 0,2 до 0,25, а фиг. IV. 2 дава как се променя якостта на натиск. Установена е категорична тенденция, подобно при обикновените бетони, че якостта се увеличава значително (с до 20 % при якостта на натиск) с намаляване на В/Ц, като зависимостите могат да се опишат с парабола.



фиг. IV. 1: Изменение на якостта на опън при огъване на 7 ден на моделен състав в зависимост от В/Ц отношение (съдържание на цимент  $850 \text{ kg/m}^3$  и 2,5% суперпластифицираща добавка РС 280)



фиг. IV. 2: Изменение на якостта на натиск на 7 ден на моделен състав в зависимост от В/Ц отношение (съдържание на цимент  $850 \text{ kg/m}^3$  и 2,5% суперпластифицираща добавка РС 280)

Третата серия опити от предварителните изследвания се насочи към определяне на границите на вариране на добавките от серията *Glenium*, тъй като те имат най-добър пластифициращ ефект. Повишаването на суперпластификатора от 2% на 3% води до значително увеличаване на разстилането на сместа, до намаляване на времето за разбъркване и до полесното ѝ полагане и уплътняване. Те, от своя страна, позволяват постигането на хомогенна структура, което води до известно повишаване на якостта, по-изразено в якостта на опън при огъване (24%). Оптимални резултати се очертават за количество на суперпластификатора от 2,5% (табл. IV. 3).

табл. IV. 3: Влияние на количеството на суперпластификатора *Glenium 440* върху якостите на опън при огъване и натиск на 7ми и 28ми ден, при моделен състав с В/Ц=0,22

Количество суперпластификатор	Време до протичане на сместа в sec	Разстилане в cm	Якост на опън при огъване на 7ден в МПа	Якост на натиск на 7ден в МПа	Якост на натиск на 28 ден в МПа
2,0%	60	15,0	11,9	110,2	123,12
2,5%	40	19,5	12,5	121,8	131,19
3,0%	30	22,0	15,45	123,12	133,65

Наред с изследването на обработваемостта на моделните състави е извършено и изследване за времето за запазване на консистенцията на двата суперпластификатора с най-добър ефект – *Glenium 440* и *Glenium 51*. След забъркване, през интервал от 15 минути, смесите са вибрирани (на вибро-маса с 3000 вибрации в минута, според EN 12390-2:2009) в продължение на 30 sec, след което е измерено разстилането им на стръскваща маса. Това изпитване продължава до началото на свързване на циментовата паста (предварително определено на 140 min). И при двете смеси не се наблюдава намаляване на обработваемостта на моделните състави с тези добавки, тъй като получената бетонна смес е силно тиксотропна.

Кинетиката на якостта на натиск при различните смеси е различна – най-голям прираст (38%) между 7-ми и 28-ми ден дава съставът с *Glenium 51*.

Установено е, че водо-циментно отношение от порядъка на 0,22 позволява постигането на якости на матрицата, характерни за СВЯБ. Намалението на В/Ц от 0,33 до 0,22 води до нарастване на якостта на опън при огъване с около 50%.

Резултатите от изследванията с предварителен характер, проведени върху моделни състави, потвърждават литературните данни, че основно средство за повишаване на обработваемостта на смесите на СВЯБ е влагането на по-високо (от това при обикновените бетони) съдържание на суперпластифициращата добавка.

Като цяло, смесите с по-добра обработваемост (разстилането трябва да е най-малко 13-15 cm) имат и по-високи якости, тъй като се намалява количеството на макродефектите (нехомогенност, шупли, въвлечен въздух и др.). При моделните състави оптималното й съдържание е от порядъка на 2,5% от масата на цимента. Комплексната оценка за действието на суперпластификаторите открии добавката *Glenium 51* като най-подходяща за направата на СВЯБ в български условия.

### 3. Модифициране на скелета от зърнести материали на матрицата

Както бе коментирано при прегледа на литературните данни, постигането на забележителни якостни показатели на СВЯБ се дължи не само на влагането на големи количества цимент и ниските водоциментни отношения (т.е. силно се ограничават капилярните пори), но и на създаването на много плътна макро- и микроструктура, резултат от използването на материали с подобрена зърнометрия, сред които и активни минерални добавки. Чрез

прилагането на топло-влажностна обработка се постига вторично взаимодействие на част от компонентите на СВЯБ с оглед модифициране и подобряване на матрицата от една страна и заздравяване на преходната зона между матрицата, добавъчния материал и влакнестата армировка от друга.

От различните методи за проектиране на зърнометричния състав на СВЯБ, представени в литературния обзор (виж гл. I. т. 2.3) са избрани два – метод на пространствено уплътняване и метод на референтни зърнометрични криви, чийто ефект е оценен с лабораторни изпитвания.

### 3.1 Метод чрез пространствено уплътняване

Приложеният метод следва теорията за пространствено уплътнена зърнометрия, според която около всяка една частица трябва да има поне два слоя обвивки със зърна от следващата по размер фракция. *P. Richard* и *M. Cheyrezy* адаптират тази постановка към СВЯБ и установяват, че за максимална компактност на скелета от зърнестите материали, средните диаметри на две последователни фракции трябва да се отличават 13 пъти. С други думи,

$$d_{\text{пясък}} > 13 \cdot d_{\text{цимент}} > 13 \cdot d_{\text{кварцово брашно}} > 13 \cdot d_{\text{МСП}}$$

За да бъде постигната тази зависимост, към състава на бетона е добавена още една съставка – смлян кварцов пясък (кварцово брашно). При преобладаващ диаметър на частиците на пясъка от 0,5 mm, на цимента от 0,030 mm, на МСП от 0,00020 mm, като оптимална се очертава големина на зърната на кварцовия пясък от 20 μm. Средният размер на използвания смлян кварцов пясък е около 3 μm [виж г. III. т. 2.3].

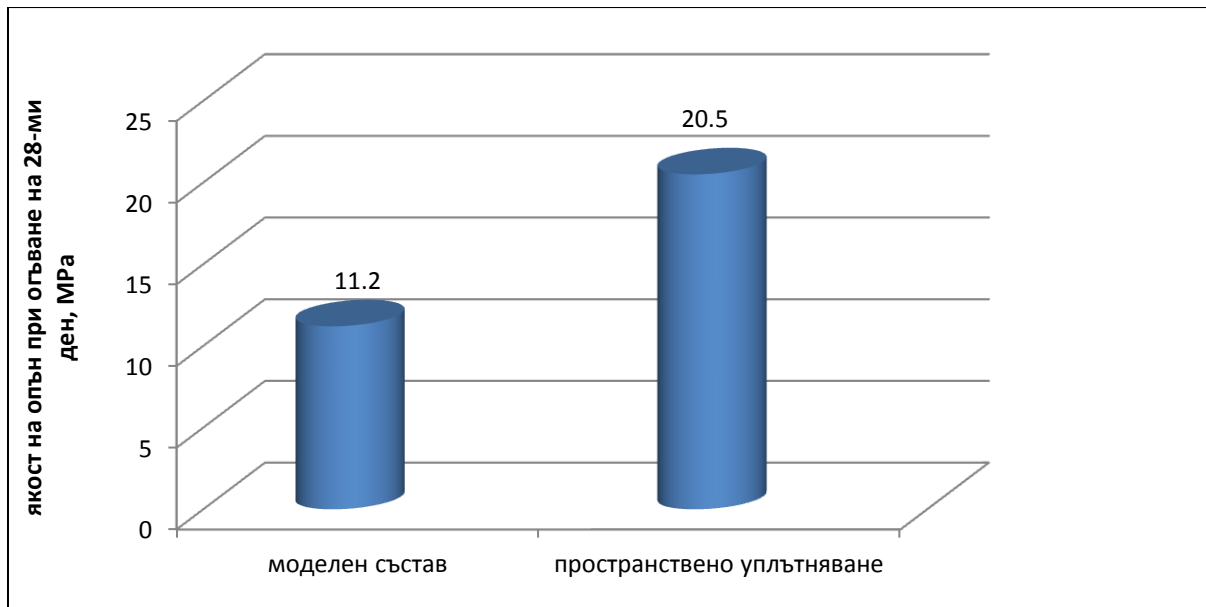
Допълнителен ефект от влагането на кварцовия пясък може да се търси и при съставите, подложени на топло-влажностна обработка, тъй като при нея той влиза във взаимодействие с МСП и с продуктите от хидратацията на цимента.

Прилагането на този подход води до композирането на Състав 1 – табл. IV. 4. Той е сравнен с моделния състав, използван в предварителните изследвания. При състав 1 част от цимента е заменена с кварцово брашно, следователно, общото количество на МСП е също по-малко.

табл. IV. 4: Състав 1, създаден по метода на пространственото уплътняване и състав 2 - моделен състав

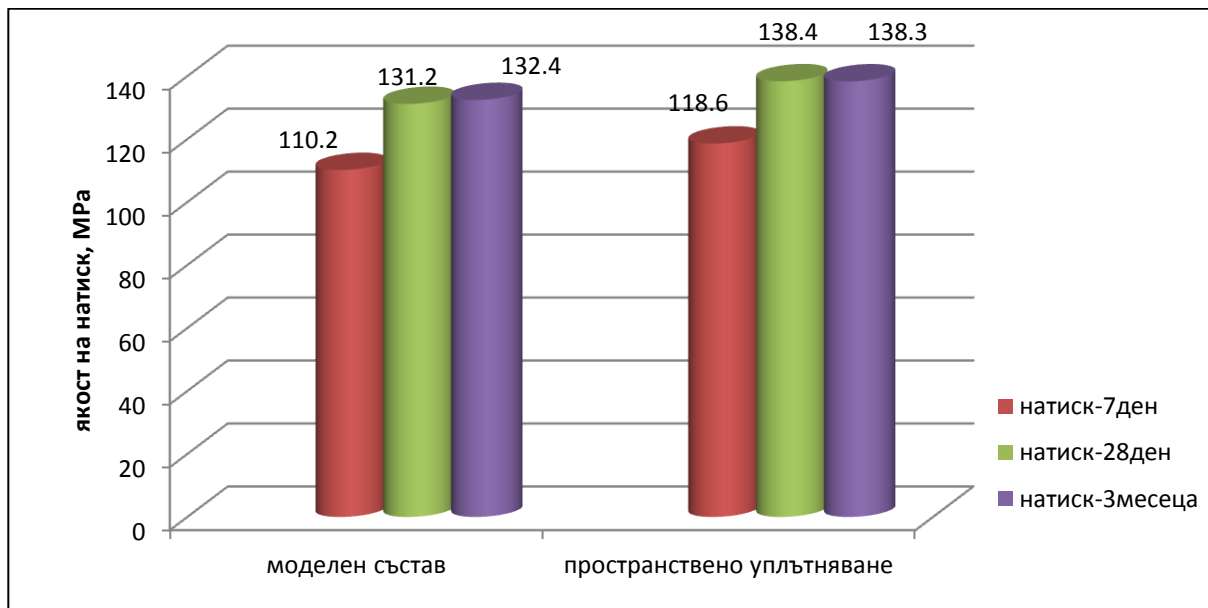
Материали	Единици	Състав 1 (Пространствено уплътняване)	Състав 2 (Моделен състав)
Цимент	kg/m <sup>3</sup>	770	840
Кварцово брашно	kg/m <sup>3</sup>	200	-
Пясък 0,125-2,0	kg/m <sup>3</sup>	1200	1180
Отношение на МСП към цимент	-	0,20	0,20
Отношение на пластификатор към цимент	-	0,025	0,025
Водо-циментно отношение	-	0,22	0,22

Ефектът от модифицирането, съгласно преработената теорията за пространственото уплътняване на *P. Richard* и *M. Cheyrezy* (състав 1), на моделния състав (състав 2), е много силно изразен по отношение на якостта на опън при огъване. Увеличението е почти със 100%, въпреки по-малкото количество цимент – фиг. IV. 3. Този резултат потвърждава теоретичната обосновка за влагането на кварцово брашно - редуциране на общото количество свързващо вещество, попълване пространствата между отделните зърна и създаване на обвивки с необходимата дебелина около всяко зърно.



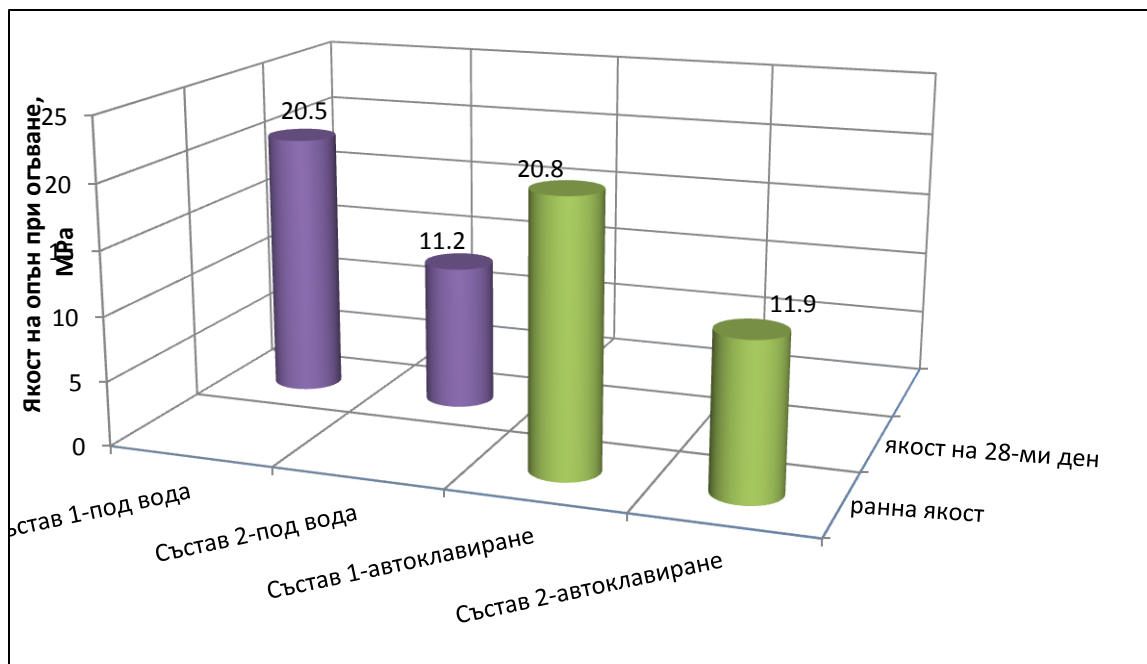
фиг. IV. 3: Сравнение в якостта на опън при огъване на 7 ден при моделен състав и състав, изготвен по модела на пространственото уплътняване

По отношение на якостта на натиск, практически не се наблюдава абсолютно увеличение при модифицирания (Състав 1) спрямо моделния състав (Състав 2), ходът на нарастване на якостите при отлежаване под вода също е идентичен, но отношението якост/количество свързващо вещество при Състав 1 е много по-добро, т.е. той би бил икономически по-изгоден – фиг. IV. 4.



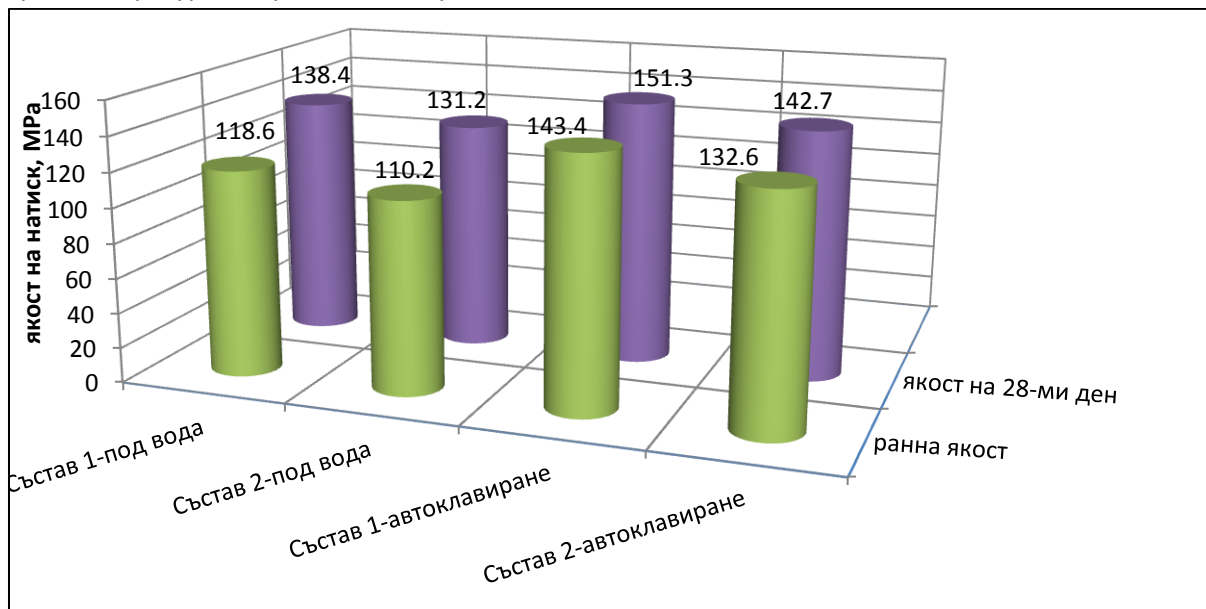
фиг. IV. 4: Сравнение в якостта на натиск при състав, изготвен по модела на пространственото уплътняване (състав 1) и моделен състав (състав 2)

В последствие е отчетено влиянието на топло-влажностна обработка върху уплътнената структура на СВЯБ, реализирано в ранна възраст – веднага след декофриране (фиг. IV. 5). Автоклавната обработка на състав 1 се отразява моментално на якостта на опън при огъване в ранна възраст, като достига тази на 28-ми ден на пробите отлежали във вода. При състав 2 термичната обработка води до над 5% по-големи стойности за якост на опън при огъване след самата обработка, в сравнение с получените стойност на 28-ми при нормални условия на отлежаване.



фиг. IV. 5: Влияние на топло-влажностната обработката върху якостта на опън при огъване върху състав 1 (метода на пространствено уплътняване) и състав 2 (моделен състав)

При сравняване на якостите на натиск на двата състава след топло-влажностна обработка (фиг. IV. 6), е наблюдавано пропорционално превишаване на показателите с 20% след автоклавиране, съответно получени непосредствено след автоклавиране, в сравнение с пробните тела на 28-ми ден, отлежали под вода. А при сравняване на якостта на натиск в ранна възраст след автоклавиране и след 28-ем дена отлежаване под вода, отново превес се отчита при температурно обработените проби.



фиг. IV. 6: Сравнение в якостта на натиск при моделен състав и състав, изготвен по модела на пространственото уплътняване при различни условия на отлежаване

Изготвените първоначални изследвания на състави по метода на пространственото уплътняване, без ограничения на максималния използван диаметър, дават положителни резултати. В по-голяма степен се забелязва ефекта му след допълнително прилагане на топло-влажностна обработка, особено при якостта на опън при огъване. Използването на метода служи за доказателство за ефективността от влагането на кварцово брашно и неговото отражение върху механичните показатели на СВЯБ след автоклавиране.

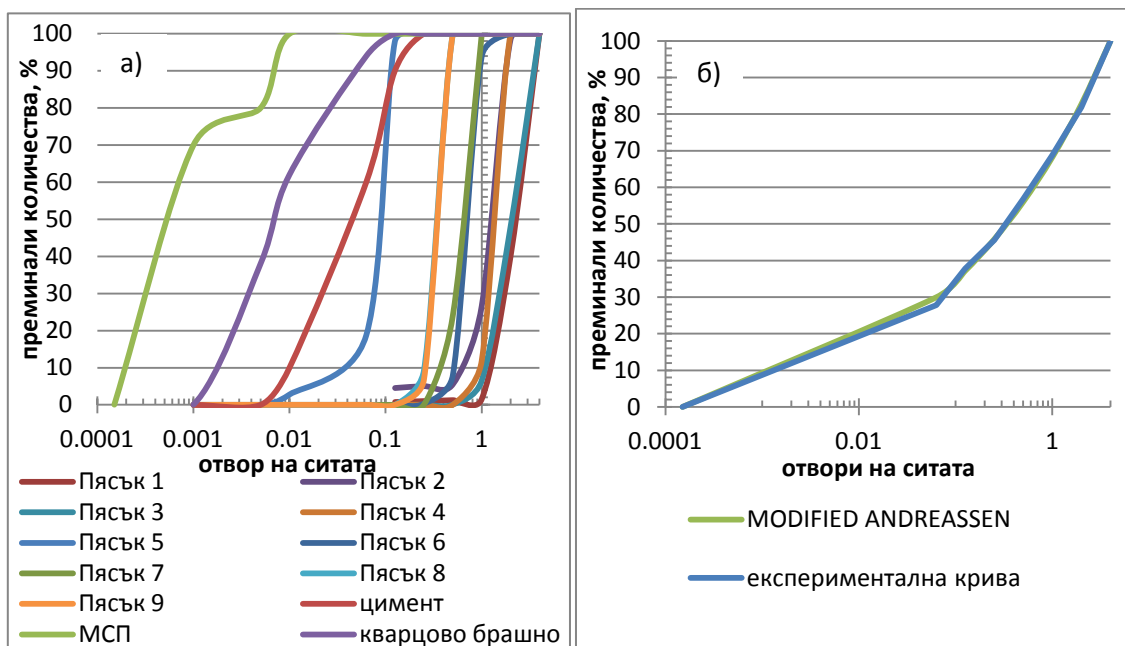
### 3.2 Метод чрез използване на референтна зърнометрична крива

При прилагане на метода чрез използване на референтни криви основната цел е да се построи такава зърнометрична крива на скелета от зърнести материали, която да описва максимално точно референтна крива, даваща теоретично най-голяма компактност на скелета (виж. г. I т. 2.3.2). От теоретичните криви е избран модифицирания модел на *Andreassen*, т.нар. *Modified Andreassen* [Dinger & Funk, 1993], тъй като по литературни данни той дава най-добри резултати [Myhre, 1996].

Въз основа на комбинация между количествата на изходните материали, в съответствие с тяхната зърнометрия – фиг. IV. 7-а, е получена зърнометрична крива на СВЯБ (при  $D_{max}=4$  mm), която описва максимално точно теоретичната, построена съгласно модела – фиг. IV. 7-б.

При вариране на максималния диаметър на използваните материали, всеки път е изготвяна нова референтна крива, която е описвана с експериментална, с различно съотношение между отделните компоненти.





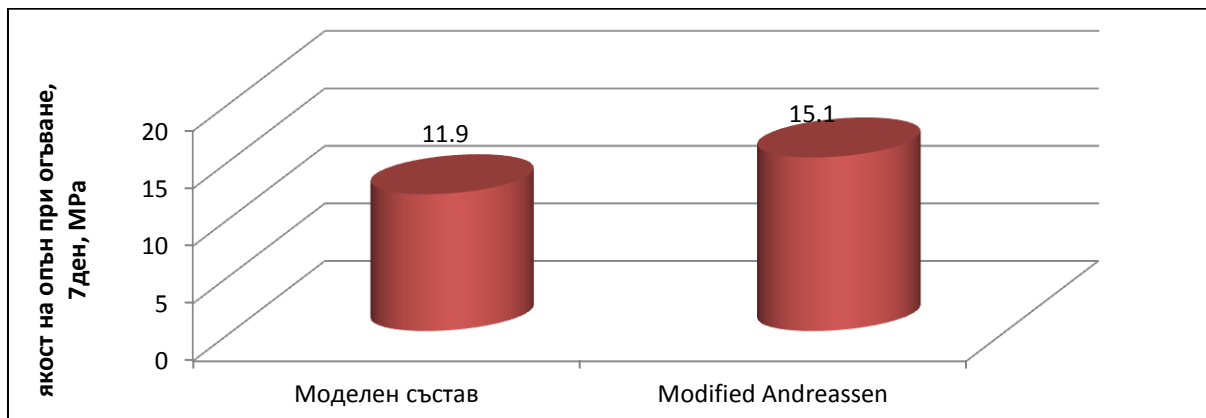
фиг. IV. 7: Зърнометрични криви по модела на *Modified Andreassen*: а) използвани материали по фракции б) сумарна крива от всички използвани материали – теоретична и експериментална за  $D_{max}=7\text{ mm}$

В табл. IV. 5 е направена съпоставка между отделните количества материали, използвани за направата на един кубичен метър СВЯБ с модифицирана матрица, и моделния състав. Установено е, че е необходимо използването на петте фракции пясък (в това число и кварцово брашно), но е необходимо по-малко количество цимент за постигане на максимална плътност на скелета от зърнести материали.

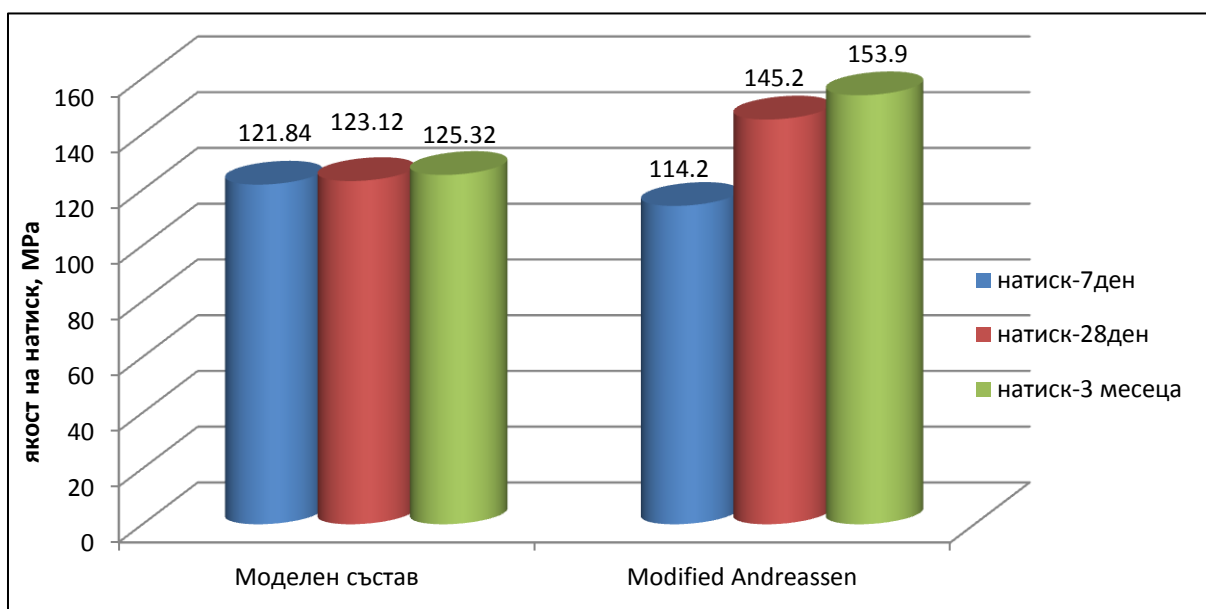
табл. IV. 5: Съпоставка между състав изготвен според метода *Modified Andreassen* и моделен състав

Материали	Единици	Според <i>Modified Andreassen</i>	Моделен състав
Цимент	kg/m <sup>3</sup>	930	840
Пясък 0,125-2,0	kg/m <sup>3</sup>	-	1180
Пясък-фракция 0,25-0,5 mm	kg/m <sup>3</sup>	400	
Пясък-фракция 0,125-0,25 mm	kg/m <sup>3</sup>	190	
Пясък-фракция 0,063-0,125 mm	kg/m <sup>3</sup>	40	
Кварцово брашно-фракция 0-0,063 mm	kg/m <sup>3</sup>	390	-
Отношение на МСП към цимент	-	0,30	0,20
Отношение на пластификатор към цимент	-	0,035	0,025
Водо-циментно отношение	-	0,20	0,22

Ефектът от прилагането на метода на референтната крива по *Modified Andreassen* е илюстриран чрез якостите получени съответно при опън при огъване (фиг. IV. 8) и при натиск (фиг. IV. 9) сравнени с моделния състав. Приносът на по-плътната структура в якостта на натиск е над 15-20%, а в якостта на опън при огъване над 20%. Наблюдава се тенденции към увеличаване на якостните показатели във времето.



фиг. IV. 8: Влияние на различни методи за уплътняване скелета на бетона върху якостта на опън при огъване на 7-ми ден при В/Ц отношение 0,2, при моделен състав и състав по метода на *Modified Andreassen*



фиг. IV. 9: Влияние на различни методи за уплътняване скелета на бетона върху якостта на натиск на 7-ми и 28-ми ден и 3-ти месец, при В/Ц отношение 0,2, при моделен състав и състав по метода на *Modified Andreassen*

Табл. IV. 6 илюстрира как съставът на матрицата се отразява на свойствата на СВЯБ. Извършено е сравнение между моделния състав и двата разглеждани метода за постигане на максимална плътност на матрицата. При модифицирането на матрицата се наблюдава намаление на обработваемостта, тъй като модифицираните състави имат много по-развита специфична повърхност на кварцовите частици и по-малко количество цимент, т.е. дебелината на обвивките от циментово тесто са най-тънки (и следователно триенето между частичките е по-голямо). От друга страна, постигнатата обработваемост от 13-14 cm е достатъчна, за да бъдат добре уплътнени пробните тела. По-високата плътност на матрицата води до по-високи якости, поради това, че в модифицираните смеси ролята на цимента като пълнител е значително по-малка от тази при моделните разтвори, чрез използване на по-големи количества от по-дребнозърнест пълнител.

табл. IV. 6: Влияние на метода на проектиране на зърнометричните криви на матрицата върху показателите на СВЯБ, при използваните методи за уплътняване

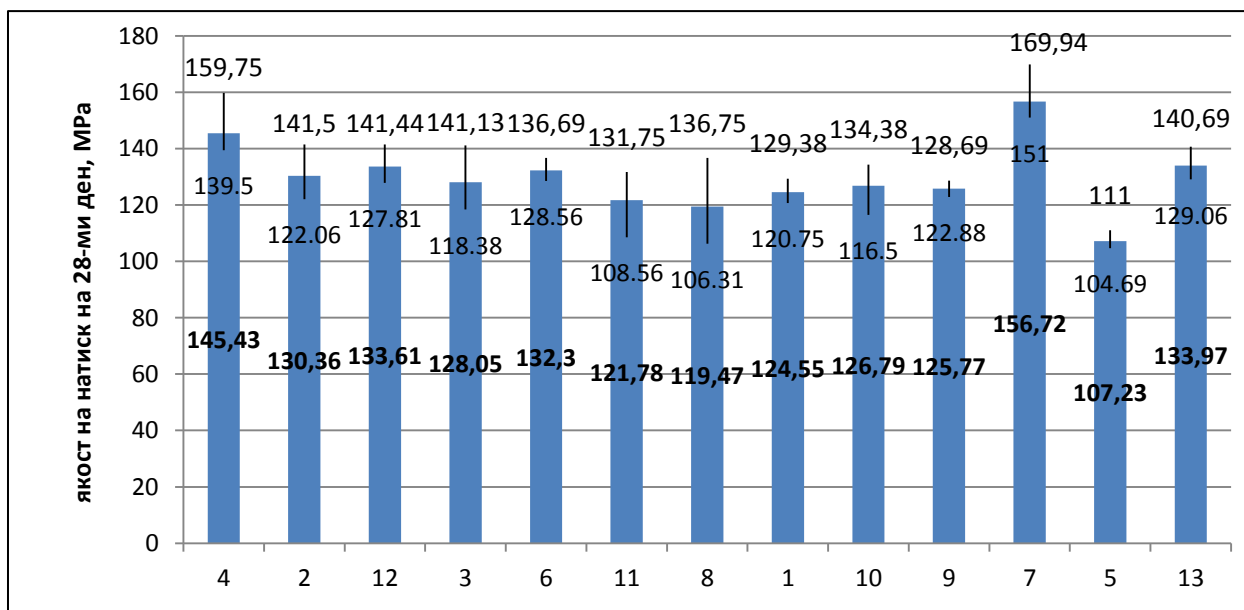
Характеристики на бетона	Моделен състав	Пространствено уплътняване	Референтни криви
Цимент	840	770	930
МСП	168	154	279
Пясък 0,125 -2,0mm	1180	1200	-
Пясък0,25- 0,5 mm	-	-	400
Пясък 0,125-0,25mm	-	-	190
Пясък 0,063-0,125mm	-	-	40
Кварцово брашно	-	200	390
В/Ц отношение	0,22	0,22	0,20
Суперпластификатор	2,5%	2,5%	3,5%
Разстилане, cm	19	14	11
Обемна плътност на 7-ми ден, g/cm <sup>3</sup>	2,24	2,32	2,44
Обемна плътност на 28-ми ден, g/cm <sup>3</sup>	2,27	2,35	2,48
Якост на опън при огъване, 7 ден, МРа	11,2	20,5	15,1
Якост на натск, 7-ми ден, МРа	110,2	118,6	114,2
Якост на натиск, 28-ми ден, МРа	131,2	138,4	145,2

Установява се, че двата метода за модифициране на матрицата дават много близки резултати, но комплексната оценка дава превес на метода с референтна крива, затова той е избран като основен подход при определяне на пропорциите на зърнестите материали на съставите от Планирания експеримент (трифакторен модел, полином от втора степен - виж гл. IV т.4). Всъщност, при проектиране на състави, в които изцяло липсва ЕДМ, за постигане на максимално уплътнена структура, се налага използване на кварцово брашно (виж гл. I т. 2.3.1), което ги доближава до Състав 1, проектиран по метода на пространственото уплътняване.

#### 4 Оптимизиране на състава на матрицата посредством прилагане на математическата теория на планиране на експеримента

Като основен оптимизационен критерий – функция на отклик е избрана якостта на натиск на СВЯБ на 28-сем дневна възраст. Паралелно, при същия план на експеримента, са определени зависимости и за якостта в ранна възраст (3-ти и 7-ми ден) и късна възраст (3 месеца и 1-на година), както и за модула на еластичност, като те ще бъдат дискутирани по-нататък (виж гл. VI т. 1.2.1).

Данните от изпитванията за якостта на натиск на 28-ми ден във всяка точка от Плана на Експеримента са представени на фиг. IV. 10.



точки от плана на експеримента	4	2	12	3	6	11	8	1	10	9	7	5	13
<b>Dmax</b>	0,5	8	2	0,5	8	2	0,5	8	2	2	0,5	8	2
<b>В/Ц</b>	0,2	0,2	0,2	0,24	0,22	0,2	0,22	0,24	0,24	0,24	0,22	0,22	0,22
<b>Хим доб.</b>	3,5	3,5	3	3,5	3	4	3	3,5	3	4	4	4	3,5

фиг. IV. 10: Представя якостта на натиск на 28 ден за точките от плана на експеримента

След получаване на единичните и средните резултати във всяка точка от Плана, е извършена предварителна обработка на експерименталните данни (проверки за груби грешки и за еднородност на дисперсиите) и са изчислени коефициентите на регресионния модел.

Полиномиалният модел за якостта на бетона на 28-ми ден има вида:

$$f_{c,28} = 134 - 6,93 \cdot X_1 - 3,30 \cdot X_2 + 0,04 \cdot X_3 + 0,19 \cdot X_1^2 - 2 \cdot X_2^2 - 5,23 X_3^2 - 2,73 \cdot X_1 \cdot X_2 + 2,95 \cdot X_2 \cdot X_3 - 15,6 \cdot X_1 \cdot X_3$$

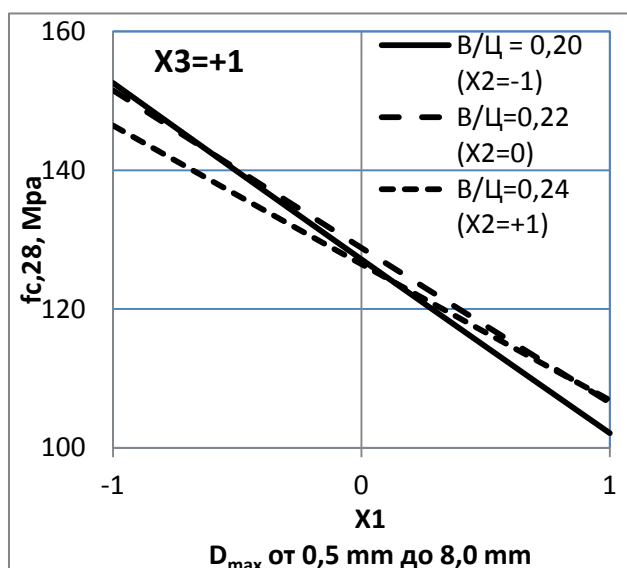
Направена е проверка за значимост на коефициентите на регресия. Установено е, че моделът е с отлична адекватност, т.е. описва правдоподобно зависимостта на якостта на 28-ми ден от изследваните фактори, тъй като средното отклонение на теоретичните ( $f_{c,28} \text{ calc.}$ ) от експерименталните ( $f_{c,28} \text{ exp.}$ ) стойности е по-малко от 10% (в случая  $S_{\text{average}} = 2,0\%$ ), а максималното не надвишава 20% (в случая  $S_{\text{max}} = 5,2\%$ ) – табл. IV. 7.

табл. IV. 7: Експериментални и изчислителни стойности на якостта на натиск на различните състави на бетона от Плана на експеримента

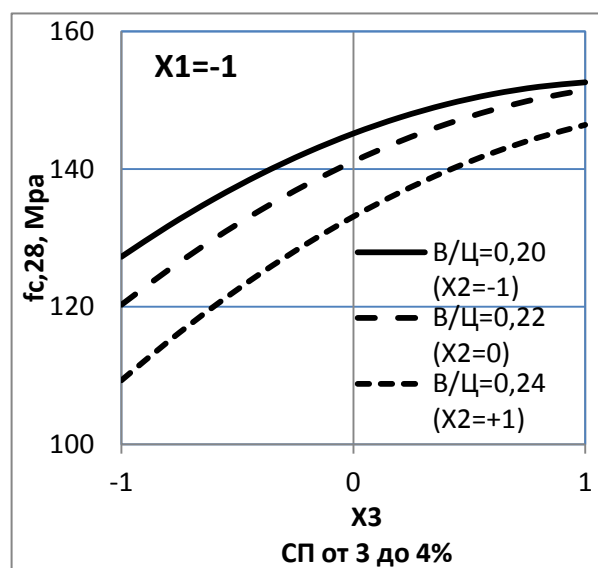
Точка от плана		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$f_{c,28}$ MPa	експерим. данни	124.6	130.4	128.5	145.2	107.2	132.3	156.7	119.5	125.8	126.8	121.8	133.6	134.0
	изчислени по модела	124.7	125.8	133.1	145.1	106.5	137.5	151.5	120.2	126.4	120.5	127.1	133.0	134.0
Разлика S, %		0.1%	3.6%	3.5%	0.1%	0.7%	3.8%	3.4%	0.6%	0.5%	5.2%	4.2%	0.5%	0.0%

Анализът на влиянието на отделните фактори върху якостта на СВЯБ е извършен на базата на квази-еднородни модели за якостта на бетона на 28-дневна възраст.

Основен фактор се оказва размерът на добавъчния материал - с намаляването му от 0,5 mm до 8,0 mm, якостта на изследваните бетони нараства с до 50% - фиг. IV. 11.



фиг. IV. 11: Изменение на якостта на натиск в зависимост от максималния размер на добавъчния материал, при различни водо-циментни отношения и 4% суперпластификатор



фиг. IV. 12: Изменение на якостта на натиск на микробетоните ( $D_{max}=0,5$  mm) в зависимост от количеството на суперпластификатора, при различни водо-циментни отношения

Главната причина за това е по-еднородната структура при микробетоните. При СВЯБ, с използването на ЕДМ се получава т.нар. "плаваща" структура, при която зърната на ЕДМ не контактуват помежду си и през тях не се предават усилията от натоварването, а зърната се явяват по-скоро като дефекти в еднородната и много плътна матрица от циментов камък, микросилициев прах и кварцово брашно, и около тях се концентрират напрежения – снимка IV. 1.

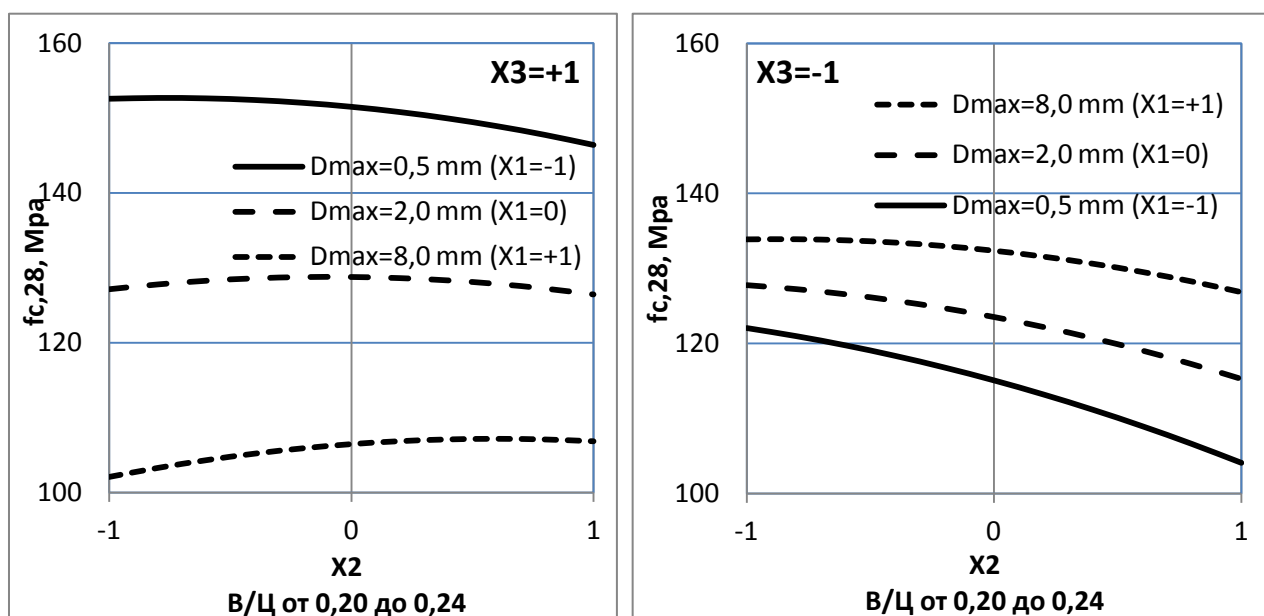


сн. IV. 1: Макроструктура на състави с различен максимален размер на добавъчния материал

Освен това, съдържанието на цимент при по-едрозърнестите смеси е относително по-малко (при смесите с  $D_{max}=0,5$ ; 2 и 8 mm то е съответно 930, 830 и 730  $kg/m^3$ ), макар че в случая това не е определящо, тъй като голяма част от цимента играе ролята на фин пълнител, а не на свързващо вещество. Влиянието на  $D_{max}$  практически не зависи от останалите два фактора, но най-високи якости при  $D_{max}=0,5$  mm се постигат при водо-циментно отношение 0,20% и 4,0% съдържание на суперпластифицираща добавка.

Втори по значимост фактор се оказва количеството на суперпластифициращата добавка - изменението ѝ от 3% до 4% от масата на цимента води до повишаване на якостта с 14% до 26%, в зависимост от водо-циментното съдържание - фиг. IV. 12. Основната причина се дължи на факта, че количеството на суперпластификатора е определящо за обработваемостта на сместа и оттам - за доброто ѝ полагане и уплътняване в кофражните форми. В случай на недостатъчна обработваемост, в пробните тела остават значително количество въздушни пори и празнини, които представляват структурни дефекти и компрометират якостта на СВЯБ. Допълнителен ефект може да се потърси и във влиянието на поликарбоксилатните добавки върху продуктите от хидратацията на цимента, особено при наличието на кристализационни центрове от микросилициев прах [Houst, 2008]. С изключение на съставите с водо-циментно отношение от 0,20, максимумът на кривите се намира извън изследваните граници на суперпластификатора. По-нататъшното увеличение на добавката обаче не е желателно, тъй като нараства изключително много тиксотропията на сместа и следователно се изискват по-големи усилия за нейното обработване, а и това би било икономически неоправдано.

Относително най-слабо е влиянието на водо-циментното отношение върху якостта, което може да се обясни с факта, че изменението му е зададено в доста тесни граници - от 0,20 до 0,24. Въпреки това, ефектът е най-силно изразен при микробетоните ( $D_{max}=0,5$  mm) - с увеличение на водо-циментното отношение якостта намалява с около 8 до 17%, в зависимост от количеството на суперпластификатора - фиг. IV. 13-а и фиг. IV. 13-б.



фиг. IV. 13: Изменение на якостта на натиск в зависимост от водо-циментните отношения на състави с различна зърнометрия:

а) при 4% суперпластификатор

б) при 3% суперпластификатор

Като оптимален, от гл.т. на якостта на 28-ми ден, се очертава състав на матрицата с  $D_{max}=0,5$  mm, В/Ц=0,22 и 4% от масата на цимента суперпластифицираща добавка.

## 5 Влакнесто армирани композити от СВЯБ

### 5.1 Особенности при избора на влакнеста армировка с оглед постигане на желани свойства

Както бе анализирано е глава I (виж гл. I. т. 2.1.4), дисперсно армиране на циментови композити позволява модифициране както на якостно-деформационните им характеристики, така и постигането на някои специфични свойства, свързани с дълготрайността им в определени експлоатационни условия, например повишена пукнатинуоустойчивост, газонепроницаемост, водонепропускливост и/или поведение при динамични въздействия (вкл. земетръс), устойчивост на износоустойчивост, огнеустойчивост и др.

В зависимост от желаните свойства, се прилагат различен вид и количество на влакна. Често се прилага хибридно армиране за комплексно подобряване на няколко параметъра. Целта на настоящата дисертация е да открие особеностите в поведението на СВЯБ, чиято матрица е армирана с най-популярните влакна, които се използват у нас, а именно - стоманените и полипропиленовите [Найденев, 2012].

Съществен показател при избора на вида на стоманените влакна се явява т.н. "*aspect ratio*" – отношението между дължината и диаметъра на влакното ( $L/D$ ).

С оглед особеностите на тънкостенните конструкции от СВЯБ и липсата на ЕДМ, са използвани по два типоразмера (от гл.т.  $L/D$ ) стоманени микрофibri с медно покритие и микрополипропиленови влакна, с разклонена конфигурация във вид на мрежа. Техническите характеристики на влакната са представени в глава III. т. 2.8.

Оптималният състав на матрицата, установен в резултат на планирания експеримент (виж гл. IV т. 4.) е наречен базови състав. Към него са вложени различни комбинации от влакна.

Процентът на армиране е избран по литературни данни [Orgass, 2004; Freettlöhr, 2012]. При армиране на СВЯБ със стоманени микрофибри той е 2% по обем. Количеството микроПП влакна е избрано да бъде 5 kg влакна за 1 m<sup>3</sup> бетонна смес. Оптималният базов състав с неармирана матрица е сравнен със съставите с влакнесто армиране.

Тези проценти на армиране са постигнати с всеки вид влакна поотделно (състави 1 и 2 със стоманени влакна, съответно къси и дълги; състави 4 и 5 с ПП влакна, съответно къси и дълги), както и съчетаване на къси и дълги влакна (състав 3 със стоманени, състав 6 - с ПП). При използването на хибридна армировка са използвани максималните проценти на армиране едновременно за стоманените и за ПП влакна (състави 7 и 8) - табл. IV. 8.

табл. IV. 8: Видове влакна и степен на армиране на СВЯБ

Означение на състава	базов	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>стоманени влакна</b>		<b>2.0</b>		<b>1.0</b>				<b>2.0</b>	<b>1.0</b>
L=6mm D=0.175mm	-	об.%	-	об.%	-	-	-	об.%	об.%
L=13mm D=0.2mm	-	-	<b>2.0</b>	<b>1.0</b>	-	-	-	-	<b>1.0</b>
			об.%	об.%					об.%
<b>ПП влакна</b>					<b>5,0</b>		<b>2,5</b>	<b>5,0</b>	<b>2,5</b>
L=12mm D=0.02mm	-	-	-	-	kg/m <sup>3</sup>	-	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
L=19mm D=0.02mm	-	-	-	-	-	<b>5,0</b>	<b>2,5</b>	-	<b>2,5</b>
						kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>		kg/m <sup>3</sup>

Основно предизвикателство е хомогенизирането на смесите от СВЯБ, съдържащи влакна, следствие на твърде ниското В/Ц и много тиксотропната матрица с относително ниска обработваемост. Голямото количество влакна, със силно развита специфична повърхнина, допълнително намалява обработваемостта на смесите. За преодоляване на тези трудности е приета технологията „*premix*”, при която всички компоненти, без влакната, се разбъркват в миксера, до пълното хомогенизиране на матрицата, след което се добавят влакната и сместа се разбърква допълнително заедно. Продължителността на разбъркване на матрицата зависи от обема на миксера и интензивността на разбъркването (виж г. III т. 4.1). Независимо от отделните параметри на влакнестото армиране (вид на влакната, L/D, процент армиране и др.), след влагането им е приложено допълнително разбъркване от още 2 минути, с оглед на хомогенното им разпределяне в матрицата.

За първоначална оценка на ефекта от въвеждането на влакна върху обработваемостта на смесите е измервано разстилането (виж гл. III т. 5.2), а за оценка на влиянието върху механичните свойства са определени якостта на опън при огъване и якостта на натиск (виж гл. III т. 9.1). От всеки състав са направени серия от пробни образци - гредички 4/4/16 cm, с оглед на определяне на основните му механични показатели. Формите с пробните образци се съхраняват във влажна среда (температура 20±5 °C и отн. влажност минимум 95%). Декофрирането на пробните тела се извършва след 24 часа. Отлежаването до момента на изпитване е под вода при температура 20±2 °C.



Задълбочен анализ на якостно-деформационното поведение на влакнесто-армираните композити на СВЯБ е представен в глава VI, където е разгледана ролята на влакната за дуктилното поведение на СВЯБ и са представени параметри на различните влакнесто-армирани състави, свързани с енергията на разрушение. Очертано е и влиянието на топло-влажностната обработка върху поведението на композитите. Изследвано е и влиянието на влакнестата армировка при краткотрайни динамични и абразивни въздействия.

## 5.2. Първоначални резултати от въвеждането на влакнеста армировка

Първоначалните резултати от изпитването на ВАСВЯБ са показани в табл. IV. 9.

табл. IV. 9: Резултати от изпитването на влакнесто-армираните композити на СВЯБ

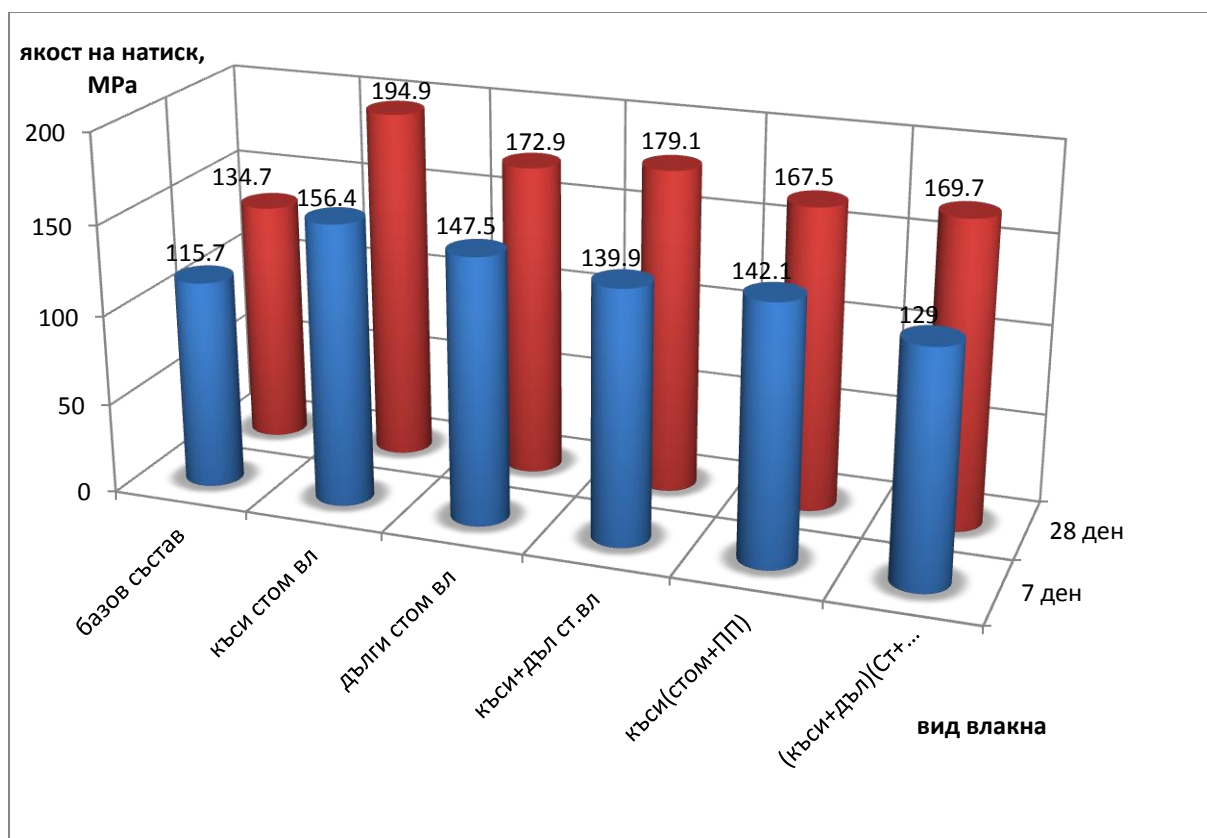
Характеристики	базов	1	2	3	4	5	6	7	8
Разстилане, cm	20	19	18	18	19	19	19	19	18
Обемна плътност, след декофриране, g/cm <sup>3</sup>	2,26	2,39	2,25	2,32	2,17	2,23	2,26	2,37	2,29
Теоретична обемна плътност, g/cm <sup>3</sup>	2,28	2,35	2,35	2,35	2,29	2,29	2,29	2,33	2,33
Якост на огъване, 7ден, $f_{f,7}$ , МПа	12,4	21,8	29,3	26,2	12,3	12,2	13,6	21,8	30,3
Якост на натиск, 7 ден, $f_{c,7}$ , МПа	115,7	156,4	147,5	139,9	109,2	115,2	109,2	142,1	129,0
$f_f/f_c$ за 7 дневна възраст	0,11	0,14	0,20	0,19	0,11	0,11	0,12	0,15	0,24
Якост на огъване, 28ден, $f_{f,28}$ , МПа	16,6	25,7	33,1	27,0	19,2	17,8	19,7	27,0	31,4
Якост на натиск, 28 ден, $f_{c,28}$ , МПа	134,7	194,9	172,9	179,1	131,1	132,6	142,1	167,5	169,7
$f_f/f_c$ за 28 дневна възраст	0,12	0,13	0,19	0,15	0,15	0,13	0,14	0,16	0,18
$f_{f,28}/f_{f,7}$	1,34	1,18	1,13	1,03	1,56	1,46	1,45	1,24	1,04
$f_{c,28}/f_{c,7}$	1,16	1,25	1,17	1,28	1,20	1,15	1,30	1,18	1,32

По отношение на обработваемостта, намаляването на диаметъра на разстилане на смесите с влакна е незначително и практически не затруднява полагането им във формите и уплътняването им. Очевидно, финозърнестата матрица на СВЯБ благоприятства равномерното разпределение на влакната по обем. Следователно, не се налага допълнително модифициране на матрицата с химични добавки и/или третиране на влакната.

Влагането на влакна води до изменение на обемната плътност в сравнение с базовия състав - тя се повишава при съставите със стоманени влакна и намалява при тези с микроПП влакна, което е следствие от различната обемна плътност на влакната и на матрицата. Малките, като цяло, разлики между експериментално измерената и теоретичната обемна плътност на композитите с къси влакна показват, че смесите с тях са по-добре хомогенизирани.

По-дългите влакна се диспергират по-лошо и това вероятно води до вкарването на повече въздушни пори, а оттам - до по-ниска плътност на композита.

Ранните якости на натиск на съставите, армирани със стоманени влакна логично показват увеличение на композитите в сравнение с базовия състав - то е около 35% при използването на къси влакна, а при тези с дълги влакна - с 27% (фиг. IV. 14). При еднакво обемно съдържание, късите влакна, които се разпределят в единица обем на композита са около 2,8 пъти повече, тъй като имат по-голяма специфична повърхност. Съответно, по-голямата контактна площ с матрицата на компонент с висок модул на еластичност води до по-голям принос в поемането на натоварването и оттам - в разтоварването на матрицата, с което се повишава нейната пукнатинуостойчивост.



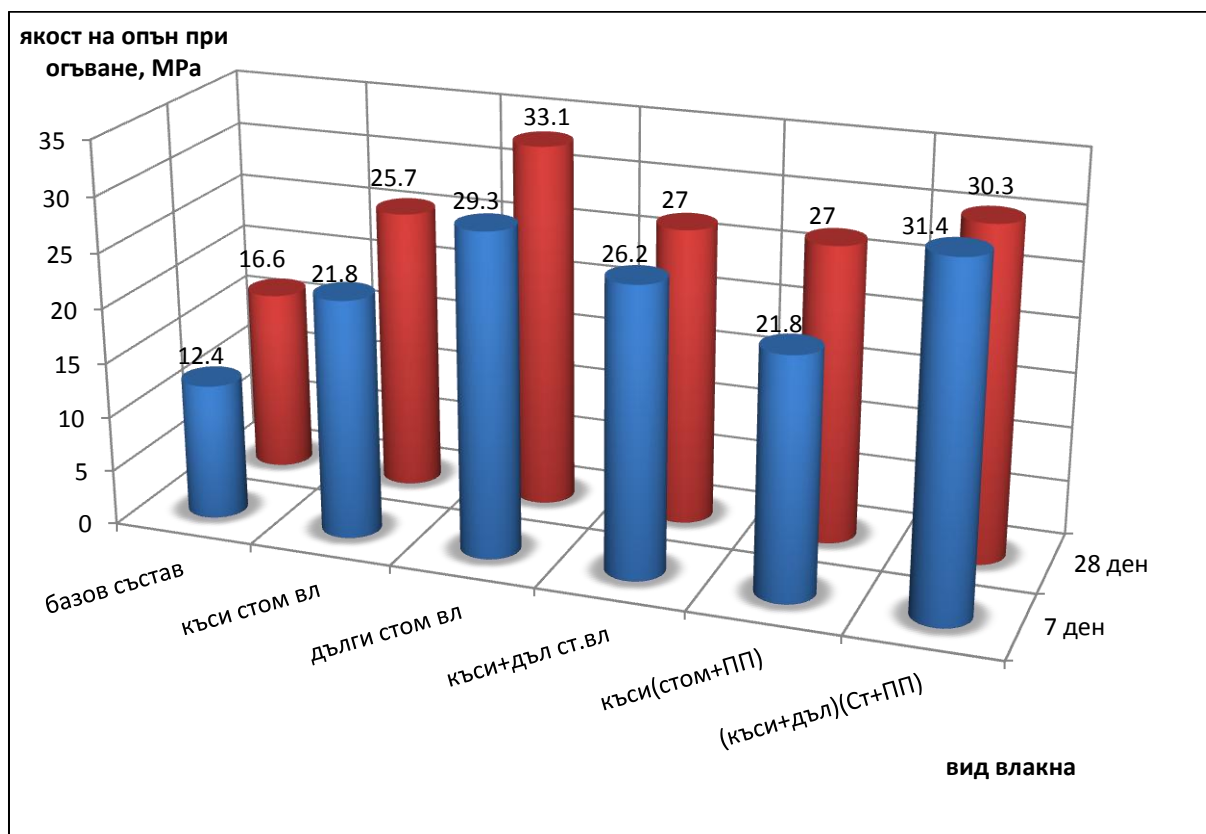
фиг. IV. 14: Изменение на якостта на натиск при състави с различно количество стоманени влакна

Както бе очаквано, микроПП влакна нямат принос към якостта на натиск, а по-скоро водят до намаление на деформативността [Bornemann, 2008]. Влагането само на микроПП влакна в изследваната матрица води до известно понижаване на якостта на натиск (с около 6%).

Комбинирането на стоманени и ПП влакна в състава на СВЯБ позволява не само да се компенсира негативния ефект от ПП влакна, но и да се повиши якостта на натиск от 11% до 23%, на 7 ден, и до 25% на 28 ден (таблица IV. 9). Този положителен ефект е значително по-изразен при съставите с къси стоманени влакна в ранна възраст, а в по-късна възраст практически не зависи от дължината на влакната.

Най-голям е приносът на влакнестата армировка при якостта на опън при огъване - тя се повишава със 76% до 153% на 7-ми ден и от 55% до 100% на 28-ми ден, като достига средни

стойности над 33 МРа, като при това отклонението от средната стойност не превишава 20% (фиг. IV. 15). Колкото е по-високо съдържанието на дълги стоманени влакна, толкова якостта на опън при огъване е по-висока - дългите влакна благоприятстват поведението на огъване в по-голяма степен, тъй като освен премостването и възпрепятстването на развитието на микропукнатините (което е характерно и за късите влакна), вероятно работят и след образуването на макропукнатини (виж г. VI т. 3.2), тъй като имат по-голяма закотвяща дължина, докато късите влакна са по-податливи на изтръгване.



фиг. IV. 15: Изменение на якостта на натиск при състави с различно количество стоманени влакна

Влагането само на микроПП не променя съществено якостта на опън при огъване и тя, макар и малко по-ниска, остава съизмерима с тази на базовия състав.

Отношението на якостта на опън при огъване към якостта на натиск ( $f_f/f_c$ ) на високоякоостната матрица на 28-ми ден запазва същата тенденция от 0,11-0,12, като тази на 7-ми ден. Бетоните с дълги стоманени влакна се открояват със значително по-висока якост на опън при огъване от 22%, в сравнение с късите стоманени влакна, докато в същия момент достигат почти до 90% от якостта им на натиск. Поради това отношението  $f_f/f_c$  е около 0,19-0,20 в целия разглеждан времеви интервал. Докато при съставите изцяло с микроПП влакна се наблюдават леко завишени стойности на  $f_f/f_c$  на 28-ми ден, в сравнение със 7-ми ден, поради по-големия темп на развитие на якостта на опън при огъване след 7-ми ден (над 30%), в сравнение с якостта на натиск (около 15%).

По отношение на хибридна армировка, добавянето на къси ПП влакна към състава с къси стоманени влакна води до създаване на по-големи количества микродефекти в сместа.

По-ниският Е-модул на ПП в сравнение със стоманата и матрицата на СВЯБ рефлектира на намалени стойности на якостта на натиск на получените хибриден композит още на 7-ми ден, като до 28-ми ден тя се увеличава с около 10%. Докато в същия интервал състав 2, само с къси стоманени влакна, увеличава якостта на натиск над 15%. При якостта на опън при огъване състав 2 показва 20%-но по-висок темп на нарастване на стойностите в сравнение със състав 7 (къси стоманени и ПП влакна). Комбинацията и всички използвани влакнести армировки води до незначително намаляване на якостта на натиск от 5%, в сравнение със състава със стоманени влакна с две различни дължини, като в същото време се отчита известно увеличение при него на якостта на опън при огъване, която най-вероятно се дължи на разсейване на резултати от изпитването.

В заключение, получените първоначални резултати потвърждават избора на влакнестата армировка като тип и количество. Стоманените влакна в обем 2 % превръщат матрицата на СВЯБ в дуктилен високоякоостен композит с якост на опън при огъване над 30 МРа и с якост на натиск от 195 МРа, което доказва, че влакнестоармираните СВЯБ могат да бъдат използвани за конструктивни цели дори без класическата армировка от стоманени пръти. Влакнестото армиране обаче трябва да бъде съобразено с особеностите на матрицата и тънкостенността на сеченията - подходящи за уякчаване са стоманени микровлакна с антикорозионно покритие, като при еднакъв процент на армиране, по-късите влакна ( $L/D=35$ ) имат по-добър ефект при натоварване на натиск, докато по-дългите влакна ( $L/D=65$ ) допринасят съществено за увеличаване на якостта на опън при огъване - до 1,5 пъти на възраст 7-ми дни и почти 2 пъти на 28-ми ден. Следователно, за повишаване на дуктилността на СВЯБ е по-целесъобразно използването на дълги влакна.

За разлика от обикновените бетони, където много често използването на стоманена влакнеста армировка води до понижение на якостта на натиск (главно поради трудности при хомогенизирането им и вкарването на макродефекти), при СВЯБ дисперсната армировка от къси стоманени влакна води до увеличаване над 45% на якостта на натиск на матрицата на СВЯБ на 28-дневна възраст.



## ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА, IV-ТА ГЛАВА

**Bornemann R., Faber S.:** UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading. *Proceeding of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 673-681;

**Cheyrezy M., Marat V., Frouin L.:** Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). *Cement and Concrete Research*, v.25, i.7, October **1995**, Pages: 1491-1500;

**Dinger D., Funk J.:** Particle Packing , Part I and Part II, *Intercceram*, **1992 & 1993**, Pages: 332-334 and Pages: 150-152;

**Droll K.:** Influence of additions on high performance concretes – grain size optimisation; *Proceeding of the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages 285-303;

**Empelmann M., Teutsch M., Steven G.:** Improvement of the Post Fracture Behavior of UHPC by Fibers, *Proceeding of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 177-184;

**Freestlöhr B., Reineck K., Reinhardt H.:** Size and Shape Effect of UHPFRC Prisms Tested under Axial Tension and Bending, *Proceeding High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6, RILEM*, **2012**, Pages 365-372;

**Geisenhanslüke C., Schmidt M.:** Methods for Modelling and Calculations of High Density Packing for Cement and Fillers in UHPC. *Proceeding of the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages 303-311;

**Heinz D., Urbonas L., Gerlicher T.:** Effect of Heat Treatment Method on the Properties of UHPC, *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 7-9, **2012**, Pages: 283-290;

**Houst Y., Bowen P., Perche F.:** Design and function of novel superplasticizers for more durable high performance concrete (superplast project), *Cement and Concrete Research*, v.38, 2008, Pages: 1197-1209;

**Myhre** B., Hundere A. M. The use of particle size distribution in development of refractory castables, *Presented at XXV ALAFAR Congress, San Carlos de Bariloche, Argentine Dec, 1-4, 1996.*

**Orgass** M., Klug Y.: Fiber Reinforced Ultra-High Strength Concretes. *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March, 13-15, 2004, Pages 637-647;*

**Scheydt** J., Müller H.: Microstructure of Ultra High Performance Concrete (UHPC) and its Impact on Durability, *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March, 7-9, 2012, Pages: 349-356;*

**Teichmann** T., Schmidt M.: Influence of the packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC. *Proceeding of the First International Symposium on UHPC, Kassel, Germany, March, 13-15, 2004, Pages: 313-323;*

**Найденов** В., И. Ростовски, ДИСПЕРСНО-АРМИРАНИ С РАЗЛИЧНИ ВИДОВЕ ФИБРИ ЦИМЕНТ-СЪДЪРЖАЩИ КОМПОЗИТИ, *Сборник доклади от XII Международна конференция ВСУ'2012, София, юни 2012г., т.2., стр. V-17 - V-24;*

## V ГЛАВА

### СТРУКТРИРАНЕ НА СВЯБ







## 1. Поведение на бетонната смес

Структурата е определяща за свойствата на всеки материал, но поради особеностите в състава на СВЯБ, неговото структуриране представлява специален научен интерес, както на бетонната смес (тиксотропна система), така и на втвърдения бетон.

### 1.1 Влияние на рецептурни параметри

С предварителни изследвания бе установено, че вискометърът тип BML е неподходящ за определяне на реологичните характеристики на СВЯБ. На това се дължи вероятно и ограниченият брой изследвания в областта на реологията на СВЯБ, които са публикувани [Kaufmann, 2004, Lowke, 2012]. Тези изследвания показват много по-ниски стойности при СВЯБ на срязващите напрежения -  $\tau$  (около 120 Pa), едновременно с много по-висок пластичен вискозитат  $\mu$  – от порядъка на 105 Pa.s. За сравнение – при обикновения бетон  $\tau$  е в интервала 500 – 2000 Pa, а  $\mu$  е между 50 и 100 Pa.s [Banfill, 2003].

По тази причина, структурирането на бетонната смес е оценено с помощта на марохарактеристики – обработваемост, определена по два стандартни метода за бетони и разтвори чрез метода на стръскваща масичка [БДС EN 1015-3:2001/A2:2008] и уреда на Vebe [БДС EN 12350-3:2009].

За да бъде оценено влиянието на финнозърнестите пълнители, е сравнена обработваемостта на два състава на матрицата – моделен и оптимален от плана на експеримента. И по двата метода, обработваемостта на бетонната смес е приблизително еднаква. Като цяло те принадлежат на клас V4 по Vebe и са на границата между гъстите и пластични смеси, според метода на стръскващата масичка – табл. V. 1. В същото време, методът Vebe представя бетонната смес, като състав, с отлична обработваемост, докато методът на стръскващата масичка характеризира сместа като много гъста, т.е със затруднена обрабоваемост. Ефектът на СП е ключов фактор за постигане на желана обработваемост.

От гледна точка на времето за приготвянето на смесите, сравняването на оптималния с моделния състав показва, че моделният състав има нужда от около четири пъти по-малко технологично време (табл. V. 1). Основната причина затова е значително по-малката специфичната повърхнина на частиците му -  $3,02 \cdot 10^{10} \text{ cm}^2/\text{g}$ , за разлика от оптималния състав, при който е  $5,01 \cdot 10^{10} \text{ cm}^2/\text{g}$ .

**табл. V. 1: Влияние на вида на състава върху обработваемостта на прясната бетонна смес, определена посредством уреда на Vebe и стръскваща масичка**

Вид състав	Уред на Vebe, sec	Стръскваща масичка, mm	Време за приготвяне, min
Оптимален състав	4	13,0	25,0
Моделен състав	2	15,0	6,5

Достигането на желаната обработваемост на смест, с намалено съдържание на цимент е възможно, но само след много по-продължително време за разбъркване (36 min). Затруднената обработваемост се дължи основно на намаленото количество вода отнесено към  $1 \text{ m}^3$  бетон, при постоянно В/Ц отношение от 0,22. Наред с това се намаляват якостните характеристики на натиск (виж гл. VI т. 1.1.1.) и опън при огъване (виж гл. VI т. 3.1.1). Не е оправдано понижаване на кличеството на цимента и от гледна точка екзотермия (тя не се понижава значително), нито за ограничаване на съсъхването.

**табл. V. 2: Влияние на количеството на цимента в състава на СВЯБ върху обработваемостта на прясната бетонна смес, определена посредством уреда на Vebe и стръскваща масичка**

Вид състав	Уред на Vebe, sec	Стръскваща масичка, mm	Време за приготвяне, min
Оптимален състав, с 930 kg цимент	4	13,0	25,0
СВЯБ, с 830 kg цимент	30	11,0	36,0

Увеличаването на количеството на водата очаквано води до значително увеличаване на обработваемостта на сместа (табл. V. 3), но има отрицателни последици върху поровото пространство (увеличен обем пори и наличие на микрокапилярна порестост) и намалени якостни характеристики (виж гл. VI т. 1.1.1). Наред с това времето за приготвяне на сместа се редуцира над два пъти и половина, като достига 10 min.

**табл. V. 3: Влияние на водо-циментния фактор в състава на СВЯБ върху обработваемостта на прясната бетонна смес, определена посредством уреда на Vebe и стръскваща масичка**

Вид състав	Уред на Vebe, sec	Стръскваща масичка, mm	Време за приготвяне, min
Оптимален състав, с В/Ц=0,22	4	13,0	25,0
СВЯБ, с В/Ц=0,26	1	18,0	10,0

## 1.2 Влияние на технологични параметри

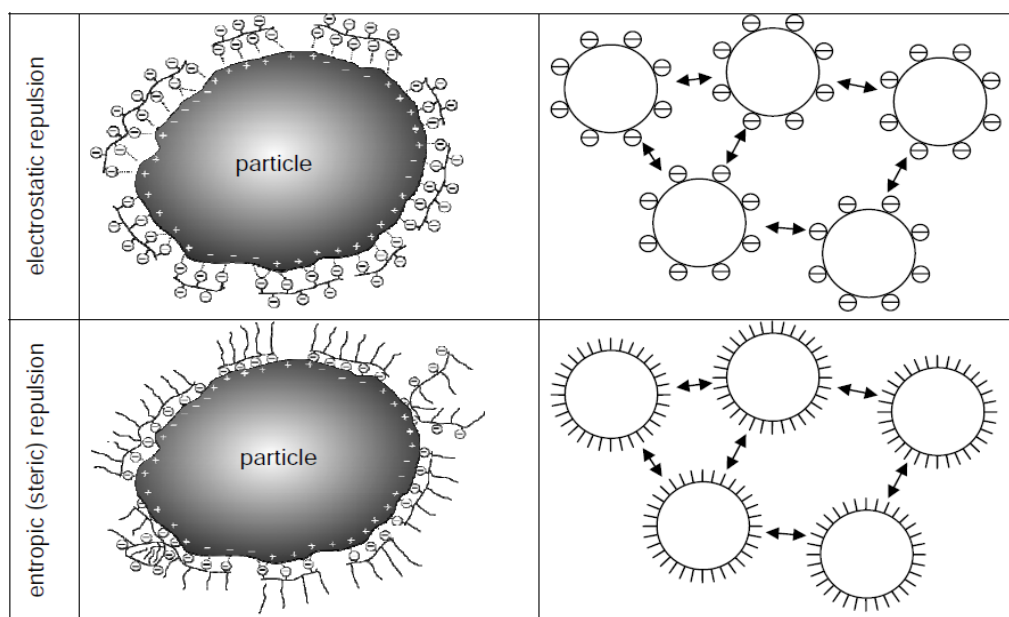
Технологичните параметри като скорост, продължителност и температура на изготвяне имат съществено влияние върху структурата и поведението на СВЯБ.

Високото съдържание на дребнозърнести частици при СВЯБ, заедно с много ниското В/Ц отношение, налага по-продължително време за приготвяне на бетонната смес в сравнение с обикновените бетони (табл. V. 4). По подобие обаче на обикновените бетони, с увеличаване на скоростта на миксера се намалява и технологичното време за приготвяне. При максимални обороти на машината от 520, постигнатата обработваемост на сместа (около 13 cm) не се различава от тази на комбинираното използване на 275 и 520 оборота (виж гл. III т. 5.1).

Времето за приготвянето ѝ е от същия порядък - между 20 min и 25 min. Намалването на оборотите до 275 през целия период на изработка, незначително редуцират обработваемостта и по двата приложени метода, за сметка на увеличеното с над 70% технологично време. Времето за приготвяне е свързано с така наречената „точка на протичане“ на сместа (виж гл. III т. 5.1), след която сместа от земновлажна се превръща в пластична.

Въпреки, че при циментовите композити е прието механичните въздействия върху сместа да са допустими само до началото на свързване, тъй като след това време се разрушават структурните им връзки, следва да се отбележе, че механичните въздействия влияят на тиксотропията. Приема се, че до начало свързване те са сравнително малки. При композити със съдържание на МСП, служещ за център на кристализация, и голямо количество цимент, началните структурни връзки са доста по-многобройни. Следователно трябва да се търси баланс между параметрите на забъркване на сместа и запазването на структурата ѝ.

Съществува така наречената DLVO-теория (по името на: Derjaguin, Landau, Verwey и Overbeck [Derjaguin, 1941; Verwey, 1948]). Тя разглежда мигновената реакция на отделните материали в състава на бетона чрез повърхностния заряд на отделните частици, който заряд зависи от общата потенциална енергия  $V_T$ . Тя е сумарна енергия от силите на отблъскване  $V_B$  и  $V_R$  и  $V_A$  - Ван дер Валсовите сили на привличане.  $V_B$  са сили на отблъскване, които предотвратяват пълното слепване на частиците, но са с малък обхват, докато  $V_R$  са електростатични сили, които служат за отблъскване на частиците с еднакъв заряд и за привличане на тези с различен. Очевидно зарядът на повърхността на частиците има огромно значение за силите на взаимодействие между тях и за стабилността на дисперсията. Използването на суперпластификатори може да предизвиква два различни вида отблъскване между частиците – електростатично и хаотично (пространствено) [Stephan, 2008] (фиг. V. 1). Използваната химическа добавка *Glenium 51* предизвиква втория вид диспергиращо действие. При него хаотичното отблъскване на частиците, с адсорбирани на повърхността полимери, води до предотвратяване слепването на частиците (виж г. I т. 2.1.3.).



фиг. V. 1: Електростатично и хаотично (пространствено) отблъскване между частиците [Stephan, 2008]

С увеличаване на скоростта на миксера се намалява времето за приготвяне на сместа, което се дължи на преодоляването на триенето между отделните частици. Големината му зависи от специфичната повърхност на частиците и дебелината на водните обвивки около тях. Колкото е по-тънка обвивката толкова е по-голямо триенето [Ma, Orgass 2004]. Непосредствено след добавянето на водата, фините частици на цимента, МСП и кварцовото брашно се обединяват в агломерати, в които водата не може да проникне и да предизвика протичане на сместа (виж гл. III т. 5.1). Тогава се явява положителният ефект от суперпластифициращата добавка на поликарбоксилатна основа, която предизвиква намаляване на триенето между частиците чрез освобождаване на водата от формираните агломерати. По този начин намалява и срязващото напрежение. Увеличената скорост на миксера спомага за по-бързото разрушаване на формираните агломерати до „точката на протичане“. Използването на комбинация от две скорости на миксера е търсена с оглед по-нататъчно минимизиране на разходите за забъркване – установено е, че ефектът на комбинацията е почти съизмерим с този на високата скорост на забъркване, а би могло да се реализирала икономия на енергия.

**табл. V. 4: Влияние на скоростта и времето на приготвяне на прясната бетонна смес върху обработваемостта ѝ, определена посредством уреда на Vebe и стръскваща масичка**

Вид състав	Уред на Vebe, sec	Стръскваща масичка, mm	Време за приготвяне, min	Скорост на приготвяне, обороти в min
Оптимален	4	12,0	43,0	275
	4	12,5	21,0	520
	4	13,0	25,0	275+520

Температурата, при която се изготвя и отлежава бетонната смес при СВЯБ, оказва пряко влияние както върху времето за приготвянето ѝ и съответно получената обработваемостта на сместа, така и върху ранните якости на втвърдения бетон. Изследването е осъществено при температура от +10°C, +20°C и +30°C (табл. V. 5).

Ниската температура от +10°C рефлектира на по-продължително време за приготвяне на бетонната смес до пълното ѝ хомогенизиране (38 min). В резултат на това сместа се загрява и покачва температурата си с около 20°C. Намаленото време на приготвяне на смесите при +20°C и +30°C до 25 min, води до по-малко повишаване на температурата - с около 15°C.

**табл. V. 5: Влияние на температурата на изготвяне и отлежаване на прясната бетонна смес върху обработваемостта ѝ, определена посредством уреда на Vebe и стръскваща масичка**

Вид състав	Време за приготвяне, min	Температура на:		
		околната среда, °C	сместа преди забъркване, °C	сместа след забъркване, °C
Оптимален състав	38,0	10,0	13,0	32,3
	25,0	20,0	19,3	34,4
	24,0	30,0	27,0	42,7

## 2. Кинетика на хидратацията

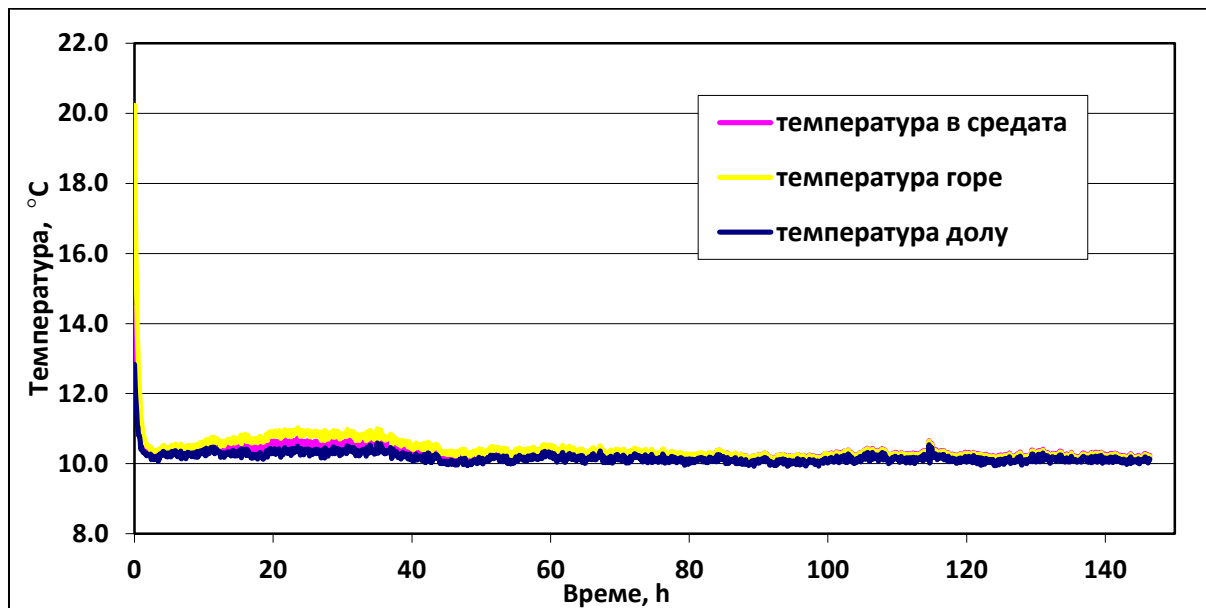
Кинетиката на хидратацията е важен момент от изследванията върху структурообразуването на СВЯБ.

### 2.1 Екзотермия

Особеностите на състава на СВЯБ предполагат, че процесите на хидратация се различават съществено от тези при обикновените бетони - от една страна СВЯБ имат голям екзотермичен потенциал, поради наличието на голямо количество свързващо вещество, но от друга - водата е малко и това не позволява пълна хидратация. По литературни данни, при В/Ц отношение от 0,22, може да се очаква максимална степен на хидратация  $\alpha_v=0,55$  [Mills, 1966]. СВЯБ се използва много често за направата на тънкостенни елементи, при които няма развитие на големи температурни разлики между повърхността и сърцевината на елементите, но имат висок модул на повърхнината, което прави топлообмена с околната среда много интензивен. Полагането на СВЯБ върху съществуващи конструкции и/или в условията на възпрепятствани деформации, създава предпоставки за пукнатионнообразуване в ранна възраст, което може да компрометира дълготрайността му. От друга страна, за изготвянето на СВЯБ в заводски условия е необходимо да се управлява процеса на хидратация при топло-влажностна обработка.

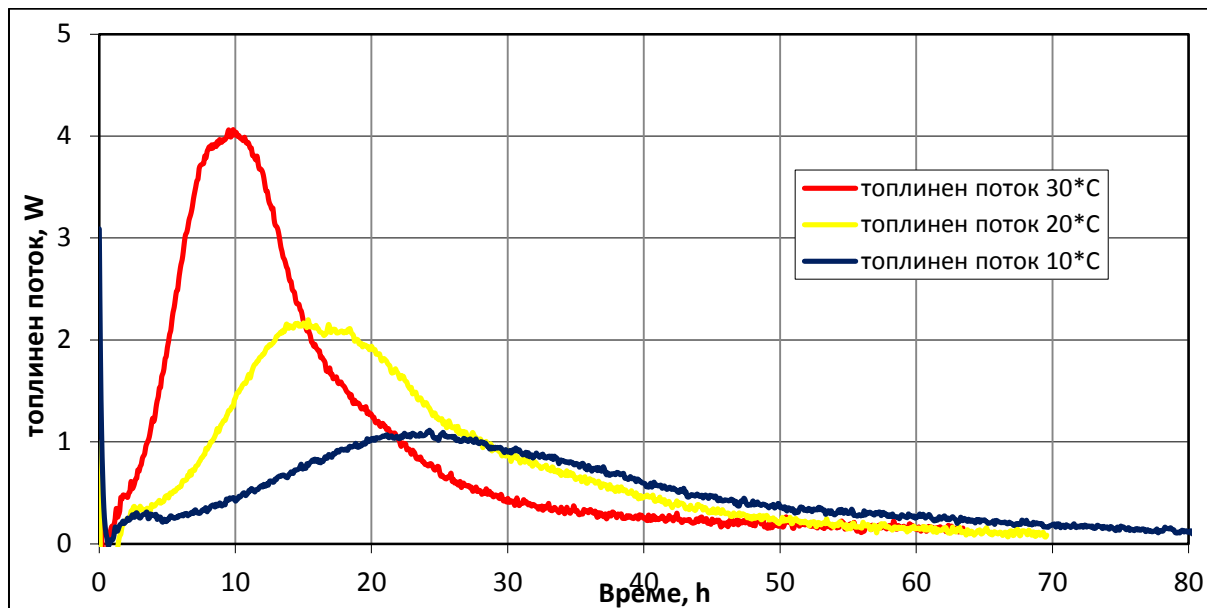
Поради тези причини, въпросът с кинетиката на хидратацията е особено важен. Литературните данни по този проблем (виж гл. I. т. 4.2.2.1) са сравнително оскъдни, а хидратацията зависи в голяма степен както от състава и свойствата на вложените материали, така и от условията на отлежаване на материала.

За експеримента е използван оптималния състав, изготвен и отлежавал съответно при +10°C, +20°C и +30°C. При приготвянето на отделните замеси са спазвани едни и същи условия. Продължителното разбъркване води до значително повишаване на температурата на сместа (виж гл V т.1.1), поради което след изготвянето ѝ е необходимо известно време за постигане на изотермичен режим. На фиг. V. 2 е представено изменението на температурата на образеца, чиято цел е да бъде характеризирани процеса на хидратацията при +10°C, но вследствие на продължителното разбъркване, температурата на сместа се е повишила. Поради това е необходимо известно технологично време за стабилизирането ѝ до +10°C. Аналогично са темперирани и образците при +20°C и +30°C.



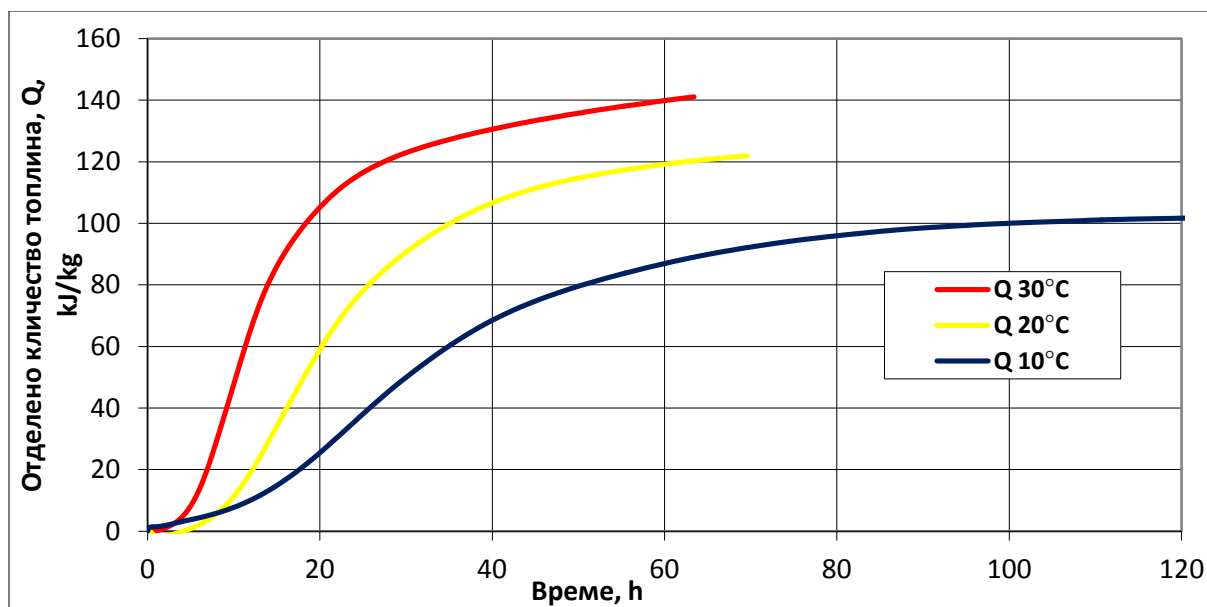
фиг. V. 2: Илюстрация на изотермичния режим при +10 °C (температури, измервани в горната, средната и долна част на образца)

Видът на кривата на изменение на топлинния поток на СВЯБ като цяло е подобен на този при обикновените бетони - отчетливо са разграничени четирите характерни участъка - начален, период на покой, период на ускорение и период на стабилизация - фиг. V. 3. Разположението им във времето обаче е различно - края на периода на покой е отместен – при нормална температура от +20°C той е след 4-я час, вероятно поради забавящото действие на суперпластификатора. По-ниската температура (+10°C) допълнително отнема края на периода на покой (5h). При температура +30°C обаче, периодът на покой е скъсен почти наполовина (2,3h), поради по-интензивните процеси на хидратация. Това се потвърждава и чрез втория пик, бележещ края на периода на покой, който при СВЯБ, хидратиращ при +30 °C е след 10-тия часа. За процесите на хидратация при нормална температура (+20°C), вторият пик настъпва след около 15 часа, което е в рамките на времето при обикновените бетони, докато при +10 °C този пик е след цяло денонощие.



фиг. V. 3: Влияние на температурата на изготвяне и отлежаване върху топлинния поток във времето

Количеството топлина, отделено от СВЯБ след 48 часа хидратация при +20°C е едва 110 J/g, т.е. то е почти три пъти по-малко от референтните стойности за обикновен бетон и нормализиран разтвор при тази температура (около 300 J/g), съдържащи много по-малко цимент от същия тип и клас, но имащи по-високо В/Ц отношение от 0,5 [Wirquin, 2008]. Дори при температура от +30°C, която интензифицира процесите на хидратация, то е по-малко - около 135 J/g. Количеството топлина, което се освобождава след 48 часа при +10°C е едва 80 J/g и достига стойностите, характерни за хидратация при +20°C, едва след 6-7 дни - фиг. V. 4.



фиг. V. 4: Количество топлина, освобождавано при хидратацията на СВЯБ в зависимост от температурата на изготвяне и отлежаване във времето

Както ще бъде посочено по-нататък, получените данни от калориметрията корелират добре с резултатите получени от механичните изпитвания на СВЯБ (виж г. VI т. 1.1.2.1.2 и г. VI т.



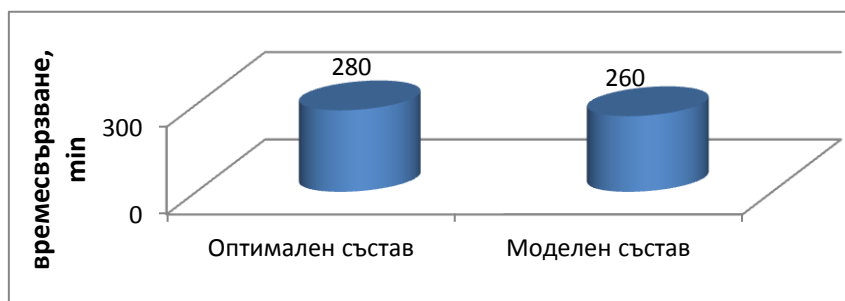
3.1.2.5). Установена е зависимост между количеството топлина, отделяно при хидратацията и нарастването на якостта във времето.

## 2.2 Структурни изменения на бетонната смес във времето

Първоначалното взаимодействие на водата с повърхността на циментовите зърна, се дължи основно на бързата реакция на  $C_3A$ , в резултат на което образувалият се колоидно-дисперсен гел от еtringит около клинкерните зърна предодвратява достъпа на вода и процесът на хидратация протича с много ниска скорост. Този период се нарича „период на покой“ (*dormant period*) и се счита, че спира изграждането на структурните връзки. При обикновените бетони, колкото е по-голяма дебелината на обвивките от еtringит около отделните зърна, толкова по-дълго няма да се допуска водата да контактува с нови повърхности на нехидратирал  $C_3A$ .

При СВЯБ съществуват редица особености: малко количество вода, голямо количество цимент с висока активност, голямо количество МСП, голямо количество СП и силно развита специфична повърхнина на системата, които влияят с разнопосочно действие.

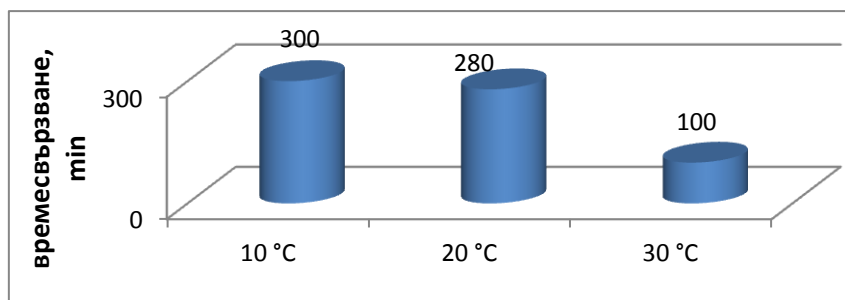
При обикновения бетон, с използване на цимент с по-голяма активност, намалява и времето до начало свързване, като при клас СЕМ I 52,5N, то най-често е около 150 min. Според някои [Korpa, 2004, Hela, 2004] с влагането на по-голямо количество суперпластифицираща добавка – 3-4% по маса, се увеличава и времето за свързване, тъй като той възпрепятства в по-голяма степен образуването на еtringита. От друга страна, част от водата е блокирана абсорбиционно във водни обвивки около зърната на добавъчния материал с фина зърнометрия (кварцово брашно и МСП) и малкото количество вода, което може да разруши обвивките на образувалия се еtringит, забавя времевръзването. МСП би следвало да ускорява процесите на структурообразуване. Времето от 280 min, до формирането на първите структурни връзки при СВЯБ, отчетени косвено с времевръзването като макропараметър, съвпадат в отделеното количество топлина при оптималния състав в този интервал, отчетено чрез калориметрията. Като цяло, структурирането на системата (изразено чрез времевръзването) е забавено в сравнение с обикновените бетони (разтвори), толкова повече, колкото е съдържанието на фини компоненти - фиг. V. 5.



фиг. V. 5: Влияние на вида на състава върху времевръзването на СВЯБ, определено посредством уреда на Vikat

Температурата оказва допълнително влияние – с понижаването ѝ, времевръзването се забавя (300 min при 10°C), а с повишаването – процесите на структурообразуване се ускоряват

значително (100 min при 30°C) - фиг. V. 3. Тези особености на матрицата на СВЯБ, следва да се отчитат за определяне на т. нар. „отворено време“ за манипулация на сместа.

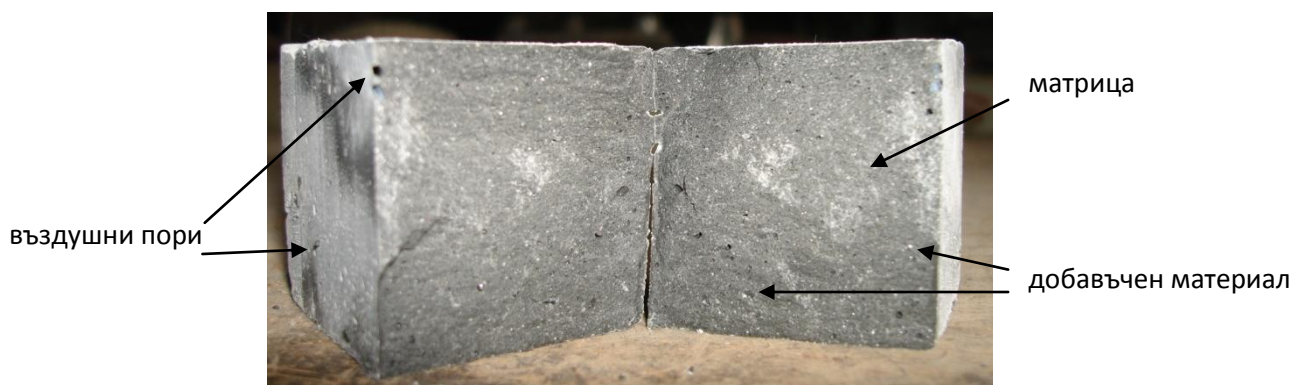


фиг. V. 6: Влияние на температурата на изготвяне и отлежаване върху времетраенето на СВЯБ, определено посредством уреда на Vikat

### 3. Особености на макроструктурата

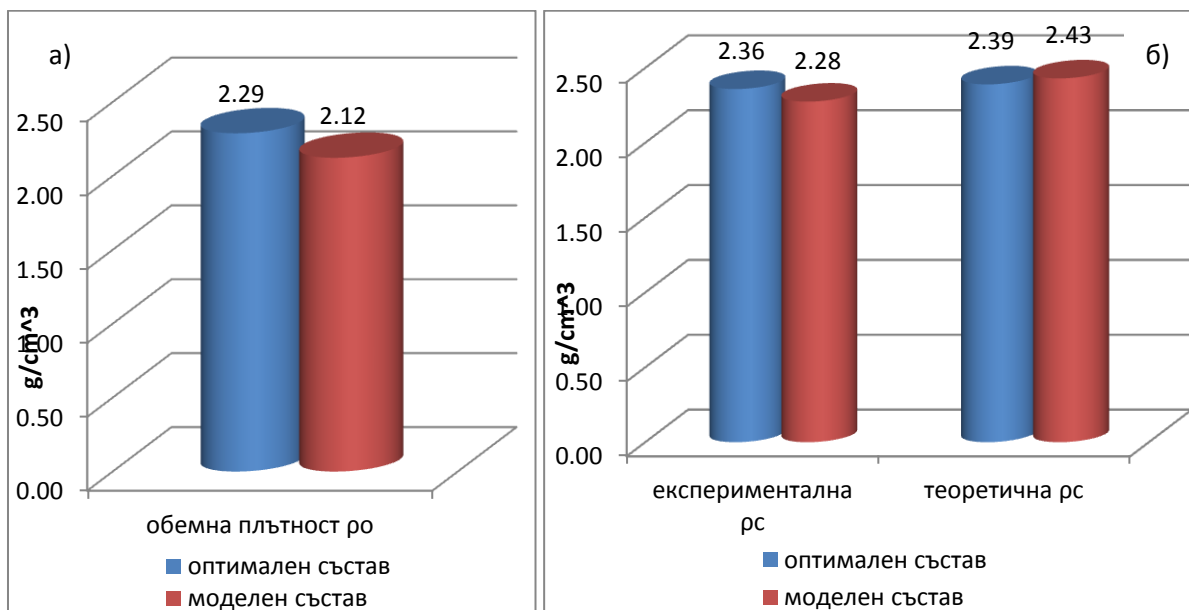
#### 3.1 Параметри на състоянието

Първият показател, на базата на който е изследвана макроструктурата на СВЯБ (сн. V. 1), е обеманата плътност. Тя служи като базисен параметър при анализирани различията в структурата на макрониво на различни състави от СВЯБ, както и за оценяване влиянието на топло-влажностната обработка.



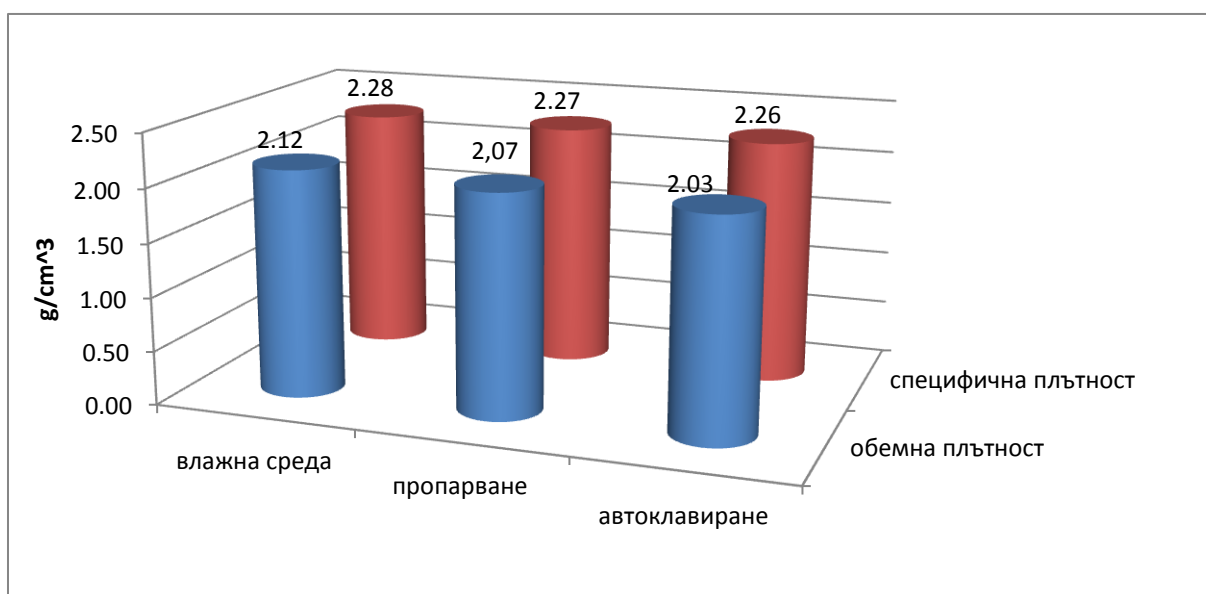
сн. V. 1: Общ вид на макроструктурата на оптималния състав на СВЯБ

Получената обемна плътност на матрицата на СВЯБ, при водонапити проби (виж г. III т. 7.2.1), е от порядъка на  $2,12-2,30 \text{ g/cm}^3$ . Тези плътности не се отличават съществено от стойностите при обикновен бетон, но са много по-високи от тези на циментови разтвори, до която зърнометрия се доближават. Възможно е това да се дължи и на неточности в метода на измерване. Оптимизирането на зърнометричния състав води до по-високи стойности на плътността (с около 8%) - фиг. V. 7-а. Получена е отлична корелация между експериментално определената специфична плътност и теоретично изчислената, при предпоставка за плътен състав (фиг. V. 7-б).

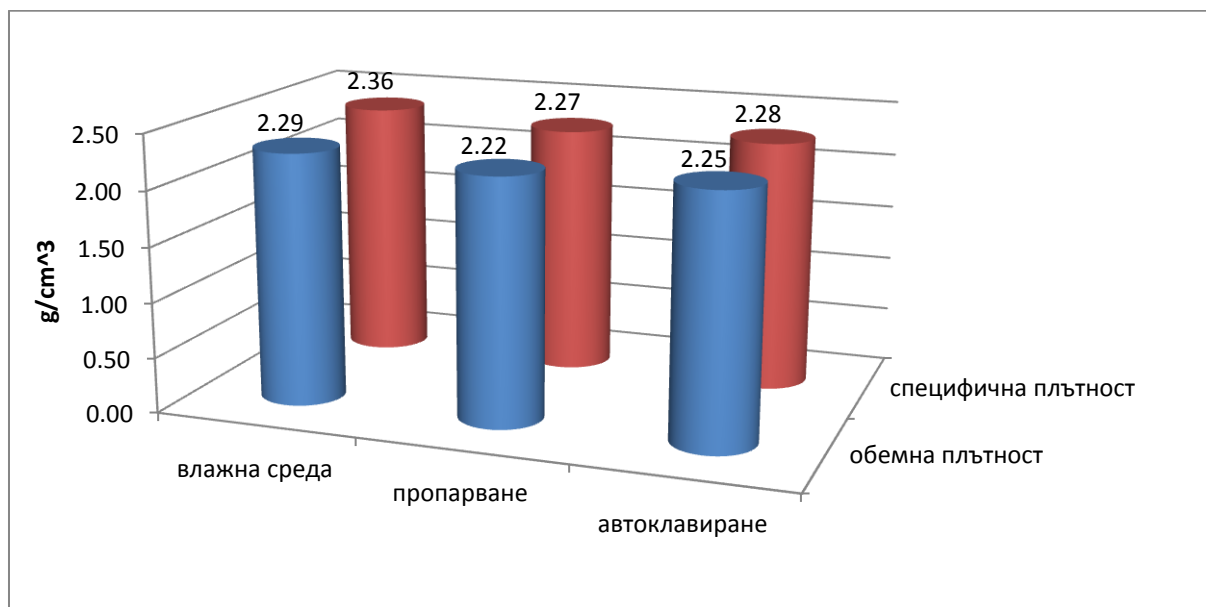


фиг. V. 7: Влияние на вида на състава върху обемната (а) и специфична плътност (б), при отлежаване във влажни условия

Поради липсата на някои компоненти (кварцово брашно) и по-малко съдържание на МСП, топло-влажностната обработка оказва минимално влияние върху моделния състав, както по отношение на обемната, така и на специфичната плътност - фиг. V. 8. При моделния състав разликата е едва 6%, което показва, че приемането на частиците с размер под 200 μm за плътни е оправдано. Още по-добри са резултатите за оптималния състав (разликата е под 1%), при който композирането на зърнометричния скелет и въвеждането на фин пълнител води до допълнително уплътняване (фиг. V. 9). След прилагане на топло-влажностна обработка намалява специфичната плътност, което може да се дължи на създадената по-груба структура. Част от промените влизат в обхвата на точността на измерване (0,04 g/cm<sup>3</sup>), според ASTM C29/C29M-09.



фиг. V. 8: Влияние на топло-влажностната обработка върху обемната и специфична плътност на моделния състав



фиг. V. 9: Влияние на топло-влажностната обработка върху обемната и специфична плътност на оптималния състав

В табл. V. 6 са представени получените резултати за относителната плътност ( $d$ ) и относителната порестост ( $p$ ) на двата разглеждани състава. Те потвърждават влиянието на оптимизираната зърнометрия, за постигане на по-плътна структура.

табл. V. 6: Влияние вида на състава върху относителната плътност и порестост

Условия на отлежаване	Вид състав	Относителна плътност ( $d$ ), %	Относителна порестост ( $p$ ), %
Влажна среда	оптимален	97,0	3,0
	моделен	96,1	3,9

### 3.2 Хидро-физични свойства

#### 3.2.1 Водонапиване и водонасищане на СВЯБ

Получените резултати от водонапиването ( $W_{n,m}$ ) и водонасищането ( $W_{a,m}$ ) на бетона са представени в табл. V. 8. Отчетени са много ниски стойности на  $W_{n,m}$  при оптимизираната матрица - под 0,35%, след отлежаване във влажна среда, като намалява до 0,31% след пропарване и до 0,26% след автоклавиране. Ефектът от топло-влажностната обработка върху поровото пространство, е отчетен и при оптималния състав с добавени 2% по обем къси стоманени влакна, където  $W_{n,m}$  е редуцирано до 0,23%. Допълнителното количество образувал се CSH гел след третиране на пробните тела, уплътнява структурата на бетона и намалява възможността за проникване на вода при нормални атмосферни условия. При оптималния състав третирането допринася за намаляване на междузърнестата порестост на бетона, след като тя е била теоретично моделирана. При моделния състав обаче, нарастването на CSH гела е реализирано в по-малка степен поради липсата на кварцово брашно и по-малкото количество МСП, с което е формирана първоначално неплътна структура. Получените стойности за  $W_{n,m}$

намаляват от 0,61% при влажни условия до 0,55% след пропарване и 0,48% след автоклавиране. При сравняване на водонасищането ( $W_{a,m}$ ) на оптималния състав при различни приложени топло-влажностни обработки, очаквано са отчетени най-високи стойности от 0,98% на пробите отлежавали при влажни условия и най-ниски от 0,34% след автоклавиране. Малко по-високи са стойностите на  $W_{a,m}$  при оптималния състав с къси стоманени влакна, може би поради не доброто им хомогенизиране на места в сместа. Моделният състав показва над 2 пъти по-високи стойности на водонасищане, в сравнение с оптималния състав, като след топло-влажностна обработка разликата намалява. По отношение на коефициента на водонасищане (Кн) най-ниски стойности от 0,25-0,35 са отчетени при всички проби отлежавали при влажни условия, като третирането на пробите предизвиква нарастване от над 2 пъти. Пред вид структурата на поровото пространство (виж гл. V. т. 4), не е уместно коефициентът Кн да бъде използван за оценка на мразоустойчивостта.

табл. V. 7: Влияние на условията на отлежаване и вида на състава върху основните хидро-физични свойства

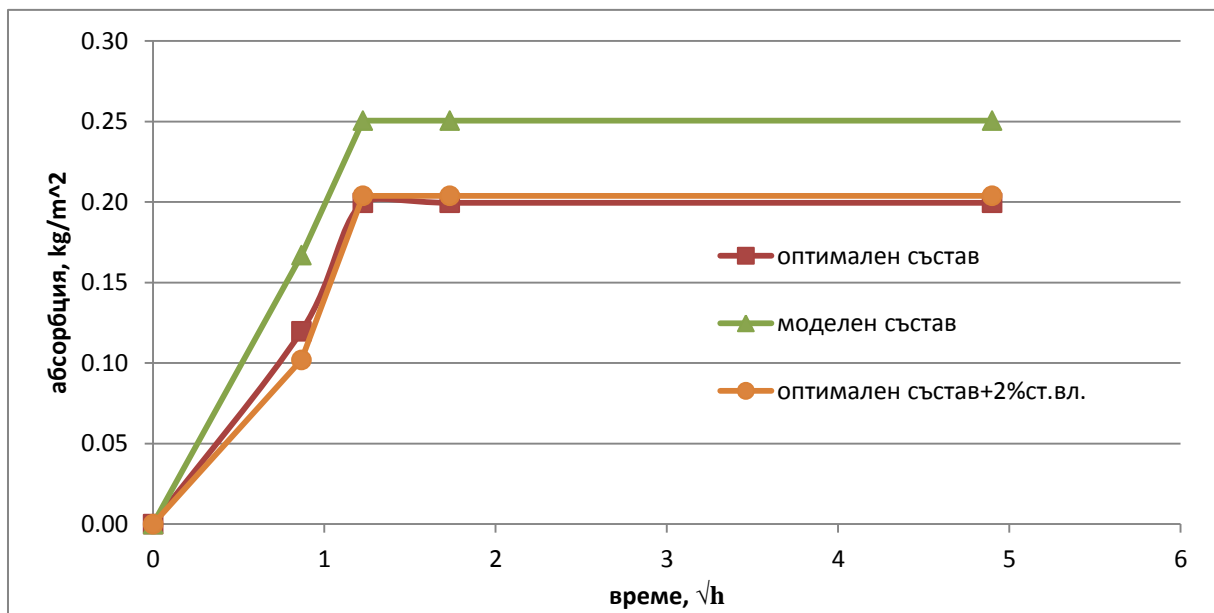
Условия на отлежаване	Вид състав	Водонапиване ( $W_{n,m}$ ), %	Водонасищане ( $W_{a,m}$ ), %	Коефициент на водонасищане (Кн)
Влажна среда	оптимален	0,35	0,98	0,358
	оптимален+2%ст.вл	0,30	1,28	0,234
	моделен	0,61	1,92	0,318
Пропарване	оптимален	0,31	0,41	0,756
	оптимален+2%ст.вл	0,29	0,48	0,604
	моделен	0,55	1,39	0,396
Автоклавиране	оптимален	0,26	0,34	0,764
	оптимален+2%ст.вл	0,23	0,63	0,365
	моделен	0,48	0,65	0,738

### 3.2.2 Капилярна водопопиваемост

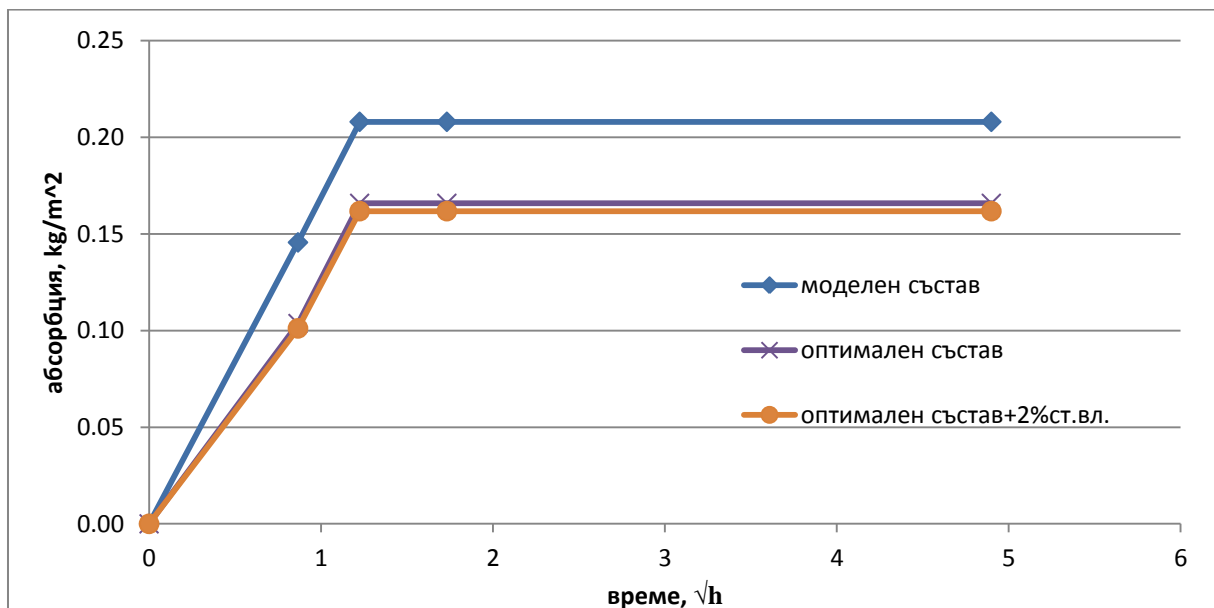
Капилярната водопопиваемост служи като макропараметър за определяне характеристиките на поровото пространство. Изследвани са три състава – оптимален от плана на експеримента; оптимален с добавени 2% по обем къси стоманени влакна и моделен състав. И трите състава са били подложени на топло-влажностна обработка – пропарване и автоклавиране (виж г. III т. 5.3) и след това са отлежавали при влажни условия.

Резултатите показват, че началната абсорбция на СВЯБ е между 0,20 kg/m<sup>2</sup> и 0,25 kg/m<sup>2</sup> (фиг. V. 10), два пъти по-ниска от тази при обикновените бетони (около 0,5 kg/m<sup>2</sup>), при

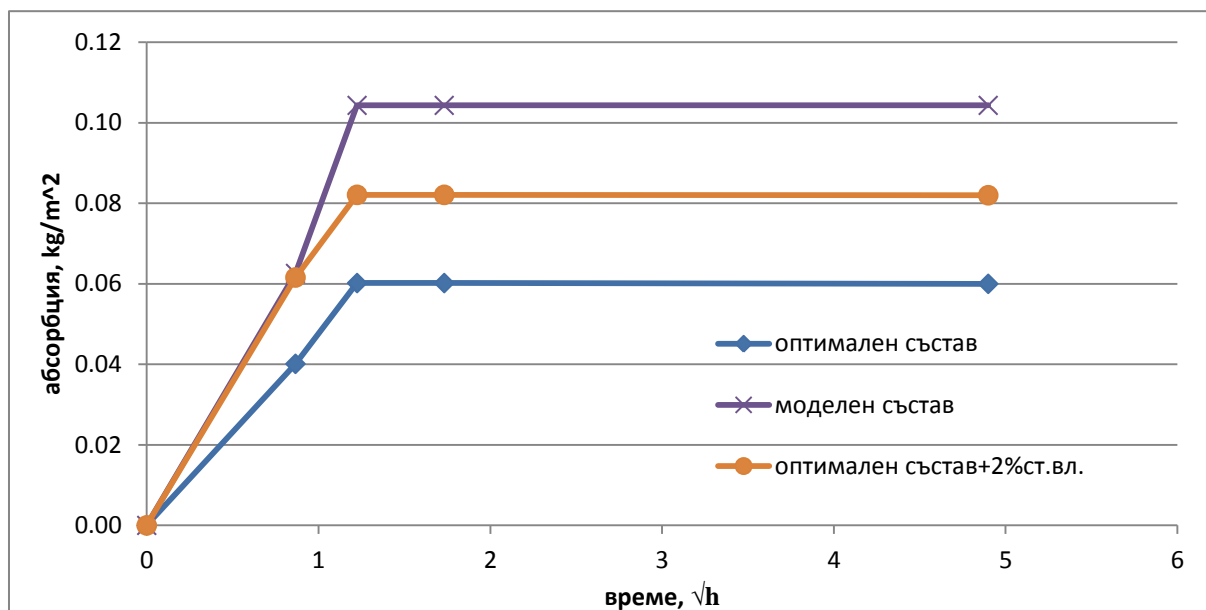
отлежаване във влажни условия. Началната абсорбция е представителна за обема на поедрите пори, които в СВЯБ се дължат на несъвършена технология на изготвяне. Не биха да се пренебрегва и „ефекта на стената”, който предизвиква по-голяма порестост на първите няколко mm, които са били в контакт с кофража. По отношение на абсорбционната способност  $S [kg/m^2\sqrt{h}]$ , тя е представителна за обема на капилярните пори. Фактът, че стойността ѝ е нула при СВЯБ, показва, че такава порестост липсва. Поради спецификата на поровото пространство методът на капилярната водопопиваемост има ограничено приложение при СВЯБ (само за обема на макропорите). Влиянието ѝ е изследвано и след прилагане на пропарване и автоклавиране - стойностите намаляват още (фиг. V. 11 и V. 12).



фиг. V. 10: Влияние на вида на състава върху абсорбцията на пробни тела отлежавали във влажна среда



фиг. V. 11: Влияние на вида на състава върху абсорбцията на пробни тела отлежавали във влажна среда след пропарване



фиг. V. 12: Влияние на вида на състава върху абсорбцията на пробни тела отляжавани във влажна среда след автоклавиране

### 3.3 Линейни деформации

Съсъхване на бетона е обемна деформация, която неизбежно настъпва веднага след добавянето на водата към сухата смес, като продължава и след втвърдяването му. Ако бетонът не е ограничен от кофражните форми и армировката, то съсъхването няма да има негативни последици. На практика това не е възможно и появата на опънни напрежения още в прясната бетонна смес превишават опънната якост на бетона и водят до пукнатинообразуване. По този начин се нарушава носещата способност на конструкцията и се намалява нейния експлоатационен период [Xincheng, 2013]. Негативният ефект се изразява чрез преноса на газове и течности през пукнатините, които могат да доведат до корозия на бетона и армировката. При СВЯБ, влагането на големи количества АМД от вида МСП, суперпластификатори от вида поликарбоксилати, количество на цимента над  $800-900 \text{ kg/m}^3$ , в комбинация със силно намалено В/Ц отношение до 0,22, водят до увеличаване на автогенното съсъхване на СВЯБ. Най-често прилаганият подход, описан в литературата е използването на дисперсна армировка [Cheyrezy & Behloul, 2001.]. Наред с това използването на топло-влажностна обработка, според някои [Acker, 2004; Graybeal, 2005] има негативно влияние върху съсъхването, докато според други води до неговата редукция [Garas, 2009; Collepardi, 1997].

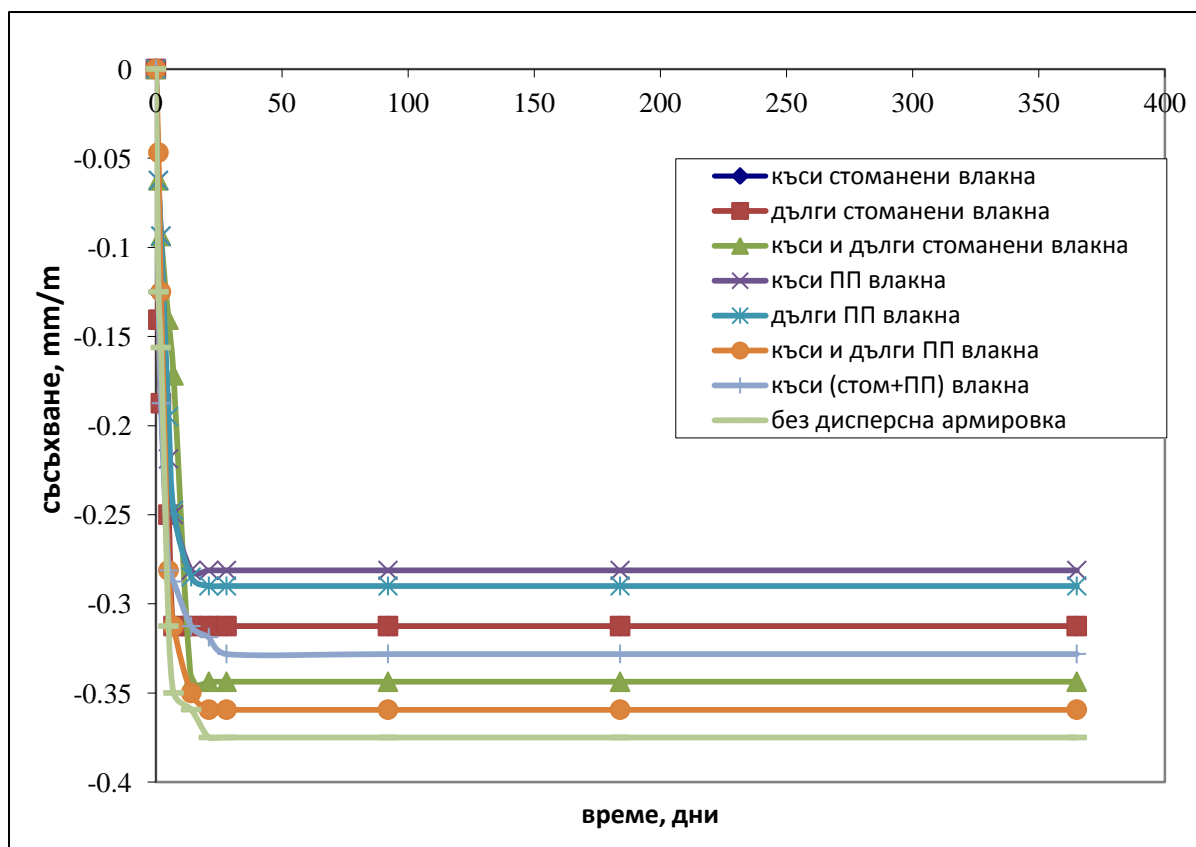
#### 3.3.1 Влияние на рецептурни параметри

При СВЯБ, за разлика от обикновения бетон съсъхването протича по съвсем различен начин. Първо матрицата се самоизсушава много бързо, поради химическото ѝ свиване, в резултат на което обемът ѝ се намалява [Aitcin, 1998]. Според други [Acker, 2001, Graybeal, 2005] процесът на самоизсушаването е породен от разрушаване на CSH гела. При самоизсушаването

се извършва движение на водата от малките пори към все по-фините капиларни пори, което води до бързо автогенно съсъхване. Формират се опънни напрежения, които се развиват много ускорено. Контракционното съсъхване, слабо изразено при обикновените бетони се наблюдава в много по-голяма степен при СВЯБ. Причината за това е много малкото вода, добавена в сместа, при която обемът на новообразуванията не се различава значително от изходните материали. Докато процесът на влажностно съсъхване, който също е водещ при обикновения бетон, при СВЯБ трае много малко и има много малка стойност.

Използването на по-голямо количество цимент при СВЯБ не води до големи стойности на съсъхването, защото при СВЯБ има много ниско В/Ц отношение. В резултат на това образуваната порова структура е прекъсната при продължаване на хидратация. Бетонът се самоизсушава в периода между приготвянето и осъществяването на топло-влажностната обработка. Според някои [Graybeal, 2005] след третирането на пробните тела съсъхването спира.

На фиг. V. 13 са представени резултатите от извършения експеримент за определяне на съсъхването на оптималния състав при вариране на различни по вид и количество стоманени и ПП влакна. Изследваният интервал е една година като след 10-15-тия ден се отчитат постоянни стойности на съсъхването.



фиг. V. 13: Влияние на вида на дисперсната армировка върху съсъхването на СВЯБ

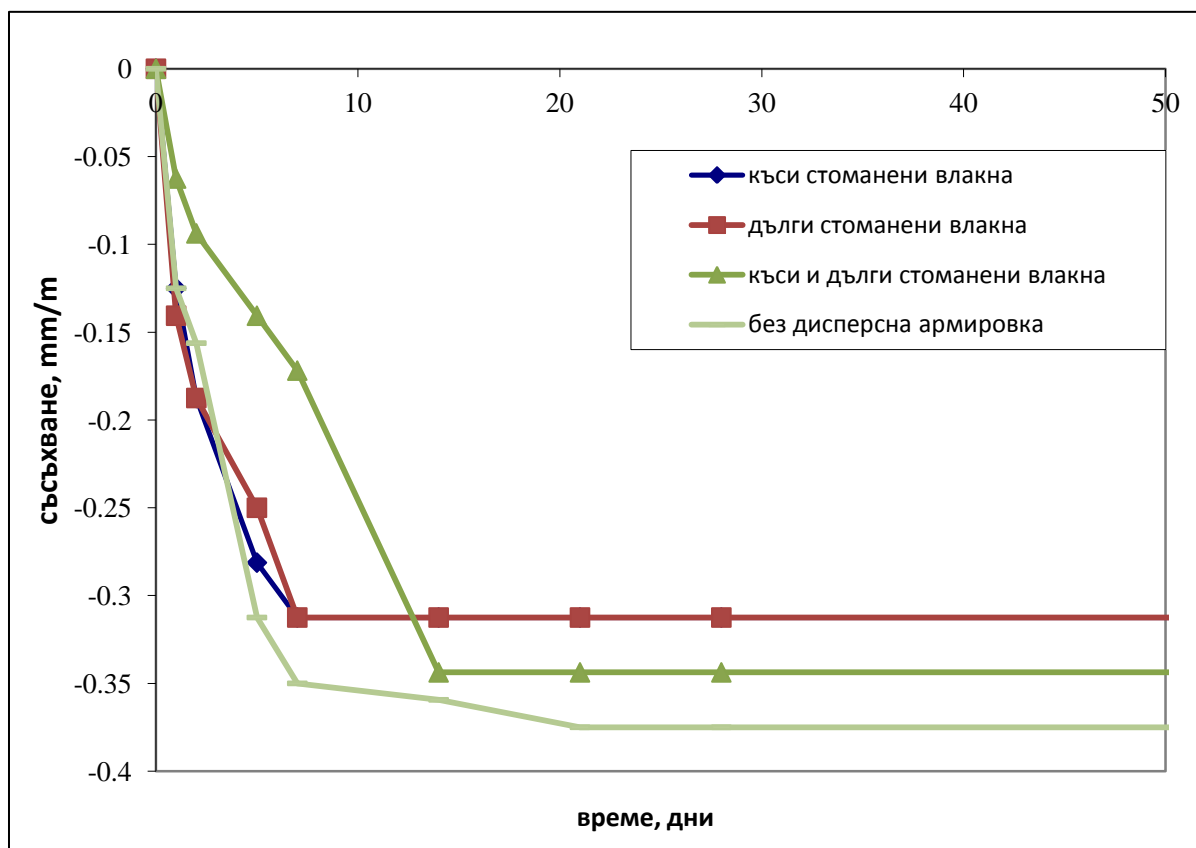
Използването на стоманени влакна (фиг. V. 14) предизвиква редуциране на съсъхвателните процеси с над 18%, като достига стойности от 0,32 mm/m, при първоначално



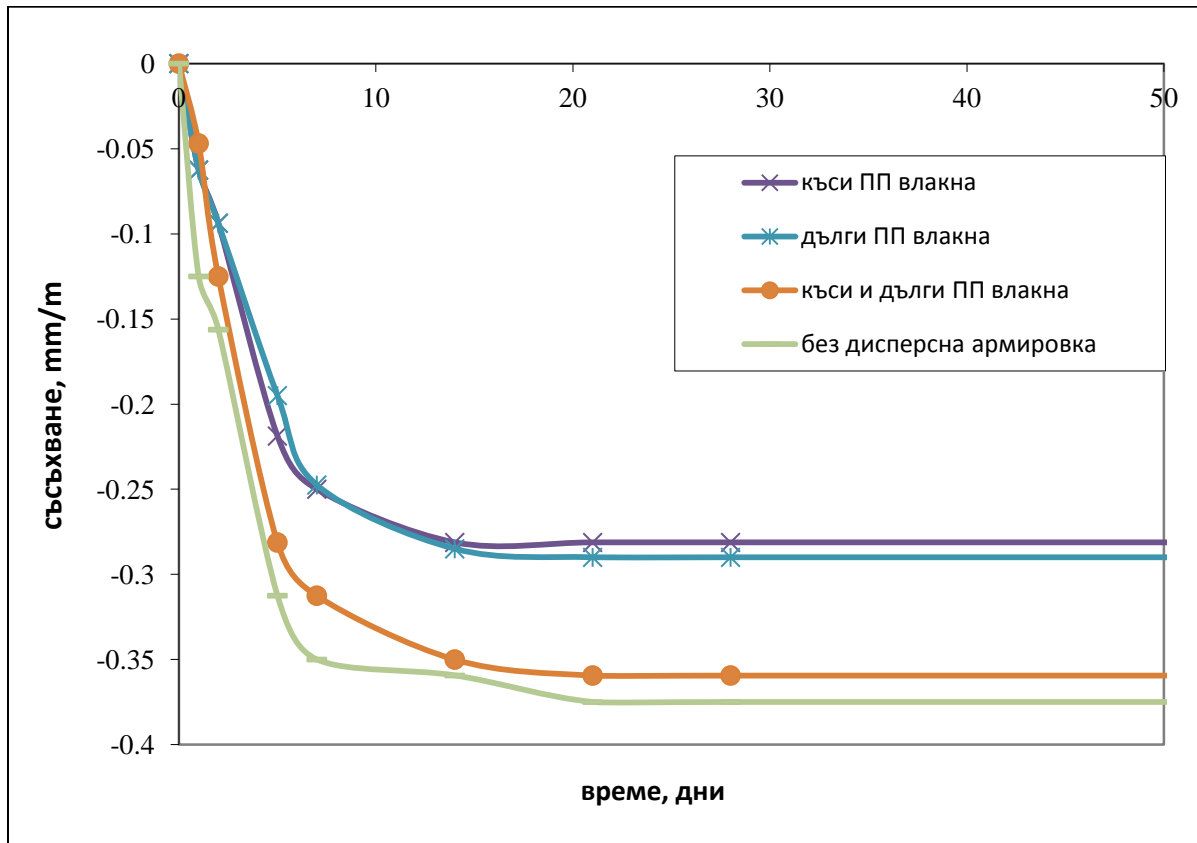
измерени 0,38 mm/m при оптималния състав без дисперсна армировка. Това се дължи на действието на стоманената армировка, които служат за ограничаване на възникналите вътрешни опънните напрежения. Не е отчетена разлика при използването на къси и дълги влакна, докато комбинацията на двете вида дисперсна армировка показва малко по-слаб ефект и съсъхването достига до 0,34 mm/m.

От друга страна влагането само на ПП влакна (фиг. V. 15) към оптималния състав предизвикват по-значителна редукция на съсъхването, като неговата стойност стига до 0,28 mm/m, което е с над 35% по-ниско в сравнение със състава без влакнеста армировка. Комбинирането на къси и дълги ПП влакна не предизвиква значителен ефект.

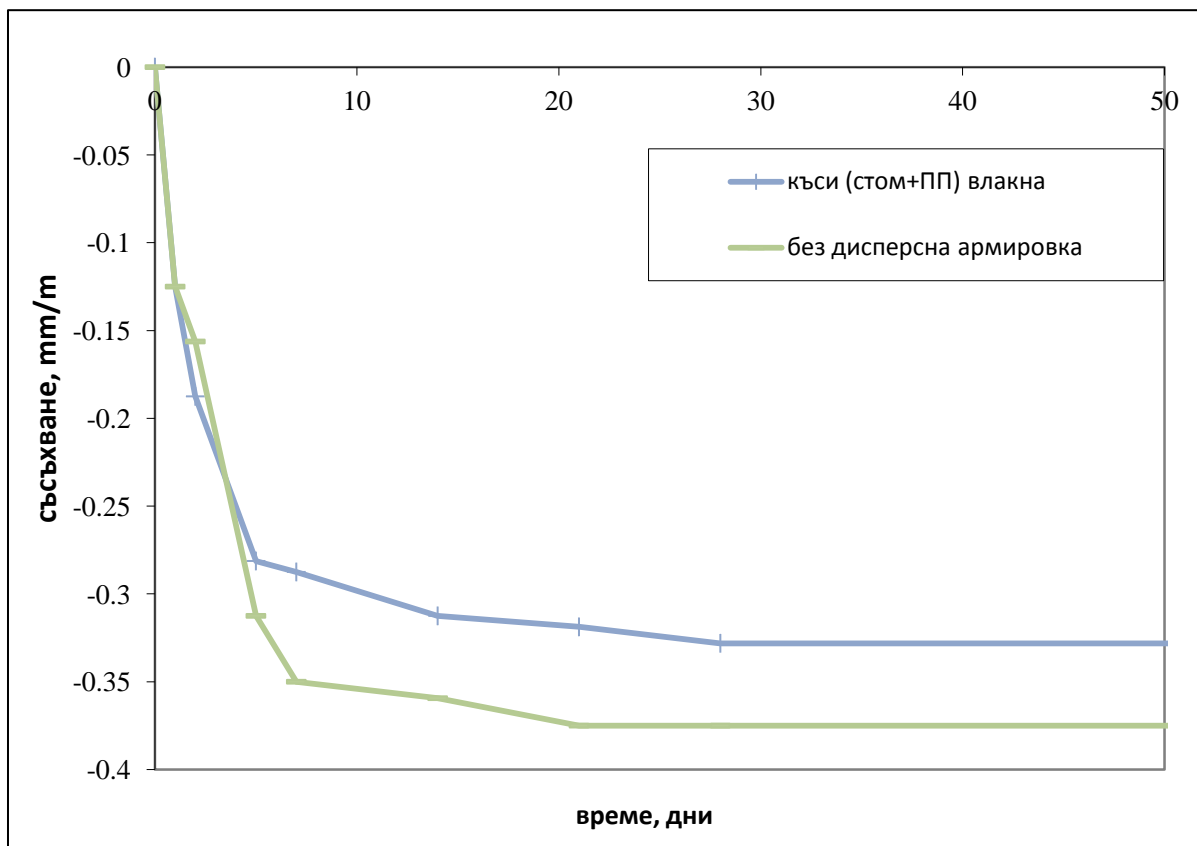
Хибридно използване на стоманена и ПП дисперсна армировка (фиг. V. 16) води до намаляване на съсъхването с над 18%, като са отчетени стойности от 0,32 mm/m. Процесът на интензивна обемна деформация затихва по-бавно с времето, като е най-интензивно е в първите десет дни и продължава с по-ниска интензивност до 30-тия ден. Докато при единичното влагане само на стоманени или само на ПП влакна, процесът протича почти с еднаква интензивност през първите 10-15 дни и след това затихва до края на разглеждания период.



фиг. V. 14: Влияние на стоманените влакна върху съсъхването на СВЯБ



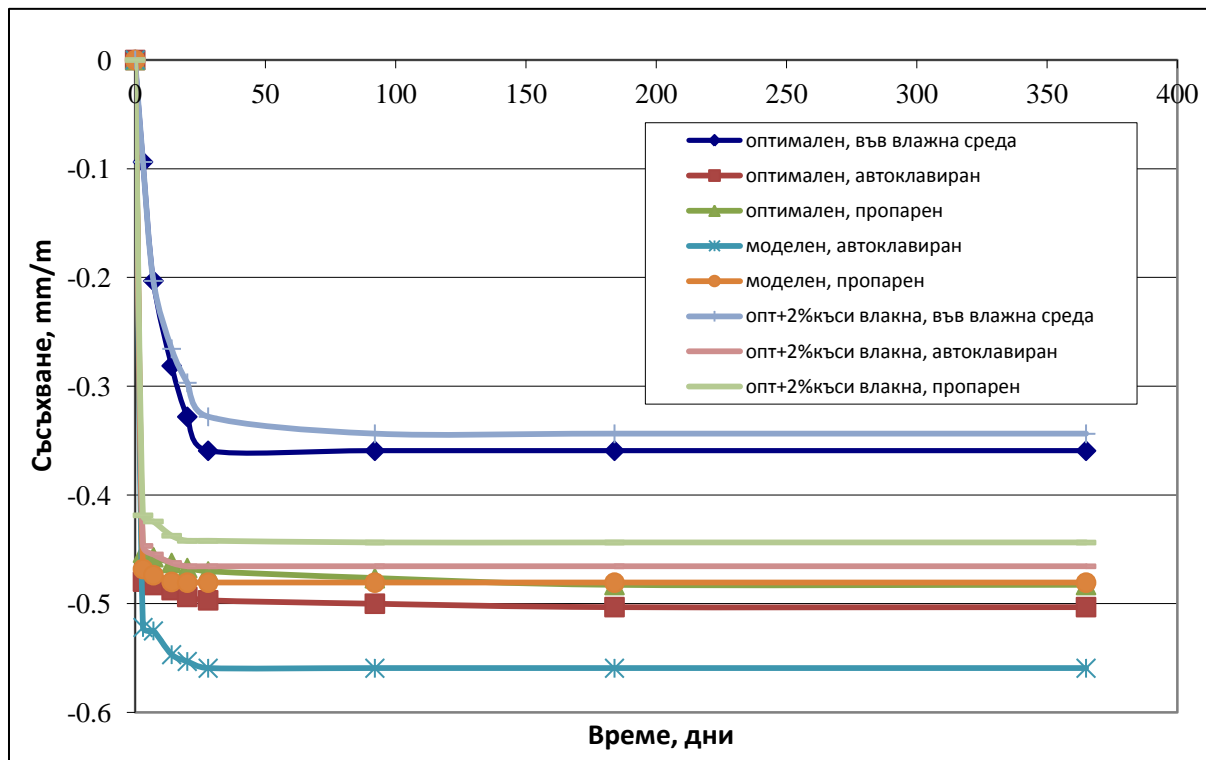
фиг. V. 15: Влияние на ПП влакна върху съсърването на СВЯБ



фиг. V. 16: Влияние на комбинирани стоманени и ПП влакна върху съсърването на СВЯБ

### 3.3.2 Влияние на технологични параметри

Проведено е целенасочено изследване за определяне поведението на СВЯБ след топло-влажностна обработка при различни състави (фиг. V. 17).



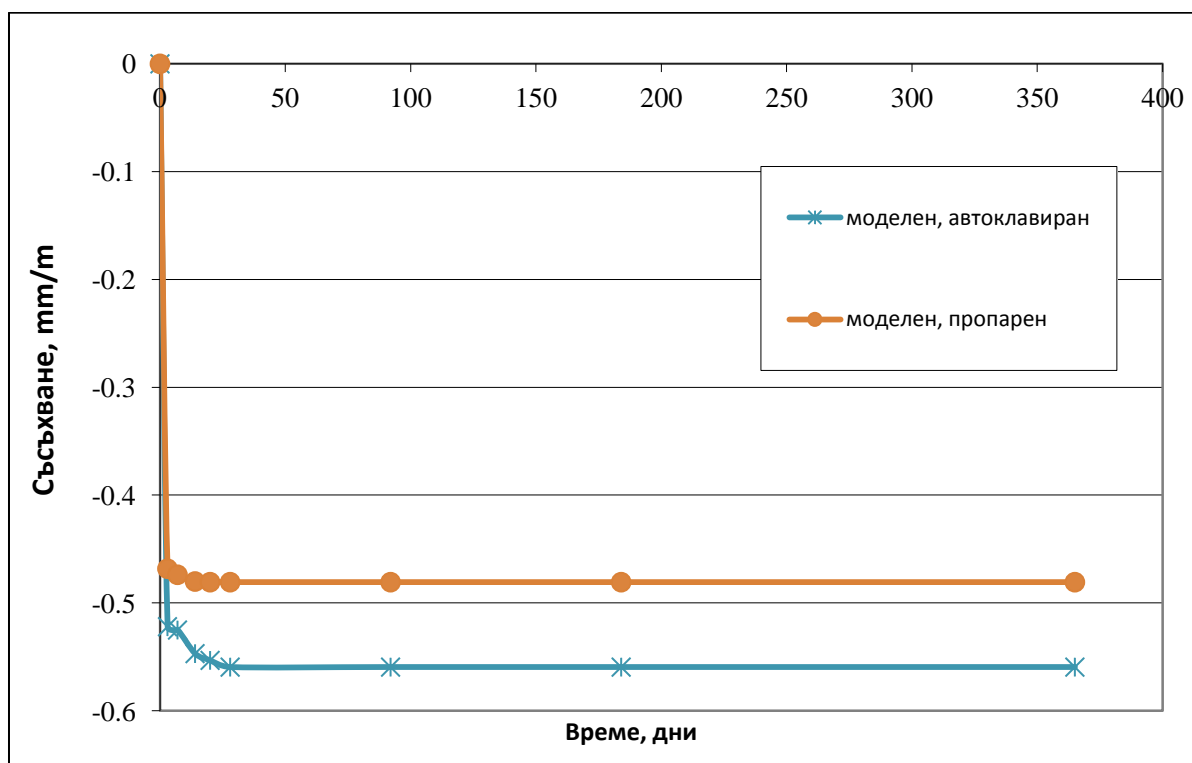
фиг. V. 17: Влияние на вида на топло-влажностната армировка върху съсъхването на СВЯБ, при оптимален състав, моделен състав и оптимален състав с 2% стоманени влакна за една година

На фиг. V. 18 е представено влиянието на топло-влажностната обработка върху поведението на моделния състав. Наблюдават се по-големи стойности на съсъхването след автоклавиране от порядъка на 0,56 mm/m, което е с над 15% повече от пропарването обработка. По този начин се потвърждава твърдението на [Acker, 2004, Graybeal, 2005], че топло-влажностната обработка води до увеличено съсъхване. Това може би се дължи на по-голямото количество образуван CSH гел, който води до по-високи контракционни напрежения. След приключване на топло-влажностната обработка, почти затихват и съсъхвателните процеси, по-силно изразени след автоклавирането.

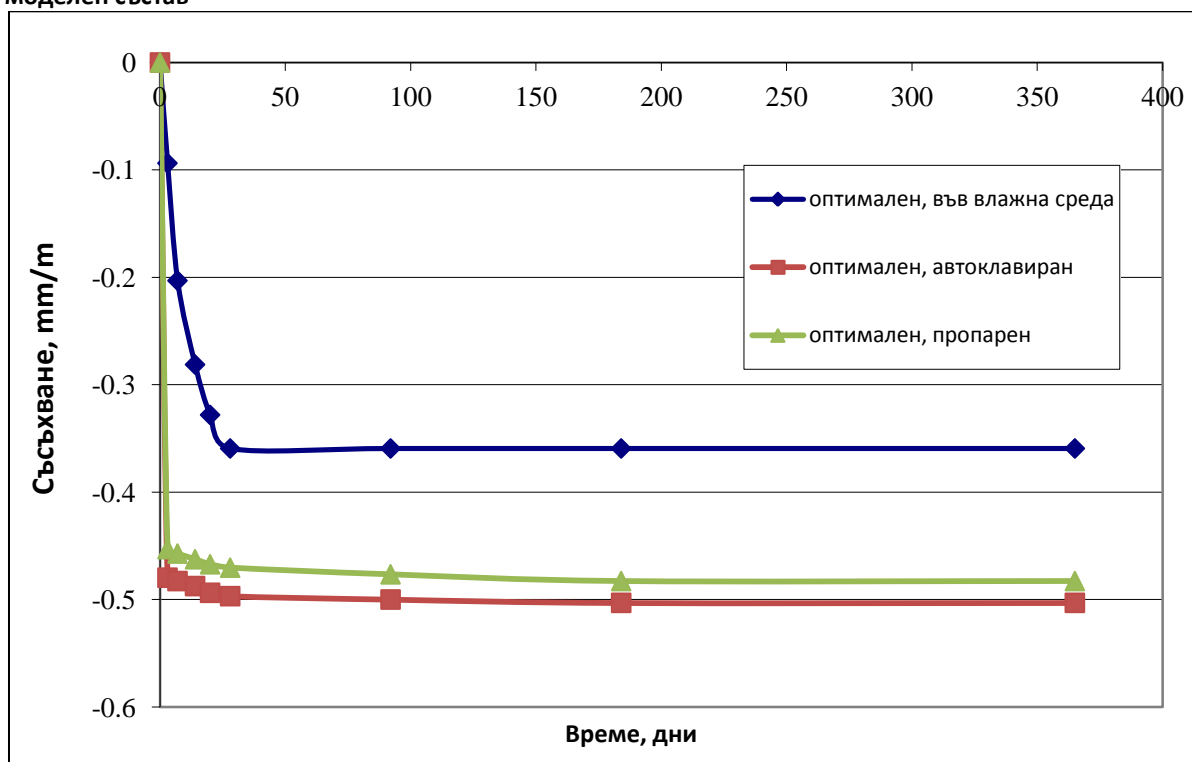
При оптималния състав се наблюдават близки стойности на съсъхването (около 0,48-0,52 mm/m) с моделния състав след прилагането на топло-влажностната обработка (фиг. V. 19). Тя предизвиква увеличаване на съсъхването, при комбинираното ѝ използване върху оптималния състав със стоманени влакна, като достига стойности от 0,44 mm/m след пропарване и 0,47 mm/m след автоклавиране, в сравнение с 0,34 mm/m при отлежаване във влажни условия (фиг. V. 20).

Причините за негативното действие на топло-влажностната обработка върху съсъхването на СВЯБ се дължат на процесите развиващи се на микроструктурно ниво. До една седмица

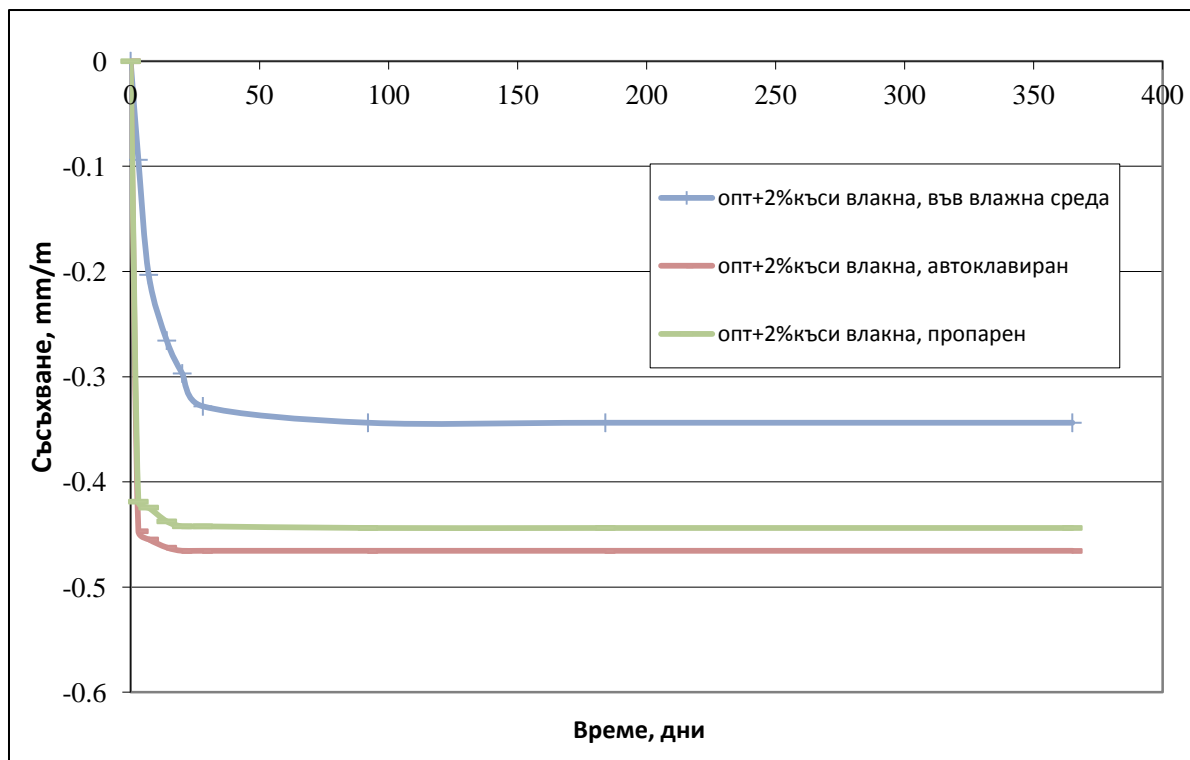
процесите на съсъхване затихват. Сравнен с пробните тела, отлежавали при влажни условия, след топло-влажностна обработка съсъхването е увеличено с над 30%, поради развитието на по-груба структура на СВЯБ. Те предизвикват опънни напрежения в структурата му чрез изтласкване на водата от големите към по-малките пори на гела.



фиг. V. 18: Влияние на вида на топло-влажностната армировка върху съсъхването на СВЯБ при моделен състав



фиг. V. 19: Влияние на вида на топло-влажностната армировка върху съсъхването на СВЯБ при оптимален състав



фиг. V. 20: Влияние на вида на топло-влажностната армировка върху съсъхването на СВЯБ при оптимален състав с 2% стоманени влакна

#### 4. Изменение на микроструктурата във времето

Изследването на структурата и свойствата на СВЯБ на микро ниво спомага за анализиране поведението на материала от гледна точка получените физични, хидрофизични и механични характеристики. Използваните основни методи за анализиране микроструктурата на бетона - ДТА, ДТГА, ТГА, СЕМ и живачна порьозиметрия (виж г. III т. 6) дават ясна представа за вида на хидратационните продукти, за количеството на свободната и химически свързаната вода в бетона, количеството и разпределението на порите по размери и др. В приложение 2 са представени подробно всички получени резултати от всички разглеждани състави.

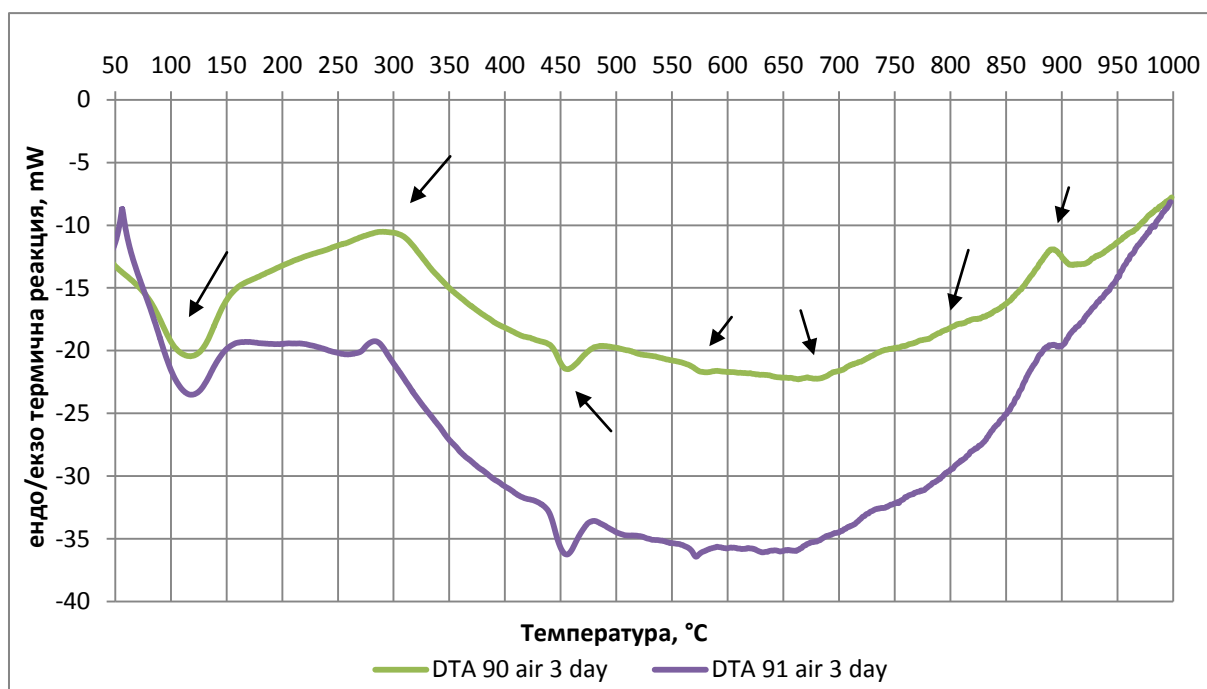
##### 4.1 Влияние на рецептурни параметри

Извършен е сравнителен анализ между оптималния и моделния състав, с цел да бъде определен от една страна видът на хидратационните продукти, а от друга количеството и разпределението на порите в обема му. Изследваните състави са на три дневна възраст.

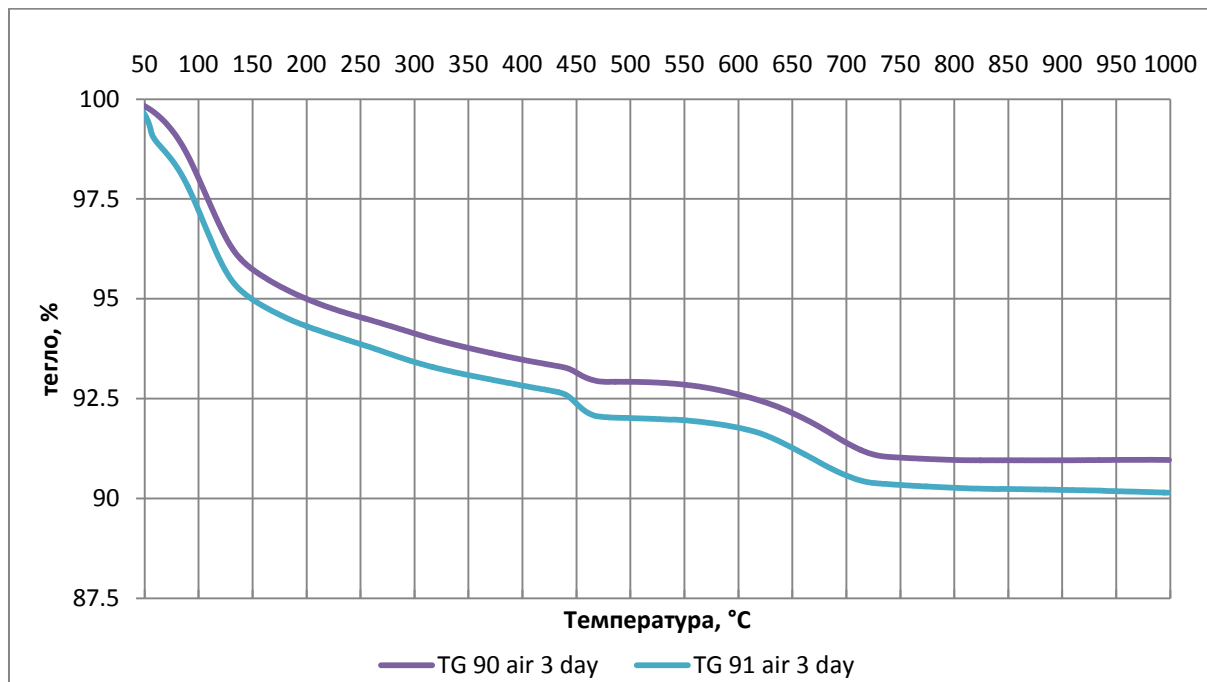
Изследвани са количествата на свободната и химически свързаната вода в бетона. Количеството вода освободено до първия ендопик отчита свободната вода, а всичко след него се химически свързана [Cheyrezy, 1995]. Пробните тела и от двата състава са отлежавали при

влажни условия. Получените криви на ДТА, ТГА и ДТГА, представени на фиг. V. 21, 22, 23 са в температурния диапазон от 50 до 1000 °C.

И при двата разглеждани състава получените криви следват много еднотипна тенденция на развитие на хидратационните процеси във времето (фиг. V. 21). Първият ясно забележим пик в диаграмата, е ендопик, около 120°C, в следствие на дехидратация на еtringита [Pourchez, 2006, Prince, 2002, Trasy, 2004]. Изцяло се променя механизма на структурообразуване на бетона в тази ранна възраст от 3-ти ден, като още в температурния диапазон от (60-80)°C се наблюдава намаляване на стабилността му [Janotka, 2005]. Кристалите на еtringита започват да се обезводняват и той постепенно се разпада [Afridi, 1993]. Последните изследвания показват, че еtringита не е стабилен при температури до 120°C [Pourchez, 2006], въпреки, че все още съществуват съвременни схващания за неговата стабилност в този диапазон [Zhou, 2001]. Новополученият минерал е метаеtringит, с частично дехидроксираля структурата и количество на водата от 10 до 13 молекули [Pourchez, 2006], в сравнение с обикновените 32 молекули H<sub>2</sub>O, които се съдържат в еtringита.

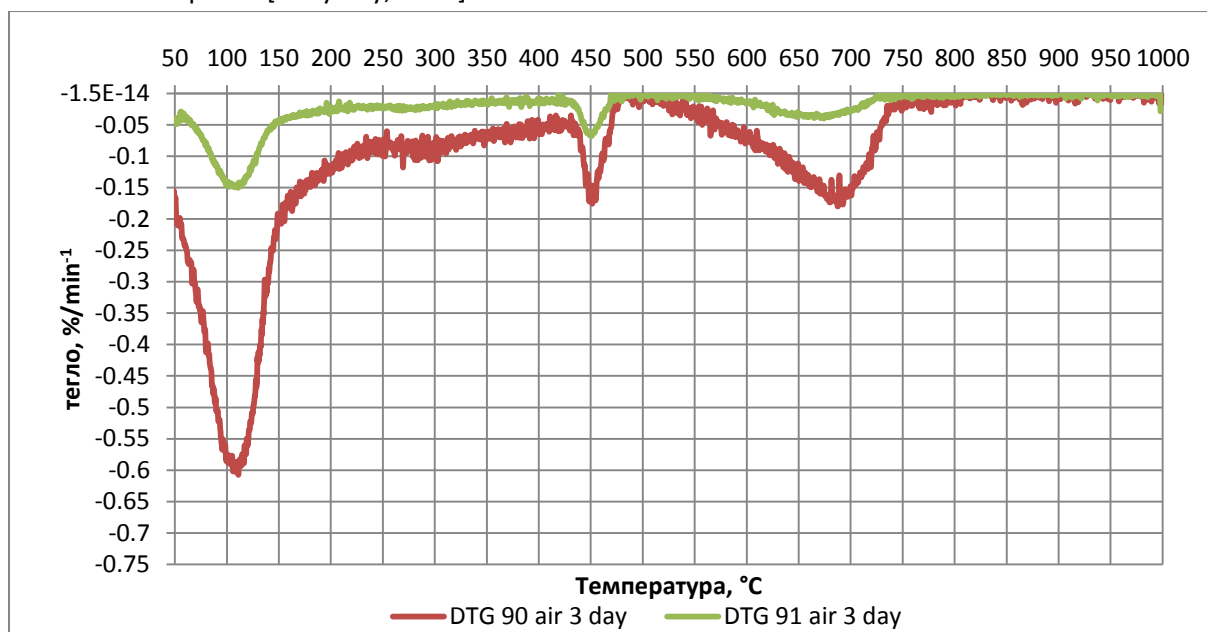


фиг. V. 21: ДТА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден, отлежавали при влажни условия



фиг. V. 22: ТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден, отлежавали при влажни условия

Ендопикът около 120°C формиран и при двата разглеждани състава на 3-ти ден, се явява при двойно по-ниска температура в сравнение с ендопиковите на същите състави, но на по-късна възраст - около 3-ти месец (приложение 2: фигура 4 или в гл. V т. 4.2 фиг. 25). Причина за това се дължи както на все още много по-големите количества неусвоена вода за осъществяване на хидратация, така и на различния характер на ендопика в по-късна възраст. Според ТГА загубата на маса и на двата състава на 3 ден, в температурния диапазон (60-250)°C, е около 5,10%, като отделената вода до 120 °C е около 3%. Отделеното количество вода до първия ендопик се смята за свободна вода, а всичко което се освобождава след него за химически свързана [Cheyrezy, 1995].



фиг. V. 23: ДТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден, отлежавали при влажни условия

Отчетеният екзопик и в двата състава в интервала (250-350)°C е неизяснен явление, което се наблюдава значително по-изразено при пробите, които са в ранна възраст. Една от хипотезите определя наличието на минерала магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) [Марковска, 2009], причиняващ загуба на тегло в граници около 0,40-0,45%. Докато при СВЯБ е отчетена загуба на тегло около 1,0%. Най-вероятната причина обаче е преобразуването на тоберморита [Пиндюк, 2011], който поради ранната хидратация на 3-ти ден е по-уязвим в сравнение с по-късна възраст, където този пик не се наблюдава.

Следващият ясно обособен пик е ендопик между (430-480)°C, който показва разпадането на портландита -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  на вар -  $\text{CaO}$  и вода -  $\text{H}_2\text{O}$ . [Loukili, 1999, Prince, 2002, Cheyrezy, Maret & Frouin, 1995, Janotka, 2005, Way, 2012, Бошнаков, 2012]. По този начин се освобождава химически свързаната вода в калциевия хидрооксид, формиран при взаимодействието на калциевите силикати с водата и в резултат на това образувалия се CSH гел и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Според ДТА анализа се наблюдава по-ясно изразен спад в диаграмата, дал своето отражение на по-голяма загуба на маса (отчетен в ТГА и ДТГА), с около 0,25%. Това обяснява по-голямото количество портландит в моделния състав, които в по-малка степен влиза вторично във взаимодействие с пуцолановата добавка от МСП, която тук е в по-малък процент – 0,2% от масата на цимента, за разлика от оптималния състав, където е 0,3%. Това оправдава необходимостта от по-големи количества МСП, които да бъдат изцяло усвоени, в следствие ускоряване и уплътняване на получените продукти на хидратацията при СВЯБ. При освобождаване на химически свързаната вода от  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  се променя хидратната фаза и в следствие на това поровата структура придобива по-груб вид. Това води до неминуемо намаляване на якостните характеристики на материала [Janotka, 2005] при тази температура.

В интервала (560-580)°C се появява ендопик поради преминаването на кварца, съдържащ се при СВЯБ в по-големи количества, от  $\beta$  в  $\alpha$  фаза [Diederichs, 2008, Way, 2012], при известна в литературата температура от 573°C [Симеонов, 1991]. Енталпията на процеса показва по-голям интензитет на кривите при моделния състав, поради по-голямо количество кварцов пясък (с около 200kg) в сравнение с оптималния състав. Загубата на маса е с незначителна разлика под 0,01%.

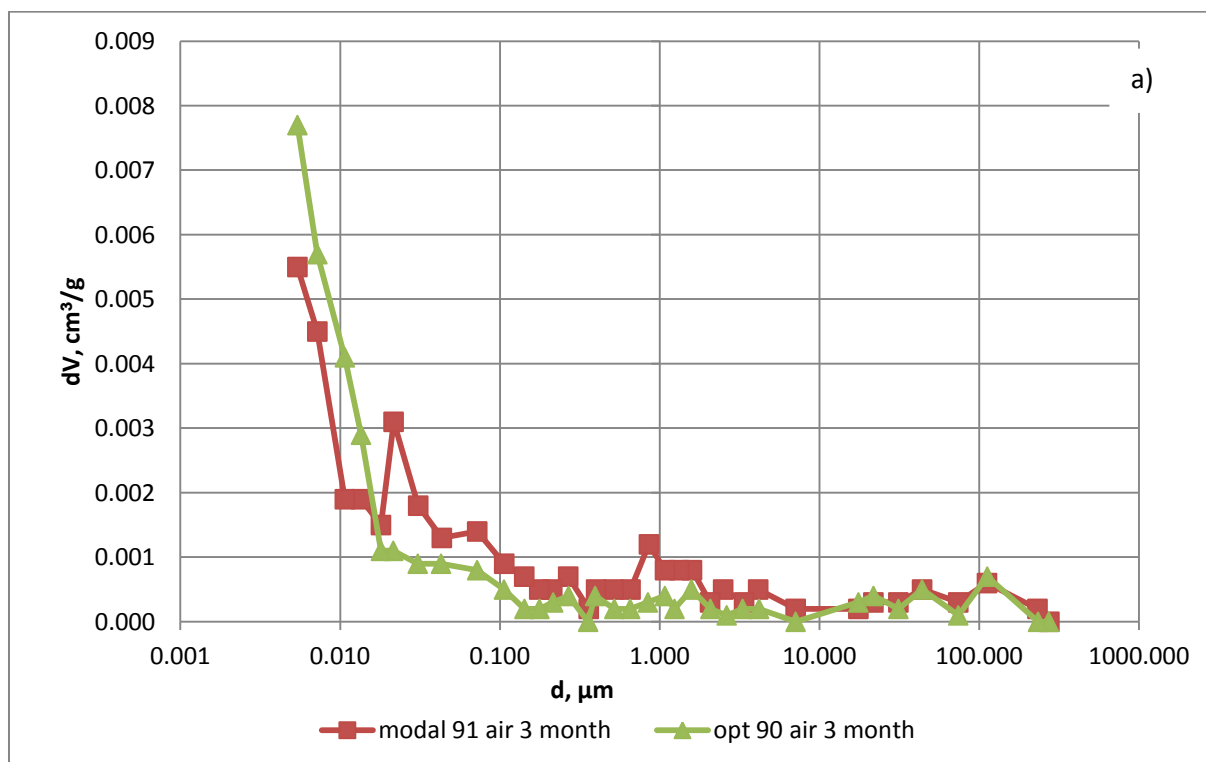
Следващата забележителна промяна в диаграмата получена при ДТА анализа е свързана с промяна на посоката на кривата рязко нагоре. В кривата на ДТА е отчетена химична реакция в интервала (650-700)°C при оптималния състав и в граници от (630-680)°C при моделния състав. Тя е резултат от започналия продължителен процес на постепенно и частично разпадане на CSH кристалите, където нискоосновните хидросиликати (тоберморита) се трансформират в кристали на волостонита ( $\text{CaSiO}_3$ ) [Way, 2012]. Според някои проучвания [Way, 2012] освен наличие на тоберморит в структурата на СВЯБ се наблюдават и кристали на ксонотлит ( $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$ ). Според някои изследователи [Cheyrezy, Maret & Frouin, 1995] формирането на този минерал в структурата е възможен само след топло-влажностна обработка, реализирана при специален режим от 250°C до 400°C. Наличието на екзопик в ДТА анализа над 800°C би могъл да идентифицира присъствието на този кристал. Друга хипотеза защитава тезата за дехидратация на калциевите хидросиликати в интервала (650-700)°C, което води до образуване на  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ , при загуба на маса от около 0,30% [Diederichs, 2008], което като стойност съвпада с отчетени загуби около 0,30-0,35%.

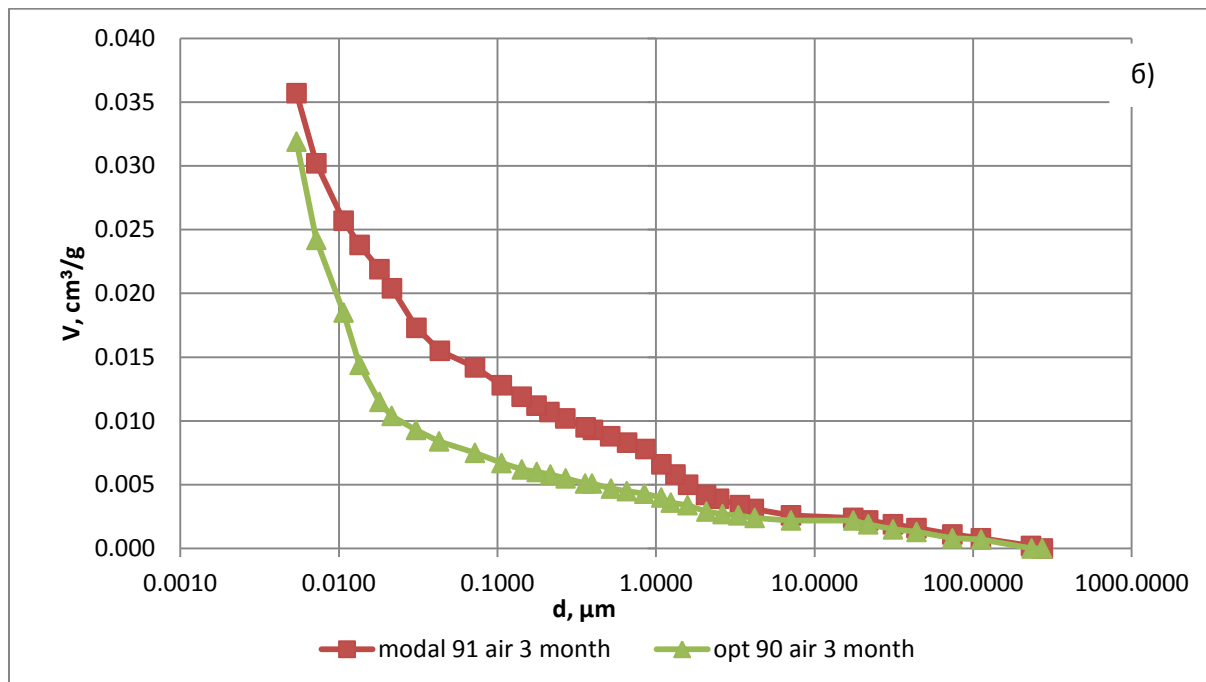


В случаите, при които пробните тела са престояли при влажни условия от  $(65 \pm 5)\%$  и температура от  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ , е възможна известна карбонизация и следователно декарбонизация на  $\text{CaCO}_3$  на  $\text{CaO}$  и  $\text{CO}_2$  още около  $720^\circ\text{C}$  [Janotka, 2005], с което се освобождава за втори път вар, след предходната дехидратация на портландита при  $(430-480)^\circ\text{C}$ . Според [Loukili, 1999] този феномен се наблюдава в по-широки граница от  $(600-750)^\circ\text{C}$ , докато [Prince, 2002] го дефинира около  $800^\circ\text{C}$ , а [Cheyrezy, Maret & Frouin, 1995] около  $(750-800)^\circ\text{C}$ .

В интервала от  $(820-880)^\circ\text{C}$  (фиг. V. 5) се наблюдава трансформация на кристалната структура на  $\text{CSH}$ , при която протича процес на непрекъснатото му обезводняване до края на изследвания температурен интервал от  $1000^\circ\text{C}$  [Diederichs, 2008]. Загубите на маса според ТГА и ДТГА са пренебрежимо малки – под  $0,1\%$ . Наблюдава се обаче екзопик около  $890^\circ\text{C}$ , свързан с формиране на нови фази [Георгиев, 2009], по-забележимо изразени в по-късна възраст и по-специално при пробите, които са били оставени да отлежават във влажни условия. Това може би се дължи на трансформацията на  $\alpha$ -кварц в  $\alpha$ -тридимит [Георгиев, 2009], поради невъзможността за изконсумиране на цялото количество финни частици от кварцово брашно и образуване на вторични продукти на хидратация, при обикновени условия на отлежаване, за сметка на приложените термо-влажностни обработки от пропарване и автоклавиране.

Микроструктурните изследвания на СВЯБ посредством живачната порьозиметрия потвърждават превъзходството на оптималния състав над моделния. На фиг. V. 24 е представено диференциалното и интегрално разпределение на порите, което показва съответно количеството на порите по диаметри и натрупаното количество пори до съответния диаметър при двата разглеждани състава, отлежавали 3 месеца при влажни условия.





фиг. V. 24: Разпределение на порите на 3-ти месец, на оптимален състав 90 и моделен състав 91, отлежавали във влажни условия, представено в: а) диференциален вид; б) интегрален вид

Като цяло е отчетено няколко пъти по-малко количество обща порьозност при СВЯБ в сравнение с обикновения бетон. Най-значителната разлика се наблюдава при капилярните пори (макро и мезо), които са над 10 пъти повече в сравнение с получените при СВЯБ. Отчита се и общо увеличение на гелните пори при СВЯБ, поради по-голямото количество хидратационни продукти.

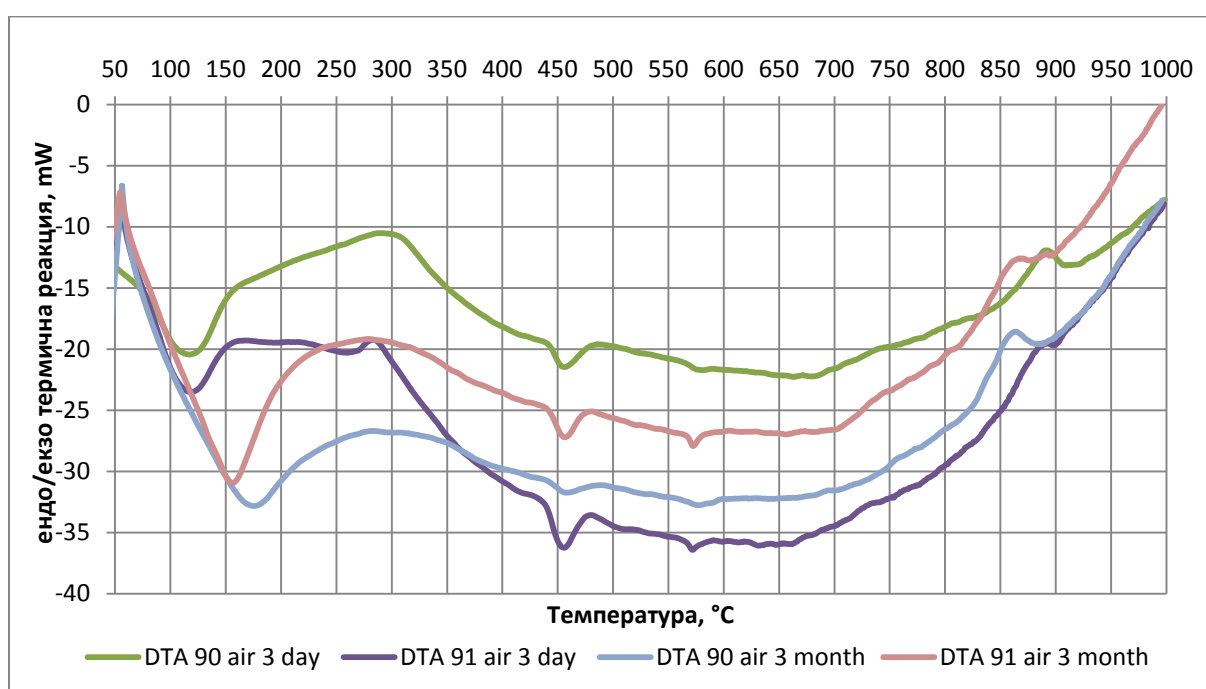
Количеството на въздушните пори по-големи от 10  $\mu\text{m}$  и при двата разглеждани състава не се различава. Това се дължи на еднаквата технология на приготвяне, по време на която е отчетено и при двата състава въздуховъвличане от около 5,5%. Първата съществена разлика в поровото пространство се забелязва при макрокапилярни пори в интервала (0,05-10)  $\mu\text{m}$ , които при оптималния състав прогресивно намаляват с намаляване на размера им. Причина за това е моделираната уплътнена структура на бетона (виж г. IV т. 3.2). Отчетена е разлика от 80%, като . При оптималния състав натрупаното количество пори до 0,05  $\mu\text{m}$  е около 0,008  $\text{cm}^3/\text{g}$ , за разлика от моделния където е 0,016  $\text{cm}^3/\text{g}$ . С преминаване към мезокапилярни пори, с размери от 0,03  $\mu\text{m}$  до 0,05  $\mu\text{m}$ , количеството на порите при моделния състав нараства над 2,5 пъти.. Това се дължи на по-голямото количество хидратационни продукти при оптималния състав, което запълва пространството както на макро-, така и на мезокапилярните пори. Това рефлектира на над 50% по-голямо количество пори на гела при оптималния състав, като достига до 0,0078  $\text{cm}^3/\text{g}$  при 0,005  $\mu\text{m}$ , за разлика от моделния състав, при който порестостта стига до 0,005  $\text{cm}^3/\text{g}$ . Въпреки това интегралната диаграма отчита по-нисък общ коефициент на порестост от 7,36% при оптималния състав, за сметка на 8,12% при моделния състав. Получените резултати показват малко по-високи стойности и при двата състава от СВЯБ, за разлика от тези на относителната порестост представени в г. IV т. 3.1.2. И при двата метода оптималният състав показва по-ниска порестост.

Оптималният състав дава по-добри възможности за развиване на якостите във времето в сравнение с моделния, в следствие на получените от една страна по-големи количества хидратационни продукти и от друга поради по-ниската обща порьозност, особено при капиларните пори.

#### 4.2 Влияние на технологичните параметри

##### 4.2.1 Влияние на времето на отлежаване

В табл. 9 подробно са представени структурните преобразувания в двата разглеждани състава (оптимален и моделен) в температурния диапазон от 0 до 1000 °C . Получените ДТА криви (фиг. V. 25) на образците на възраст 3-ти месец се отличават от тези на 3-ти ден основно в загубата на вода при ниските температури.



фиг. V. 25: ДТА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на различна възраст и отлежавали при влажни условия

Отделянето на физически свързаната вода в късна възраст на бетона при нагряване, абсорбирала по повърхността на минералите на калциевите хидросиликати, формира ендопик около 160°C при моделния състав и 170°C при оптималния, със загуба на маса съответно от 5 и 6%. В ранна възраст този пик се явява още при температура от 120°C, като при освобождаването на физически свързаната вода се отчита и дехидратация на еtringита, наблюдаван в този период.

Друга основна разлика се отчетена при разпадането на химически свързаната вода в  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  около 460°C, което е по-слабо изразено при оптималния състав, тъй като голяма част от него е била усвоена в реакции от пуцоланов тип. Още на 3-ти ден се наблюдава по-малък пик при оптималния състав, като на 3-ти месец почти не се отчита наличие на портландит. С по-голяма интензивност при моделния състав протича процесът на преобразуване на кварцовите

частици от  $\alpha$  в  $\beta$   $\text{SiO}_2$ , (при температура от  $570^\circ\text{C}$ ). При оптималния състав, в който има наличие на кварцово брашно, кварцовото брашно е взаимодействало с продуктите на хидратция и по този начин е редуцирано общото количество кварц в състава. Този процес се наблюдава независимо от възрастта на бетона. При него, за разлика от моделния, се отчита и трансформация на кристалната структура на обезводнения вече CSH гел при малко по-висок температурен интервал от около ( $870\text{-}920^\circ\text{C}$ ).

**табл. V. 8: Развитие на термичните процеси от 0 до  $1000^\circ\text{C}$  при оптимален състав 90 и моделен състав 91, отлежавали във влажна среда на 3-ти ден и 3-ти месец**

Температурен интервал, $^\circ\text{C}$	Оптимален състав		Моделен състав	
	3 ден /ранна възраст/	3 месец /късна възраст/	3 ден /ранна възраст/	3 месец /късна възраст/
60-250	Ендопик при $120^\circ\text{C}$ , дехидратация на еtringита	Ендопик при $170^\circ\text{C}$ , свързан с частична дехидратация на CSH и отделяне на физически свързаната вода	Ендопик при $120^\circ\text{C}$ , дехидратация на еtringита	Ендопик при $160^\circ\text{C}$ , свързан с частична дехидратация на CSH и отделяне на физически свързаната вода
250-350	Екзопик, поради дехидратация на тоберморита	Без ясно изразен пик	Екзопик, поради дехидратация на тоберморита	Без ясно изразен пик
350-430	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания
430-480	Разпадане на химически свързаната вода в $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Пик с по-малка интензивност, разпадане на химически свързаната вода, ако има останал $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Разпадане на химически свързаната вода в $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , пик с голяма интензивност	Пик с по-малка интензивност, частично разпадане на химически свързаната вода в останалия $\text{Ca}(\text{OH})_2$
480-560	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания
560-580	Слабо преобразуване на кварцовите частици от $\alpha$ в $\beta$ $\text{SiO}_2$	Слабо преобразуване на кварцовите частици от $\alpha$ в $\beta$ $\text{SiO}_2$	Преобразуване на кварцовите частици от $\alpha$ в $\beta$ $\text{SiO}_2$	Преобразуване на кварцовите частици от $\alpha$ в $\beta$ $\text{SiO}_2$
580-680	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания
680-710	Частично разпадане на CSH, чрез	Частично разпадане на CSH, чрез	Частично разпадане на CSH, чрез	Частично разпадане на CSH, чрез

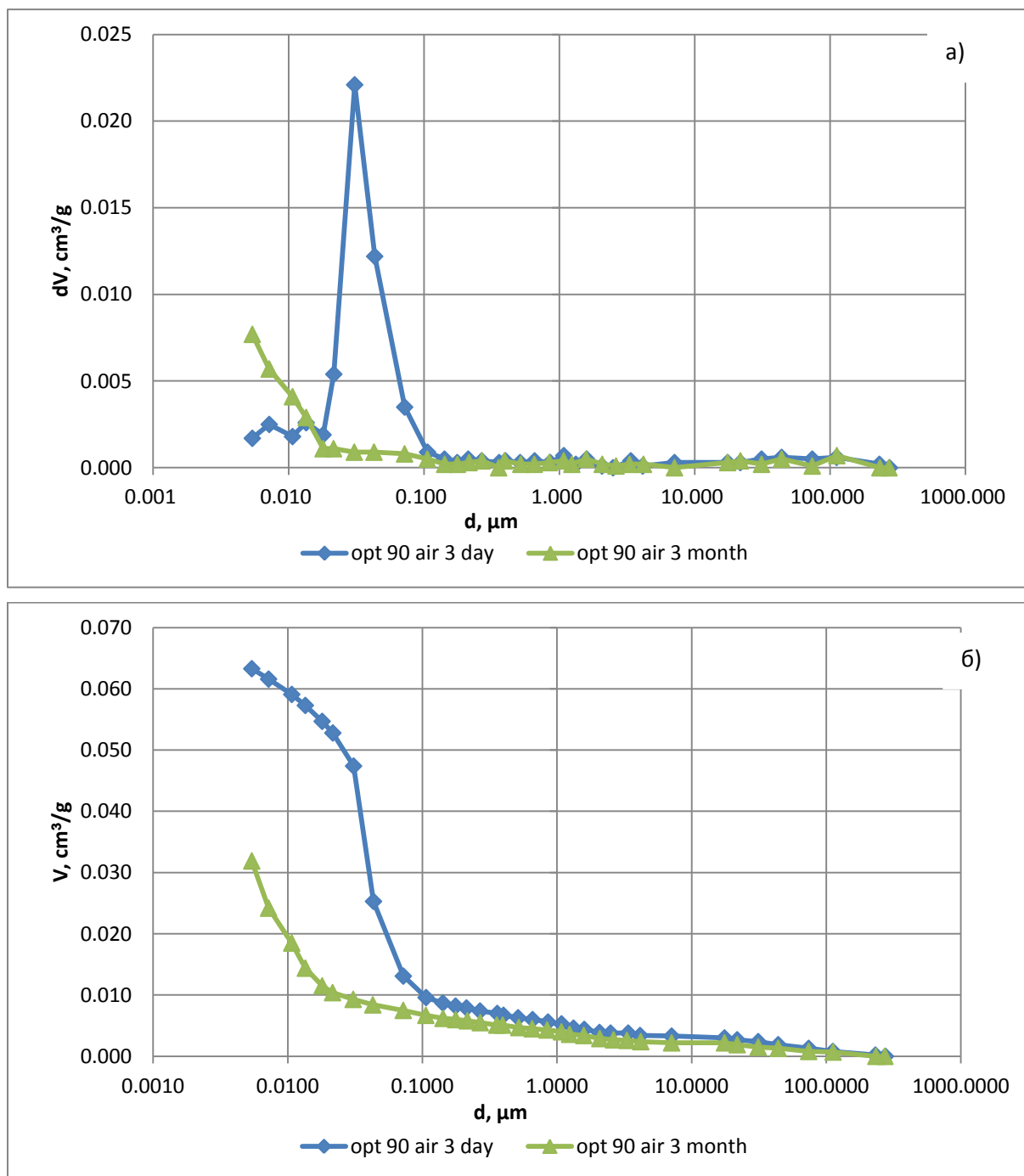
Температурен интервал, °С	Оптимален състав		Моделен състав	
	3 ден /ранна възраст/	3 месец /късна възраст/	3 ден /ранна възраст/	3 месец /късна възраст/
	трансформация на тоберморита във властонит	трансформация на тоберморита във властонит	трансформация на тоберморита във властонит	трансформация на тоберморита във властонит
710-820	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания	Без химични преобразувания
820-920	От <b>870-920°C</b> Трансформация на кристалната структура на обезводнения CSH;	Трансформация на кристалната структура на обезводнения CSH; Нови фази от $\alpha$ кварц в $\beta$ тридимит	От <b>860-900°C</b> Трансформация на кристалната структура на обезводнения CSH;	Трансформация на кристалната структура на обезводнения CSH; Нови фази от $\alpha$ кварц в $\beta$ тридимит
920-1000	Увеличаване на екзотермията	Увеличаване на екзотермията	Увеличаване на екзотермията	Увеличаване на екзотермията

Загуба на маса на двата разглеждани състава, в ранна и късна възраст, разпредена по интервали, е представена в табл. V. 10. Големината и интензивността на пиковете в диаграмата на ДТА дават своето отражение и в ТГА и ДТГА. Отчетените по-големи пикове в диаграмата на ДТА, съответстващи на по-интензивна дехидратация или трансформация на структурата водят и до по-голяма загуба на маса, в общия случай отчетена при моделния състав.

**табл. V. 9: Загуба на маса на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден и 3-ти месец**

Температурен интервал, °С	Оптимален състав		Моделен състав	
	Загуба на маса на 3-ти ден, %	Загуба на маса на 3-ти месец, %	Загуба на маса на 3-ти ден, %	Загуба на маса на 3-ти месец, %
60-250	5,10	5,83	5,10	6,26
250-350	0,77	1,09	0,78	0,90
350-430	0,44	0,53	0,41	0,49
430-480	0,41	0,27	0,65	0,33
480-560	0,10	0,15	0,10	0,12
560-580	0,10	0,04	0,07	0,05
580-680	1,00	0,37	1,04	0,52
680-710	0,46	0,25	0,36	0,31
710-820	0,30	0,22	0,23	0,07
820-920	/870-920°C/0,00	0,12	/860-900°C/0,04	0,18
920-1000	0,00	0,07	0,06	0,07
0-1000	8,58	8,94	8,84	9,30

Интензивността на развитие на хидратационните процеси с времето е изследвана и чрез метода на живачната порьозиметрия (фиг. V. 26) при двата разглеждани състава.



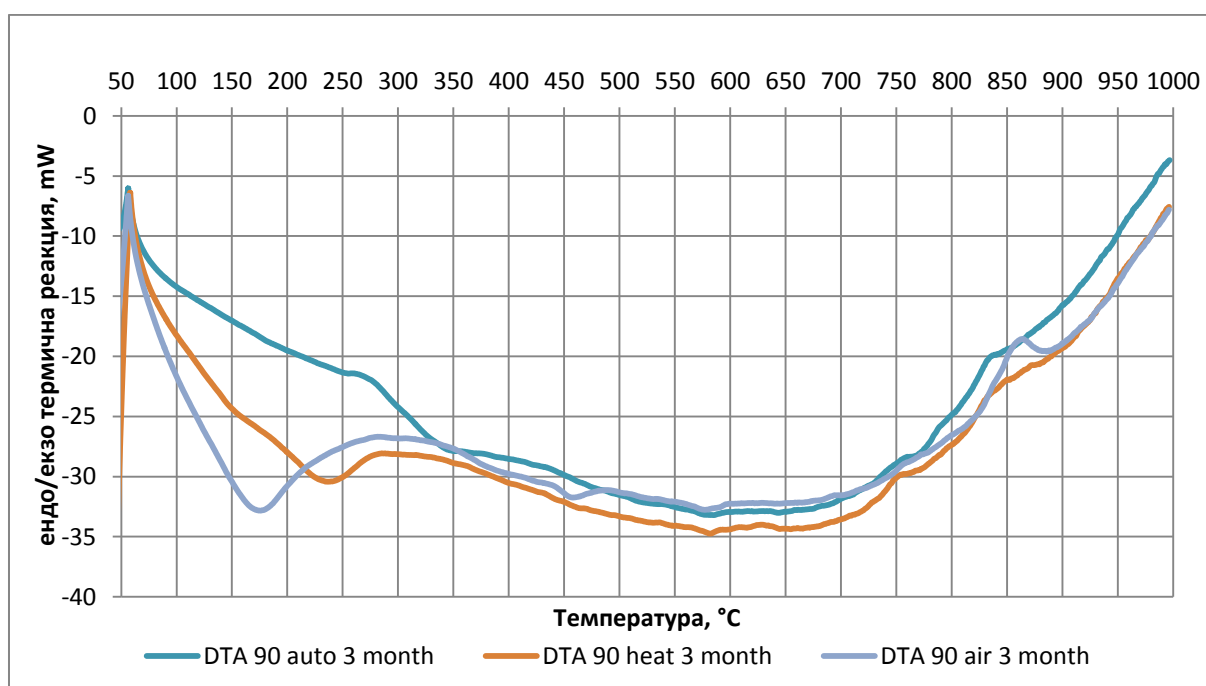
фиг. V. 26: Разпределение на порите във времето на оптимален състав 90, отлежавал във влажна среда, представено в: а) диференциален вида; б) интегрален вид

Интерес представлява изменението във времето на количеството на мезокапилярните пори (със среден диаметър 0,05  $\mu\text{m}$ ). В ранна възраст (3-ти ден), въпреки началната степен на хидратация, количеството им е по-малко в сравнение с това при обикновените бетони. С нарастване на възрастта на бетона, количеството им намалява с няколко порядъка. Този ефект е по-изразен при оптималния състав, заради голямото количество МСП, което освен че има

запълващ ефект поради фината си зърнометрия, но и предизвиква пуцоланова реакция с портландита. За сметка на това, с нарастване на възрастта двойно се увеличава количество на нанопорите в гела (със среден диаметър 30 nm). По този начин общата порестост в късна възраст достига 7,36%, докато на 3-ти ден е измерена стойност от 13,83%.

#### 4.2.2 Влияние на условията на отлежаване

Прилагането на топло-влажностна обработка води до промени в хидратационните продукти (фиг. V. 27), особено при оптималния състав с наличие на кварцово брашно в него. Отчетените пикове при него отговарят на отделянето на физически свързаната вода (табл. V. 11) и частична дехидратация на CSH, като тези промени обаче настъпват в по-късен етап, в сравнение с образците отлежавали във влажни условия.



фиг. V. 27: ДТА анализ на оптимален състав 90 при различни условия на отлежаване

Съществуват разлики в структурните преобразувания в образците третирани чрез пропарване и след автоклавиране (табл. V. 11). В диаграмата на ДТГА могат да се видят по-видимо разликите (пр.2. фиг.15). След пропарване отчетеният пик е около 220°C, като се наблюдават отделни вариации от кривата още около 160°C. В диаграмата на ДТГА след автоклавиране обаче се вижда пик с малка интензивност още около 160°C, с отделяне на свободната вода и друг около 330°C, който се дължи на частичната дехидратация на CSH. Това отнемстване доказва формираната по-плътна структура след автоклавирание.

Друга характерна особеност на диаграмите е липсата на ендопик около 460°C, при оптималния състав подложен на топло-влажностна обработка, от разпадането на химически свързаната вода в  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Това доказва изконсумирането на портландита в пуцоланови реакции с МСП и кварцово брашно и след двата вида третиране. В сравнение с ранната възраст на СВЯБ, в късна възраст и особено след топло-влажностна обработка, все по-слабо се отчита

преобразуването на кварцовите частици от  $\alpha$  в  $\beta$  SiO<sub>2</sub>, които са намалели в процеса им на вторично взаимодействие с продуктите на хидратация на цимента.

табл. V. 10: Развитие на термичните процеси от 0 до 1000 °C при оптимален състав 90, подложен на различни топло-влажностни обработки

Температурен интервал °C	Изготвяне и отлежаване във влажна среда до 3-ти месеца	Температурен интервал °C	Прораване на 2-ри ден, отлежаване във влажна среда до 3-ти месец	Температурен интервал °C	Автоклавиране на 2-ри ден, отлежаване във влажна среда до 3-ти месец
60-270	Ендопик при 170°C, свързан отделяне на физически свързаната вода и с частична дехидратация на CSH	60-300	Изместване на ендопока при 230°C с минимално отделяне на физически свързаната вода и частична дехидратация на CSH	60-250	Липса на ендопик, с минимално отделяне на физически свързаната вода без значителна загуба на маса
270-430	Без химични преобразувания	300-430	Намаляване на екзотермията	250-380	Ендопик около 330°C с частична дехидратация на CSH
430-480	Разпадане на химически свързаната вода в Ca(OH) <sub>2</sub>	430-570	Без химични преобразувания	380-570	Без химични преобразувания
480-570	Без химични преобразувания				
570-600	Слабо преобразуване на кварцовите частици от $\alpha$ в $\beta$ SiO <sub>2</sub>	570-600	Слабо преобразуване на кварцовите частици от $\alpha$ в $\beta$ SiO <sub>2</sub>	570-600	Слабо преобразуване на кварцовите частици от $\alpha$ в $\beta$ SiO <sub>2</sub>
600-750	Частично разпадане на CSH, чрез трансформация на тоберморита във властонит	600-800	Частично разпадане на CSH, чрез трансформация на тоберморита във властонит	600-700	Без химични преобразувания
750-800	Без химични преобразувания			700-830	Частично разпадане на CSH, чрез трансформация на тоберморита във властонит



Температурен интервал °С	Изготвяне и отлежаване във влажна среда до 3-ти месеца	Температурен интервал °С	Прораване на 2-ри ден, отлежаване във влажна среда до 3-ти месец	Температурен интервал °С	Автоклавиране на 2-ри ден, отлежаване във влажна среда до 3-ти месец
800-900	Силен екзопик, с трансформация на кристалната	800-900	Минимална промяна в трансформация	830-860	Минимална трансформация на кристалната
	структура на обезводнения CSH; Нови фази от $\alpha$ кварц в $\beta$ тридимит		на кристалната структура на обезводнения CSH с малка загуба на маса;		структура на обезводнения CSH;
900-1000	Без химични преобразувания	900-1000	Без химични преобразувания	860-1000	Без химични преобразувания

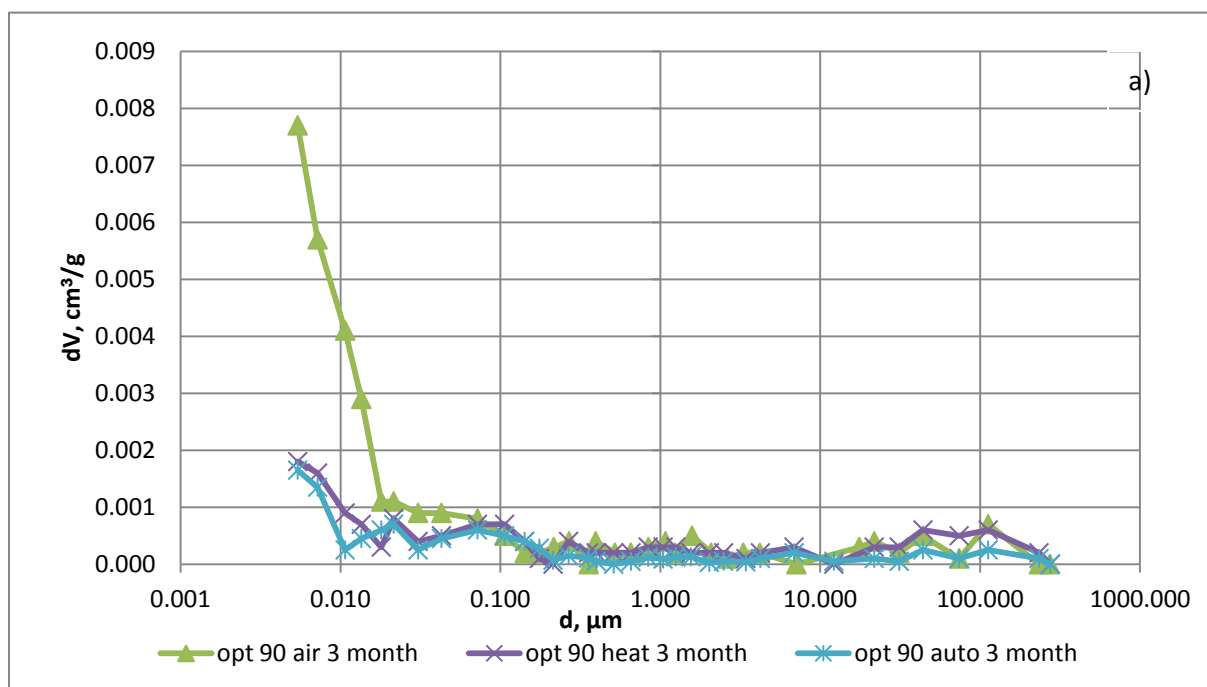
Отчетените стойности в загубата на маса (табл. V. 12) при оптималния състав показва по-голяма редуция на вода в началния период след отлежаване във влажни условия и след пропарване, докато автоклавната обработка води до два пъти по-ниски стойности от около 3,3% в разглеждания интервал (60-270)°С. В последствие разликата е изравнена след частичната дехидратация на CSH. По-големите стойности на общото количество загубена вода от 0 до 1000°С след автоклавна обработка се дължи на дехидратацията на продуктите на хидратацията. Причина за това е и освобождаването на водата в по-късен етап, когато тя се характеризира като химически свързана. Това доказва не само ускоряването на процесите на хидратация при оптималния състав, но и цялостно полученото по-голямо количество хидратационни продукти.

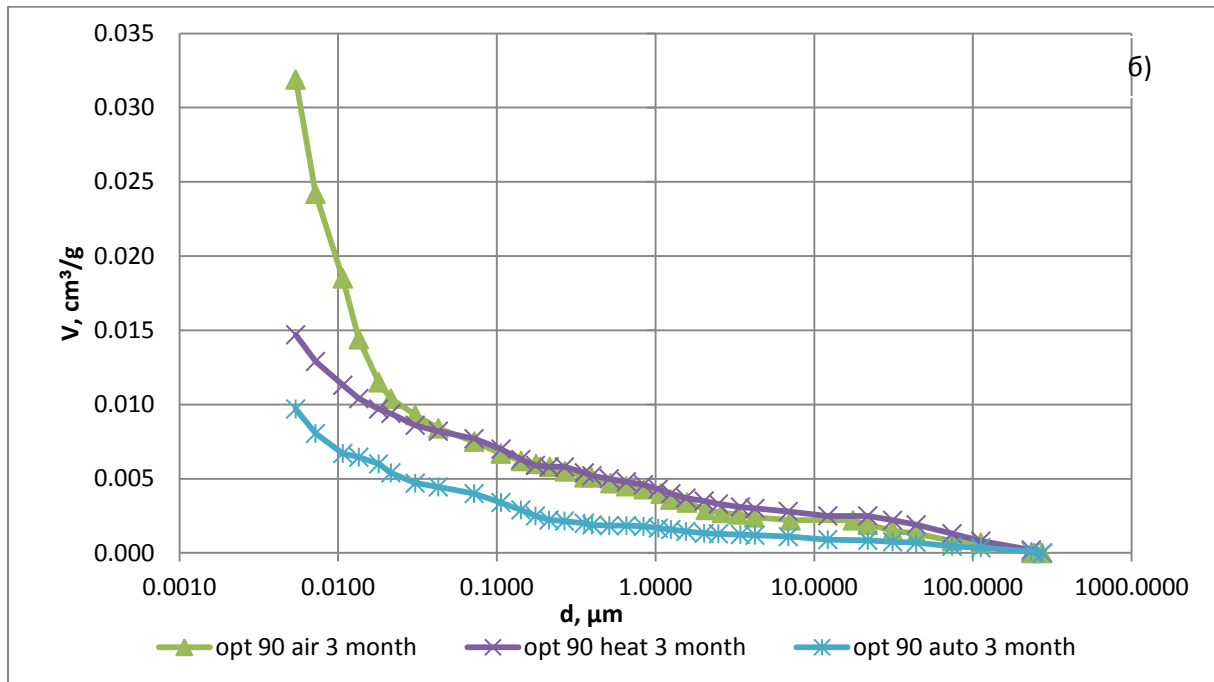
**табл. V. 11: Загуба на маса на оптимален състав 90, подложен на различни топло-влажностни обработки**

Температурен интервал, °С	Загуба на маса във влажна среда, 3-ти месец, %	Температурен интервал, °С	Загуба на маса след пропарване, 3-ти месец, %	Температурен интервал, °С	Загуба на маса след автоклавиране, 3-ти месец, %
60-270	6,11	60-300	6,76	60-250	3,33
270-430	1,34	300-430	1,17	250-380	3,57
430-480	0,27	430-570	0,61	380-570	1,73
480-570	0,17				
570-600	0,06	570-600	0,08	570-600	0,08
600-750	0,83	600-800	1,06	600-700	0,41
750-800	0,02			700-830	0,64
800-900	0,13	800-900	0,16	830-860	0,03
900-1000	0,07	900-1000	0,12	860-1000	0,14
0-1000	8,94	0-1000	9,96	0-1000	9,93

Положителният ефект от прилагането на топло-влажностна обработка, върху структурата и свойствата на СВЯБ, е изследван и чрез метода на живачната порьозиметрия върху оптималния състав.

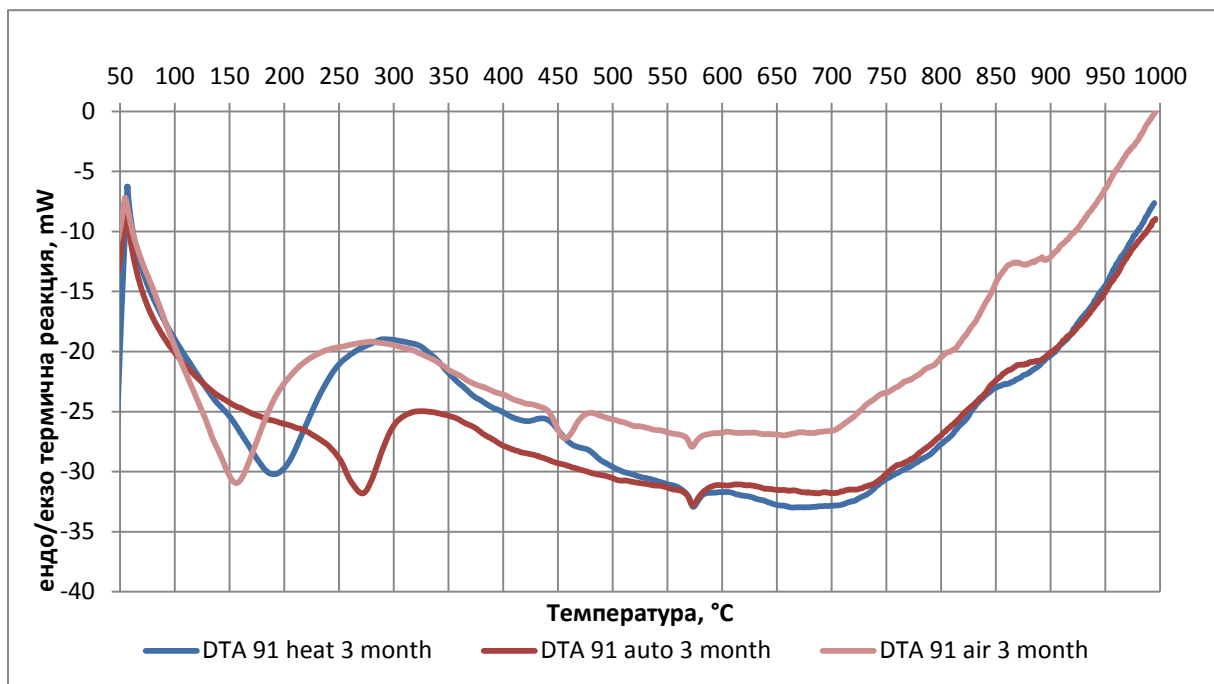
На фиг. V. 28 е извършено сравнение между оптималния състав, отлежавал при влажни условия и състави след пропарване и автоклавиране, представени чрез диаграмите им на диференциално и интегрално разпределение на порите. Прилагането на топло-влажностна обработка по подобие на обикновените бетони, води и до формиране на по-груба структура на СВЯБ по отношение на въздушните пори около 100  $\mu\text{m}$ , който ефект е по-забележим при пропарването. Това би могло да рефлектира на хидро-физичните свойства на материала, както и на съсъхвателните процеси в него. В същия момент топло-влажностната обработка води до още по-голямо редуциране на микрокапилярните пори, без да има съществен ефект върху мезокапилярните пори, което по принцип е характерно за обикновения бетон. Основно се отчита редукция на порите на гела, по-малки от 0,01  $\mu\text{m}$ , над два пъти след пропарване и над 3 пъти след автоклавиране. Като цяло, оптималният състав се характеризира с по-малка обща порестост в сравнение с моделния - при отлежаване във влажна среда порестостта на моделния състав е 8,12%, докато на оптималния е 7,36% и намалява до 3,21% след пропарване и до 2,78% след автоклавиране. Това се дължи както на по-уплътнената му структура, така и на по-голямото количество формиран CSH гел, образуване вследствие на допълнителни пуцоланови реакции.





фиг. V. 28: Разпределение на порите на оптимален състав 90, при различни топло-влажностни обработки, представено в: а) диференциален вид; б) интегрален вид

Ефективността на топло-влажностната обработка при моделния състав е също обект на отделно изследване (фиг. V. 29).



фиг. V. 29: ДТА анализ на моделен състав 91 при различни условия на отлежаване

При моделния състав прилагането на топло-влажностна обработка води също до увеличаване на количеството на хидратационните продукти, изразено в по-късен температурен интервал (табл. V. 13). При него се освобождава физически свързаната вода, абсорбирана по повърхността на минералите на калциевите хидросиликати. Този ефект е по-силно изразен при

автоклавирания състав. При нагряване се извършва цялостно изсушаване на образеца, без да се променят физическите му характеристики, а напротив увеличаване на якостта му на натиск с 40%, при температура до 200°C [Way, 2012]. Не само липсата на свободна вода, но и преориентацията на тоберморита в циментовата паста, може би са причината за това нарастване на механичните характеристики [Shaw, 2000; Taylor, 1957].

В следствие прилагането на топло-влажностна обработка отделянето на свободната вода се затруднява при ниски температури и ендопиковете, които идентифицират този процес се изместват към по-високите температурни диапазони. След прилагане на пропарване при оптималния състав отделената свободна вода се наблюдава при инфлексна точка от 230°C, докато при моделния тя се е отделила още на 185°C. Като цяло количество на физически свързаната вода и при двата състава се отличава с разлика под 0,1% (табл. V. 14). Описаните преобразувания в температурния интервал (50-200)°C разграничават поведението на двата материала и убославя по-доброто поведение на оптималния състав при екстремни въздействия като пожар например.

Използването на автоклавна обработка дава забележителна разлика както на двата състава един с друг, така и в сравнение с прилагането на пропарване и при влажна среда. При моделния състав се забелязва тенденция за изместване на ендопика около 265°C, с пренебрежима загуба на маса в сравнение в пропарването, което показва по-подобрените условия за протичане процеса на хидратация, но все още неизконсумирано голямо количество физически свързана вода, която не е успяла да влезе във взаимодействие с компонентите на сместа. При оптималния състав такъв ендопик не се наблюдава. При него имаме почти изцяло усвояване на свободната вода в следствие на ускорената хидратация, с по-малко количество загуба на вода, при аналогични температури на другите топло-влажностни обработки. Това доказва получените по-високи механични характеристики на автоклавирания образци от оптималния състав, в сравнение с тези на модалния. По-високата степен на хидратация на този състав формира по-голям дял на калциевите хидросиликати, получени при първичната хидратация на цимента и вторично чрез активните добавки.

Прилагането на топло-влажностна обработка значително изменя разпадането на химически свързаната вода, т.е отделянето на H<sub>2</sub>O в следствие на разлагането на Ca(OH)<sub>2</sub> на CaO и H<sub>2</sub>O. При третиране с пара се забелязва и при двата състава тенденция на намаляване на ендотермичната реакция, с минамална загуба на тегло и с по-ниска скорост на изменение му (пр. 2 фиг. 21). Докато при автоклавиране се наблюдава изцяло изглаждане на диаграмата (пр. 2 фиг. 22 и 24), което показва липса на портландит, поради пълното му изчерпване в по-ранна възраст за вторична хидратация.

Преобразуването на фазовия състав на кварца след топло-влажностната обработка не оказва съществено значение в интервала (560-580)°C, като хода на кривата се запазва както при оптималния, така и при моделния състав. Съществени промени не се наблюдават и в другите разглеждани интервали.

табл. V. 12: Развитие на термичните процеси от 0 до 1000 °C при моделен състав 91, подложен на различни топло-влажностни обработки

Температурен интервал °C	Изготвяне и отлежаване във влажна среда до 3-ти месеца	Температурен интервал °C	Прораване на 2-ри ден, отлежаване във влажна среда до 3-ти месец	Температурен интервал °C	Автоклавиране на 2-ри ден, отлежаване във влажна среда до 3-ти месец
60-200°C	Ендопик при 160°C, с отделяне на физически свързаната вода	60-250°C	Изместване на ендопока с минимално отделяне на физически свързаната вода	60-200°C	Минимална интензивност на загубата на тегло без отчетлив ендопик, с минимално отделяне на физически свързаната вода
200-350°C	Частична дехидратация на CSH	250-350°C	Частична дехидратация на CSH	200-330°C	Ендопик при 270°C с частична дехидратация на CSH
350-430°C	Без химични преобразувания	350-430°C	Без химични преобразувания	330-430°C	Без химични преобразувания
430-480°C	Разпадане на химически свързаната вода в Ca(OH) <sub>2</sub>	430-480°C	Разпадане на химически свързаната вода в малкото останал Ca(OH) <sub>2</sub>	430-480°C	Без наличие на пик, не се отделя химически свързана вода, изцяло консумиран Ca(OH) <sub>2</sub>
480-560°C	Без химични преобразувания	480-560°C	Без химични преобразувания	480-560°C	Без химични преобразувания
560-580°C	Преобразуване на кварцовите частици от α в β SiO <sub>2</sub>	560-580°C	Преобразуване на кварцовите частици от α в β SiO <sub>2</sub>	560-580°C	Преобразуване на кварцовите частици от α в β SiO <sub>2</sub>
580-650°C	Без химични преобразувания	580-650°C	Без химични преобразувания	580-650°C	Без химични преобразувания
650-730°C	Частично разпадане на	650-750°C	Частично разпадане на	650-750°C	Частично разпадане на

Температурен интервал °С	Изготвяне и отлежаване във влажна среда до 3-ти месеца	Температурен интервал °С	Прораване на 2-ри ден, отлежаване във влажна среда до 3-ти месец	Температурен интервал °С	Автоклавиране на 2-ри ден, отлежаване във влажна среда до 3-ти месец
	CSH, чрез трансформация на тоберморита във властонит		CSH, чрез трансформация на тоберморита във властонит		CSH, чрез трансформация на тоберморита във властонит
730-830°С	Без химични преобразувания	730-830°С	Без химични преобразувания	730-830°С	Без химични преобразувания
830-900°С	Трансформация на кристалната структура на обезводнения	830-860°С	Минимална трансформация на кристалната структура на	840-890°С	Минимална трансформация на кристалната структура на
	CSH; Нови фази от $\alpha$ кварц в $\beta$ тридимит		обезводнения CSH;		обезводнения CSH;
900-1000°С	Без химични преобразувания	900-1000°С	Без химични преобразувания	900-1000°С	Без химични преобразувания

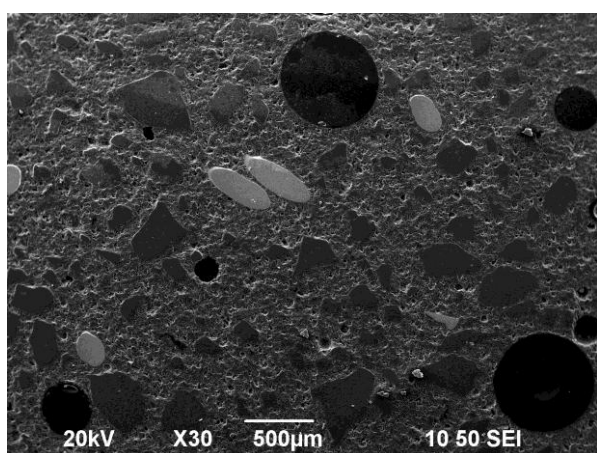
табл. V. 13: Загуба на маса на моделен състав 91, подложен на различни топло-влажностни обработки

Температурен интервал, °С	Загуба на маса във влажна среда, 3-ти месец, %	Температурен интервал, °С	Загуба на маса след пропарване, 3-ти месец, %	Температурен интервал, °С	Загуба на маса след автоклавиране, 3-ти месец, %
60-250	5,83	60-250	6,67	60-200	2,70
250-350	1,09	250-350	1,09	200-330	3,60
350-430	0,53	350-430	0,52	330-430	0,89
430-480	0,41	430-480	0,43	430-480	0,37
480-560	0,1	480-560	0,29	480-560	0,37
560-580	0,1	560-580	0,06	560-580	0,07
580-650	0,29	580-650	0,27	580-650	0,25
650-750	0,66	650-750	0,66	650-750	0,59
750-830	0,04	730-830	0,03	730-830	0,03
830-900	0,12	830-860	0,01	840-890	0,11
900-1000	0,13	900-1000	0,07	900-1000	0,00
0-1000	9,30	0-1000	10,10	0-1000	8,98

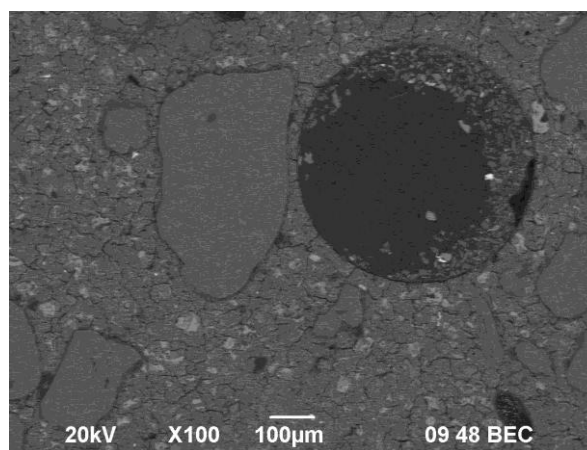
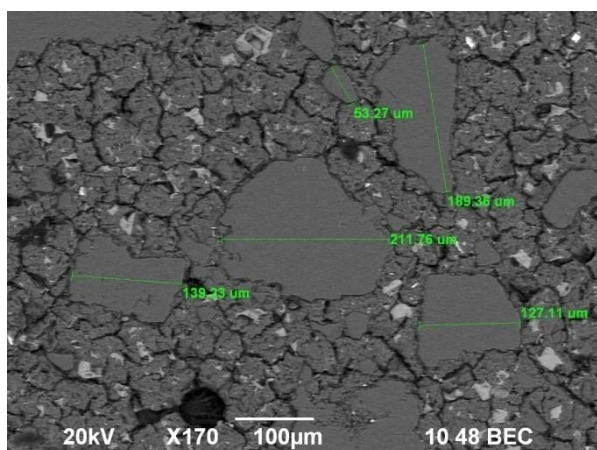
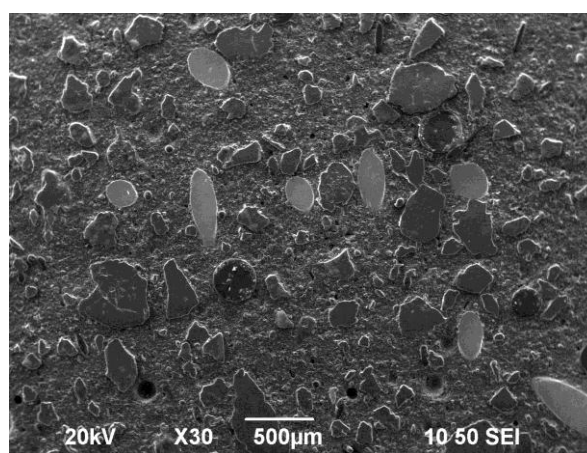
Топло-влажностната обработка действа положително на структурата на СВЯБ, чрез увеличаване на продуктите на хидратация, усвояване на портландита и фините частици на МСП и кварцовото брашно. По-добри резултати в това показва оптималния състав. При него се наблюдава подобряване на плътността на матрицата, чрез редуциране на микрокапилярните пори и нанокапилярните пори на гела, което рефлектира на увеличаване на якостните показатели на образците, в сравнение с тези, които са отлежавали само при влажни условия. Потвърждение на това е открито и при разглеждане микроструктурата на съставите под микроскоп, посредством Сканираща Електронна Микроскопия (СЕМ). Общ вид на оптималния състав отлежавал при влажни условия и след автоклавиране е представен на табл. V. 15.

табл. V. 14: Общ вид на СВЯБ отлежавал при влажни условия и след автоклавиране

Във влажни условия:



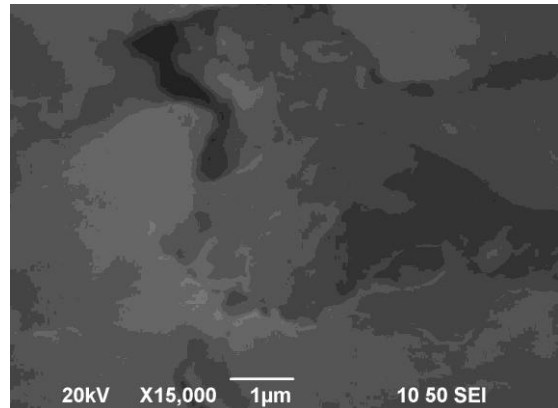
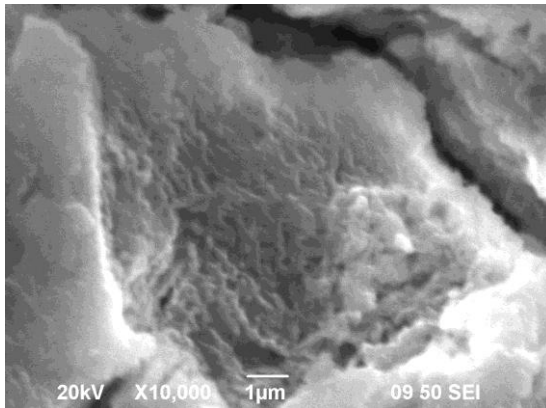
След автоклавиране:



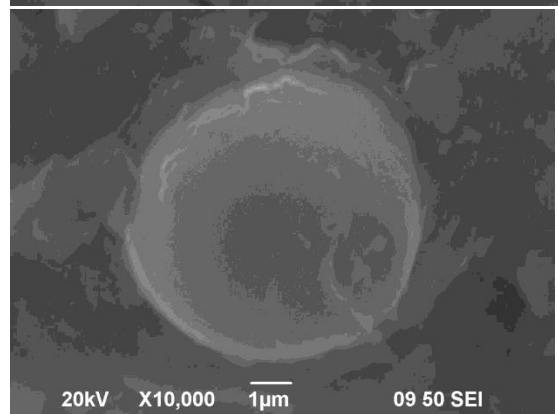
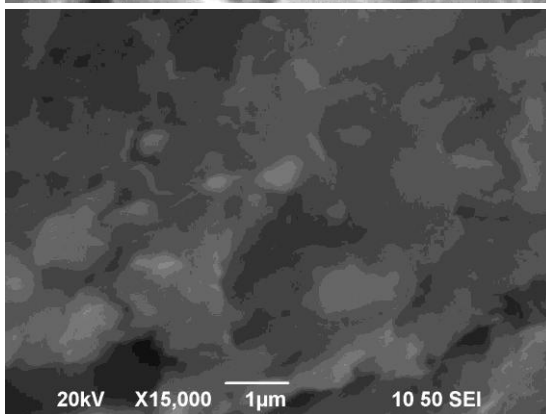
Изследванията със СЕМ установяват наличието на множество микропукнатини (около 1 µm), причинени вероятно от контракционното съсъхване, засилено и поради високото съдържание на суперпластификатор. Този ефект е по-силно изразен при състава отлежал при влажни условия, при който по-ниската степен на хидратация е довела до по-порозна обща структура. Поради това, при образците отлежавали във влажни условия, се забелязва по-голямо количество на нехидратирани клинкерни зърна, отколкото при третираните образци. Това оказва влияние на якостните характеристики на материала. В табл. V. 16 са визуализирани отделните елементи от структурата на СВЯБ при двата вида условия на отлежаване – във влажна среда и след автоклавиране.

табл. V. 15: Елементи на оптимален състав на СВЯБ, отлежавал във влажна среда и след автоклавиране  
Влажна среда: След автоклавиране:

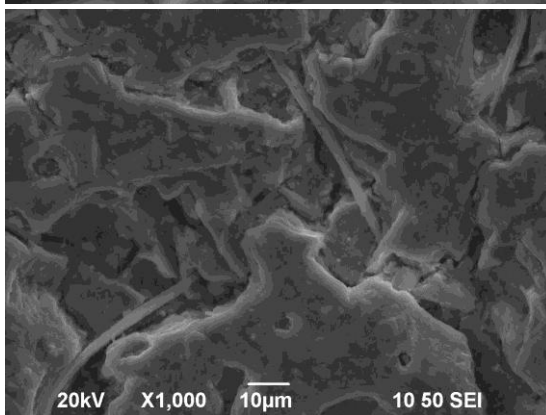
CSH



МСП

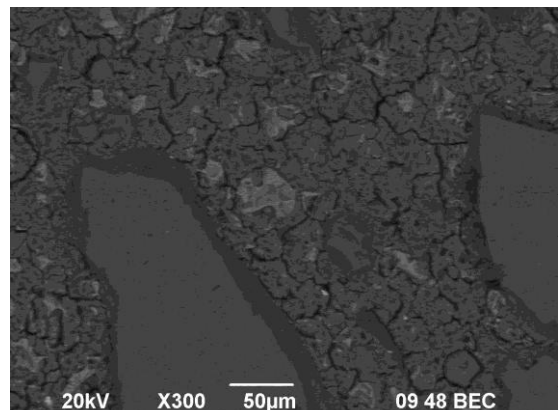
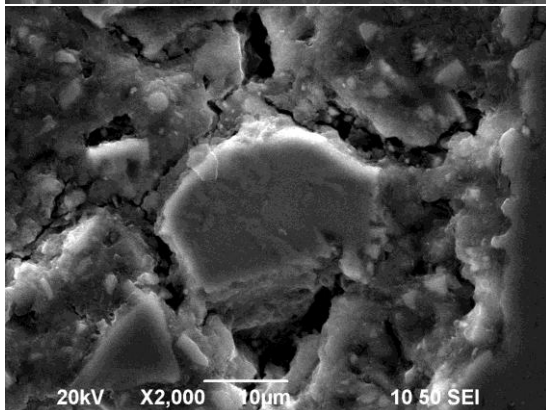


етрингит



няма наличие

клинкер

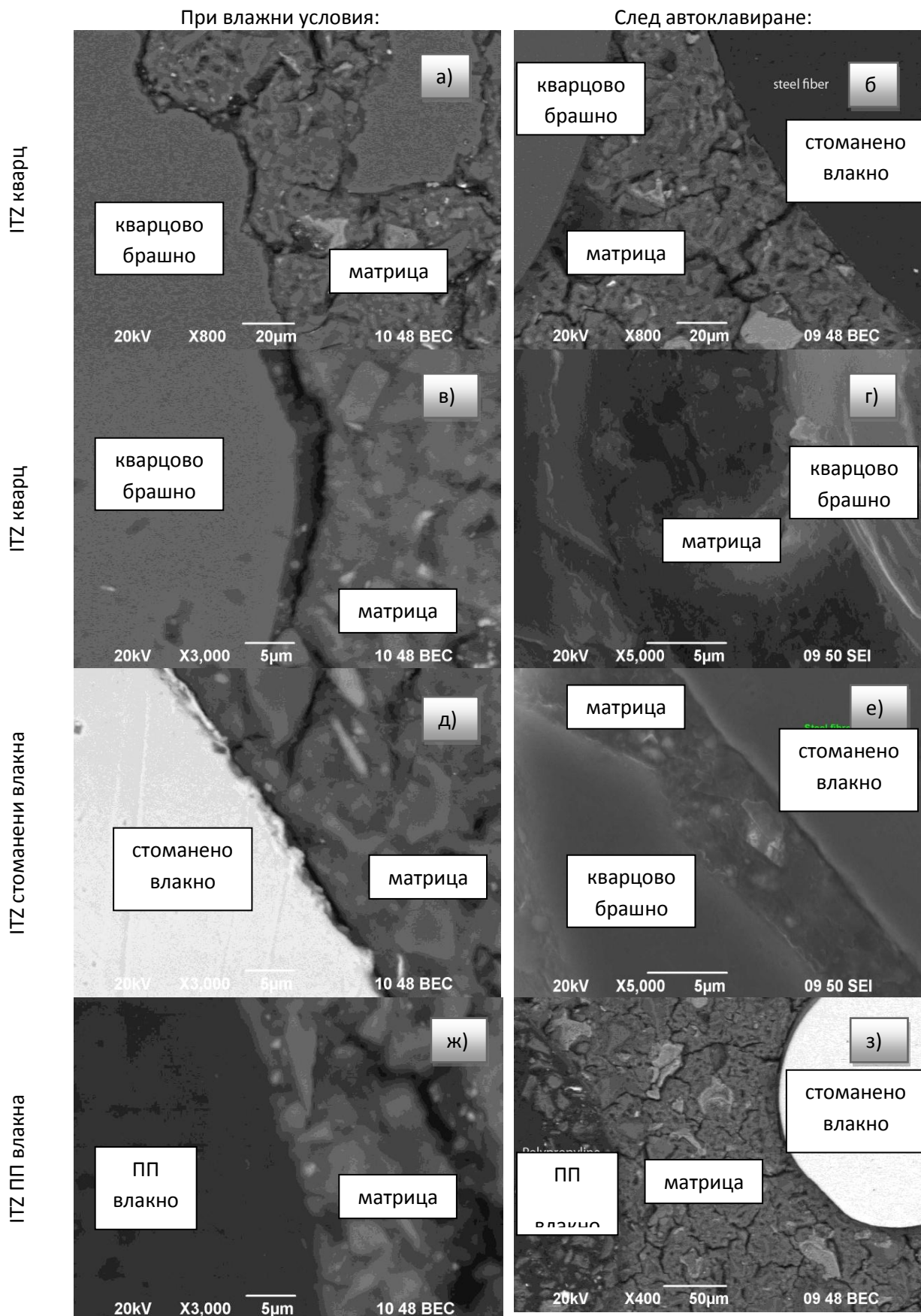




След автоклавна обработка се вижда много по-плътна структура на CSH гела, представен от различни по вид и концентрация на Si хидратационни продукти, в сравнение с пробите при влажни условия. След обработката се наблюдават също единични, фини сфери на МСП, което е показателно за високата степен на взаимодействието му с продуктите на хидратацията на цимента. Не се наблюдават еtringит (калциеви хидросулфоалуминати) и портландит след третиране, също поради предхождащото им изконсумиране. При пробите отлежавали при влажни условия по-често се забелязват нехидратирани клинкерни зърна, с лошо сцепление с матрицата, с наличие на пукнатини около тях с размери от няколко микрона. След третиране е отчетена преходна зона около нехидратиралите зърна от около 10  $\mu\text{m}$ , със съдържание на вода от продължаваща хидратация.

Особен интерес представлява качеството на преходната зона между матрицата от свързващото вещество и кварцовите зърна, както и на тази между матрицата и стоманените и ПП-нови влакна. Установено е, че при образците, отлежавали само във влажна среда, и трите преходни зони са с микропукнатини и с по-рехави структура от тази на матрицата - табл. 17. След автоклавна обработка не се забелязва подобна структура на преходната зона "кварцово брашно-матрица" – табл. V. 17-б) и V. 17-г) . ДТА анализа доказва, че голяма част от кварцовите частици след автоклавиране са влязли във взаимодействие с продуктите на хидратацията на цимента и са формирали допълнително количество калциеви хидросиликати. Това схващане се среща и в световната литература [Sorelli, 2008]. Автоклавната обработка повишава и степента на хидратацията на цимента, както и интензифицира реакцията на МСП. По отношение на връзката между влакната и матрицата, тя също се повлиява благоприятно от автоклавната обработка, в следствие на общото повишено количество хидратационни продукти и намалената порьозност – табл. V. 17-е) и V. 17-з). Това се отразява върху нарастването на якостта на опън при огъване с около 30% [FHWA, 2006]. Според [Sorelli, 2008], в обема на СВЯБ преобладават високоосновни калциеви хидросиликати, което е причина за подобрената контактна зона, докато при обикновените влакнесто армирани композити има по-голямо количество нискоосновни CSH.

табл. V. 16: Преходна зона (ITZ) между матрица и: а) и б) кварцовите частици; в) стоманени влакна; г) ПП влакна



Проведените изследвания показват съществени различия във вида и количеството на хидратационните продукти при СВЯБ, в сравнение с тези на обикновения бетон. Контракционното съсъхване е по-изразено и води до микропукнатинообразуване. Общата порестост е изключително ниска, като при това поровото пространство се характеризира с липсата на макрокапилярни пори, а микрокапилярните пори съществуват само в ранна възраст. След това, в резултат на продължаващата хидратация и пуцолановите реакции, микрокапилярите се запълват с хидратационни продукти, за сметка на изконсумирания портландит и частично на кварцовото брашно. На възраст от 3 месеца основният дял на порите се пада на нанопорите в гела, което е причина за изключителната дълготрайност на СВЯБ. Топло-влажностната обработка при СВЯБ и по-специално автоклавирането, редуцира допълнително общата порестост, тъй като повишават степента на хидратацията на цимента и интензифицират реакцията с МСП. По този начин се постигат изменения не само в микроструктурата на матрицата, но се повишава и качеството на преходната зона, с което се постигат по-високи якости.

## ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА, V-ТА ГЛАВА

**Afridi M.U.K., Ohama Y., Demura K., Iqbal Z.M.:** A note of formation of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  crystals in polymer-modified mortars, *Cement and Concrete Research*, v. 23, **1993**, Pages: 484-485;

**ASTM C29/C29M-09:** Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, **2010**;

**Banfill P. F. G.:** Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures. *Construction and Building Materials*, v. 25, January **2011**, Pages 2955-2960;

**Cheyrezy M., Maret V., Frouin L.:** Microstructural Analysis of RPC (Reactive Power Concrete), *Cement and Concrete Research*, v.25, i.7, March **1995**, Pages: 1491-1500;

**Colleparidi S., Coppola L., Troli R., Colleparidi M. :** Mechanical properties of modified reactive powder concrete, Malhotra VM editor, *Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete*, *American Concrete Institute Superplasticizers*, v.173, **1997**, Pages: 1-21;

**Derjaguin, B. V.; Landau, L.:** Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged particles in solution of electrolytes, *Acta Physicochim*, URSS, **1941**, Pages: 633-662;

**Diederichs U., Mertzsch O.:** Behaviour of Ultra High Strength Concrete at High Temperatures, *Proceeding of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March 05-07, **2008**, Pages: 347-424;

**Dils J., Schutter G, Veerle B., Braem E. :** Influence fo vacuum mixing on the mechanical properties of UHPC, *Proceeding the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel, Germany, March, 07-09, **2012**, Pages: 241-247;

**FHWA,** Material Property Characterization of Ultra High Performance Concrete, *Federation Highway Administration Report*, VA. 22101-2296.1(1):1231, **2006**;

**Hela R., Zach J., Kubicek P.:** Utilization of Chemical Admixtures in High Performance Concretes (HPC),

*Proceeding of the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, September 13-15, **2004**, Germany, Pages: 187-193;

**Hosser D.**, Kampmeier B., Hollmann D.: Behaviour of Ultra High Performance Concrete (UHPC) in Case of Fire. *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel, March 7-9, **2012**, Germany. Pages: 573-572;

**Janotka I.**, Nürnbergerová T.: Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume. *Nuclear Engineering and Design*, v. 235, May **2005**, Pages: 2019-2032;

**Kaufmann J.**: Development of special mortars for an application in centrifugal casting process, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 757-767;

**Korpa A.**, Trettin R.: The use of synthetic colloidal silica dispersions for making HPC and UHPC systems, preliminary comparison results between colloidal silica dispersions and silica fumes (SF), *Proceeding of the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, September 13-15, **2004**, Germany, Pages:155-164;

**Loukili A.**, Khelidj A, Richard P.: Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete, *Cement and Concrete Research*, v.29, February **1999**, Pages: 557-584;

**Lowke D.**, Stengel T., Schießl P., Gehlen C.: Control of Rheology, Strength and Fiber Bond of UHPC with Additions – Effect of Packing Density and Addition Type, *Proceeding the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction*, Kassel, Germany, March, 7-9, **2012**, Pages: 215-224;

**Ma J.**, **Orgass D.**, Schmidt F., Tue N.: Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 205-212;

**Mills R.**: Factors influencing cessation of hydration in water cured cement pastes. *ACI-SP60*, Washington **1966**;

**Neville A.M.**, *Properties of Concrete*, UK, **2002**;

**Pourchez J.**, Valdivieso F., Grosseau P., Guyonnet R., Guilhot B.: Kinetic modelling of the thermal decomposition of ettringite into metaettringite, *Cement and Concrete Research*, v. 36, November **2006**, Pages: 2054-2060;

**Prince W.**, Espagne M., Aïtcin P.-C.: Ettringite formation: A crucial step in cement superplasticizer compatibility, *Cement and Concrete Research*, v. 33, October **2002**, Pages: 635-641;

**Shaw S.**, Henderson C.M.B., Komanschek B.U.: Dehydration/Recrystallization mechanisms, energetic, and kinetics of hydrated calcium silicates minerals: an in situ TGA/DSC and synchrotron radiation SAXS/WAXS study. *Chemical Geology*, v. 167, **2000**, Pages: 141-159;

**Sorelli L.**, Constantinides G., Ulm F.-J., Toutleminde F.: The nano-mechanical signature of UHPC by statistical nanoindentation technique, *Cement and Concrete Research*. v. 38, September **2008**, Pages: 1447-1456;

**Stephan D.**, Schmidt M., Krelaus R.: Direct measurement of particle-particle interactions of fines for UHPC using AFM technology, *Proceeding of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March 05-07, **2008**, Pages: 375-381;

**Taylor H.F.W.**: The Dehydration of Tobermorite, *Clays and Clay Materials*, v. 6, **1957**, Pages: 101-109;

**Tracy S.**, Boyd St., Connolly J.: Effect of Curing Temperature and Cement Chemistry on the Potential for Concrete Expansion Due to DEF. *Precast/Prestressed Concrete Institute Journal*, January-February **2004**, Pages: 46-57;

**Verwey, E., Overbeek, J.**: Theory of the Stability of Lyophobic Colloids, *Elsevier*, Amsterdam, **1948**;

**Way R.**, Wille K.: Material Characterization of an Ultra High-Performance-Fiber Reinforced Concrete under Elevated Temperatures. *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel, March 7-9, **2012**, Germany, Pages: 565-571;

**Wirquin E.**, H. Kada and P. Herin, Development of a Plane Isothermal Calorimeter: Relating Apparent Activation Energy of Concrete and the Corresponding Mortar, *Journal of ASTM International*, v.5, i.1, January **2008**, Paper ID JAI101057;

**Zhou Q.**, Glasser F.P.: Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120°C, *Cement and Concrete Research*, v. 31, **2001**, Pages: 1333-1339;

**БДС EN 12350-3:2009:** Изпитване на бетонна смес. Част 3: Изпитване по Vebe;

**БДС EN 1015-3:2001/A2:2008:** Методи за изпитване на разтвор за зидария. Част 3: Определяне на консистенцията на пресен разтвор (чрез стръскваща масичка);

**Бошнаков Д.:** Изменение на свойствата на бетонната смес и бетона при използване на механично активирана вода, *дисертация*, София, **2012**.

**Георгиев Д., Богданов Б., Христов Я., Марковска И.:** Строителен материал от калциев силикат Част II. Охарактеризиране. *Научни трудове на Русенския Университет*, том 48, серия 9, **2009**, страници: 52-56;

**Марковска И., Богданов Б., Христов Я., Георгиев Д., Русев Д.:** Олекотени керамични материали с пълнител от боотпадъци. *Научни трудове на Русенския Университет*, том 49, серия 9.1, **2009**, страници: 70-74;

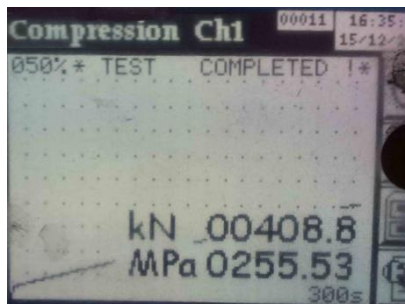
**Пиндюк Т., Чулкова И.:** Методы исследования строительных материалов, *Методические указания к лабораторным работам*, Омск, **2011**;

**Симеонов Й., Даракчиев Б., Николов И.:** *Строителни материали*, София, Техника, **1991**;

[http://www.cptechcenter.org/t2/documents/10PracticalSACTTCC-NCC9-23-08\\_000.pdf](http://www.cptechcenter.org/t2/documents/10PracticalSACTTCC-NCC9-23-08_000.pdf) (последно посетено на 31.01.2014г.)

## VI ГЛАВА

### МЕХАНИЧНИ СВОЙСТВА







## 1. Поведение при натиск

### 1.1 Якоствни характеристики

Якоствта на натиск е основна характеристика при обикновените бетони, тъй като освен за носещите му функции, тя е до голяма степен и показател за други негови експлоатационни свойства. Подобна зависимост се наблюдава и при СВЯБ.

В резултат на планирания експеримент (виж гл. IV т. 4), е избран оптимален състав на матрицата на СВЯБ, с  $D_{max}=0,5$  mm, В/Ц=0,22 и 4,0% химическа добавка, който е с много добри технологични свойства и дава висока якост на натиск на 28-ми ден. Последователно е проследена кинетиката на набиране на якост във времето и факторите, които ѝ влияят.

По тази причина, развитието на якоствта на натиск във времето, изследването на различни рецептурни и технологични параметри, които ѝ влияят, може да служи за основа за прогнозиране поведението на материала, подложен на различни експлоатационни условия, т.е на неговата дълготрайност.

Установено е, че якоствта на натиск на матрицата на СВЯБ варира от 100 МПа до 150 МПа, като основните фактори, които ѝ влияят са: максималният диаметър на добавъчния материал, количеството суперпластификатор, В/Ц отношение, вида и активността на цимента, количеството МСП, количеството влакнеста-армировка, условията на третиране и отлежаване.

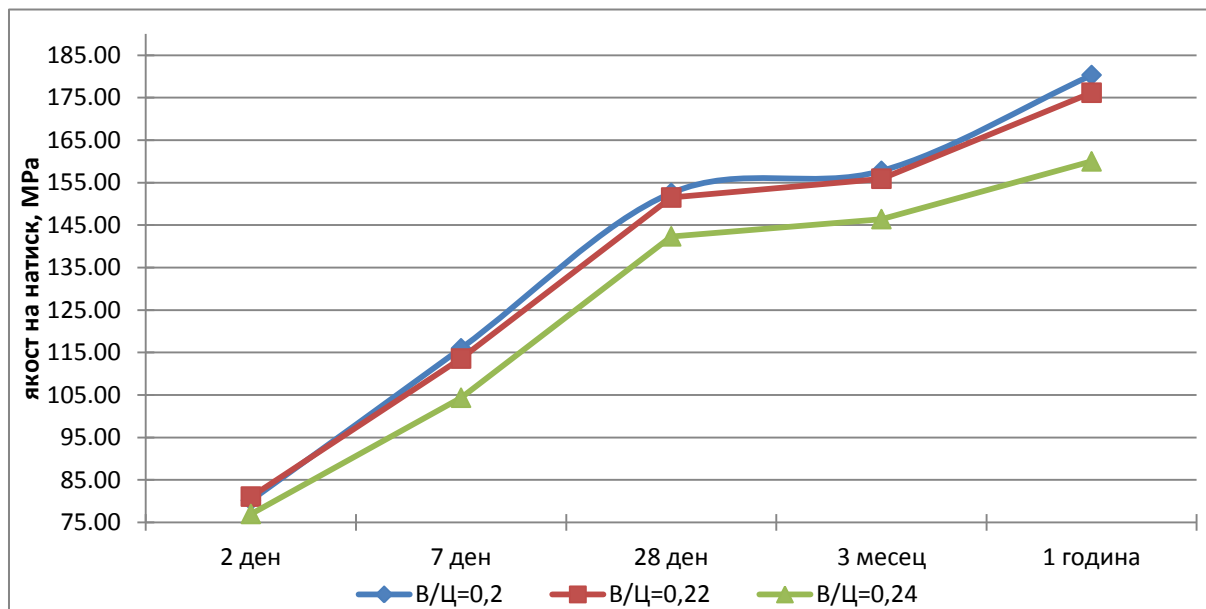
Получената висока якост на натиск на матрицата на СВЯБ обаче, предполага изцяло крехко поведение на материала, с последващо взривно разрушение. В материала се формират микропукнатини и се създават големи опънни напрежения в площадки перпендикулярни на натоварващата сила. Ролята на влакната в този момент се свързва с възпрепятстване разтварянето на микропукнатините, от една страна, и от друга - ограничаване удължаването им, при достигането на влакнестата армировка.

#### 1.1.1 Влияние на рецептурни параметри

Водо-циментното (В/Ц) отношение е един от най-важните фактори, за якоствта на натиск на бетона. По подобие на обикновения бетон, и при СВЯБ, с увеличаване количеството на водата в състава на бетона, се намалява неговата якост на натиск (фиг. VI. 1).

Между 2-ри и 7-ми ден процесите на хидратация, при избрания оптимален състав, са изключително интензивни и СВЯБ увеличава якоствта си на натиск с 30%. Този процес продължава, макар и с в малко по-слаба степен и до 28-ми ден, което предизвиква повишаване с още 20%, като достига стойности от около 150 МПа. Така полученият бетон притежава високоякоствна матрица, с количество на цимента от 930 kg/m<sup>3</sup> и МСП – 30% от масата на цимента. Реализираният състав е подходящ за по-нататъшна топло-влажностна обработка,

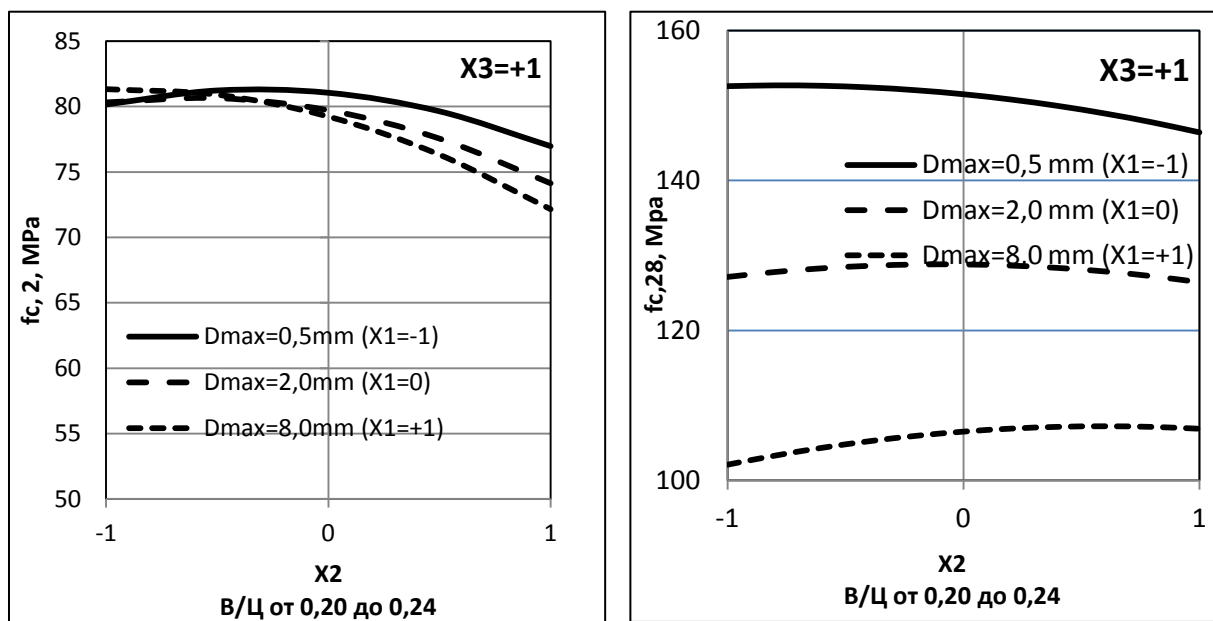
което да го превърне в бетон, принадлежащ към класа супервисокоякоостни бетони. Създадената матрица не показва видима промяна в якостните си характеристики между 28-ми ден и 3-ти месец (под 5%), но след една година престояване под вода, СВЯБ увеличава якостта си на натиск с още 10%, като достига стойности от около 175 МПа.



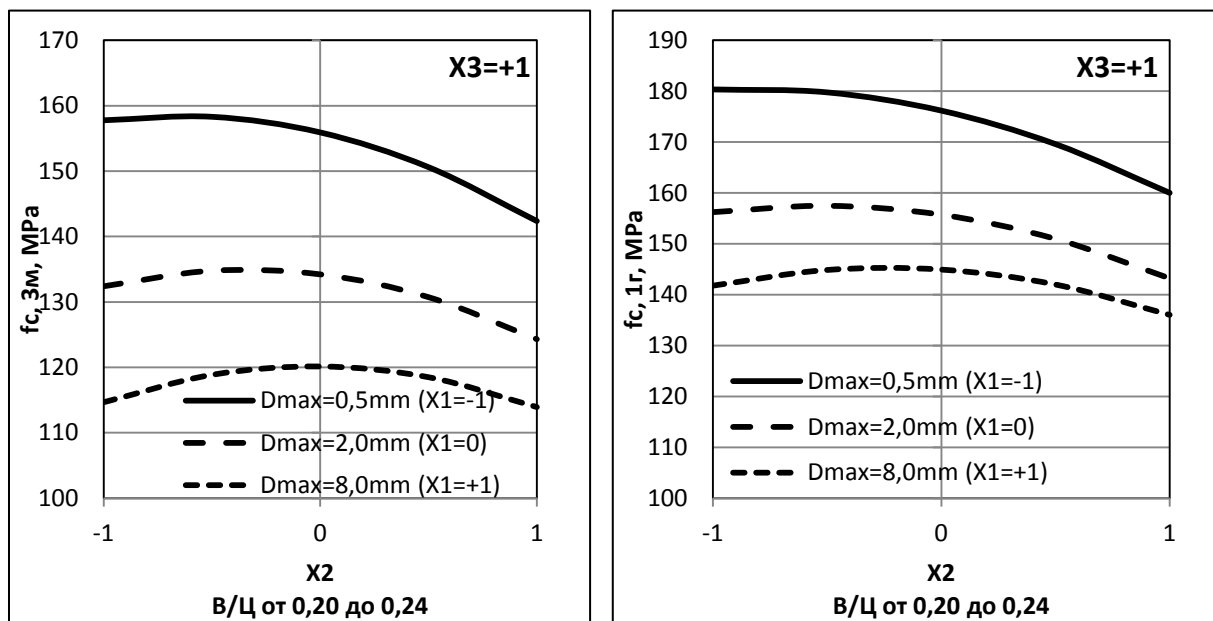
фиг. VI. 1: Развитие на якостта на натиск на матрицата на СВЯБ във времето при вариране на В/Ц отношение

Провеждането на планирания експеримент дава възможност за едновременно проследяване на ефекта на В/Ц отношение и максимален диаметър на добавъчния материал ( $D_{max}$ ) във времето.

Влиянието на В/Ц отношение, върху якостта на натиск в ранна възраст, е проследено на фиг. VI. 2. В ранна възраст, якостта на натиск намалява (от 5 до 10 %), с увеличаване на В/Ц отношение, като тенденцията е най-силно изразена при едрозърнестите бетони ( $D_{max}=8\text{mm}$ ), (фиг. VI. 2-а). В по-късна възраст, основополагащо за якостта на натиск е размерът на добавъчния материал (фиг. VI. 2-б). На 28 дневна възраст, разликата между якостта на натиск между СВЯБ с  $D_{max}=0,5\text{ mm}$  и  $D_{max}=8,0\text{ mm}$  е 50%. С нарастване на възрастта на бетона, този ефект е по-силно изразен, поради увеличената якост на матрицата, от една страна, и от друга - сцеплението ѝ с добавъчния материал. По този начин все повече се увеличава разликата в механичните характеристики между матрицата и добавъчния материал и бетонът се разрушава в неговото най-слабо звено – ЕДМ (виж гл. I. т. 4.2.1.3).



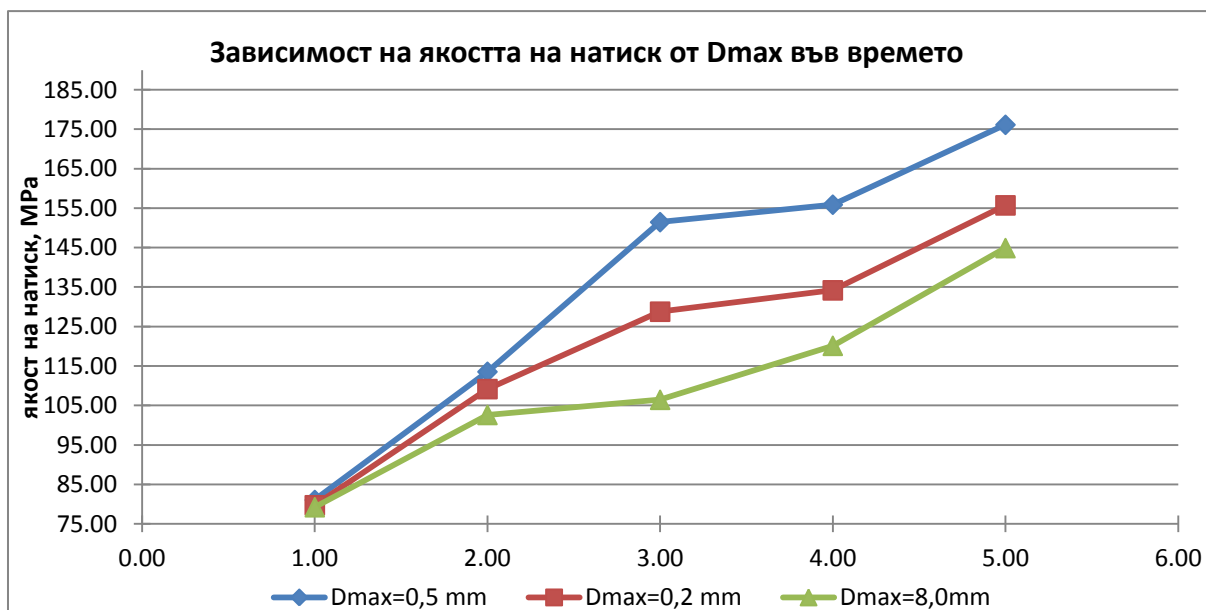
фиг. VI. 2: Изменение на якостта на натиск в зависимост от водо-циментните отношения на състави с различна зърнометрия ( $D_{max}$ ) и 4% суперпластифицираща добавка на:  
а) 2-ри ден б) 28-ми ден



фиг. VI. 3: Изменение на якостта на натиск в зависимост от водо-циментните отношения на състави с различна зърнометрия ( $D_{max}$ ) и 4% суперпластифицираща добавка на:  
а) 3-ти месец б) 1-на година

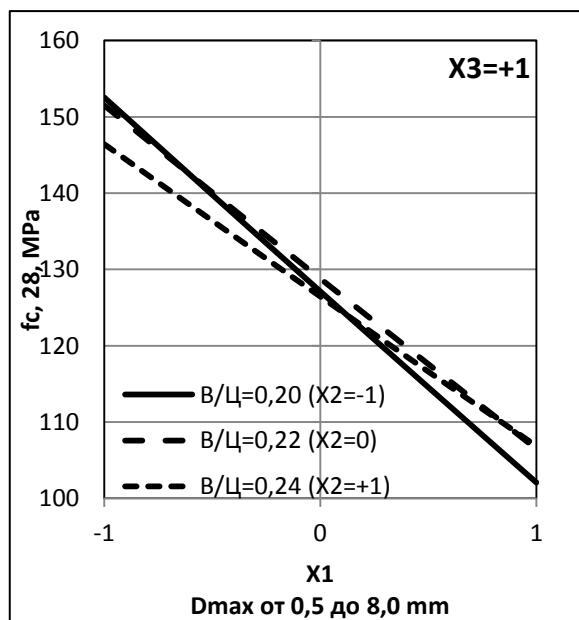
Фиг. VI. 3 разкрива изменението на якостта на натиск в късна възраст (3-ти месец – фиг. VI. 3-а и 1-на година – фиг. VI. 3-б) при вариране на В/Ц отношение и едрината на добавъчния материал. И в двата разглеждани времеви интервала, при съставите с  $D_{max}=2,0\text{mm}$  и  $D_{max}=8,0\text{mm}$ , не се отчита разлика в якостните показатели, при вариране на В/Ц отношение от 0,20 до 0,24. Но при дребнозърнестите бетони - с увеличаване на В/Ц отношение, се намалява над 10%

якостта на натиск, в разглеждания интервал, тъй като делът на матрицата от свързващото вещество в общия обем, е много по-голям, отколкото при съставите с ЕДМ (фиг. VI. 4).



фиг. VI. 4: Развитие на якостта на натиск на матрицата на СВЯБ при вариране на Dmax във времето

С увеличаване на максималния диаметър, якостта на натиск намалява с 50%, независимо от В/Ц отношение (фиг. VI. 5). Това се дължи на по-ниския модул на еластичност на добавъчния материал, в сравнение с този на матрицата и материалът се разрушава през по-слабите и пренапрегнати зони.



фиг. VI. 5: Изменение на якостта на натиск на 28-ми ден в зависимост от водо-циментните отношения на състави с различна зърнометрия (Dmax) и 4% суперпластифицираща добавка на

Количеството на цимента е ключов фактор за якостите на обикновените бетони. При СВЯБ обаче, поради ниските В/Ц отношения, голяма част от цимента (около 40-50%) не хидратира и остава да действа само като пълнител. Отчитайки високите количества на цимента

(в случая 930 kg/m<sup>3</sup>), тази част от нехидратирал цимент заема значителна част от обема на СВЯБ. Извършени са експерименти на базата на определения оптимален състав от плана на експеримента, но с редуцирано количество на цимента. Респективно така се намалява и вложеният МСП за единица обем (табл. VI. 1). Другите важни съображения, които се отличават за редуциране количеството на цимента, са намаленото съсъхване и пълзене от една страна, а от друга - по-ниската себестойност на бетона.

Редуцирането на количеството цимент за 1m<sup>3</sup>, обаче изисква увеличено количество на другите фини пълнители (основно кварцово брашно), за да може да бъде запазена оптималната зърнометрична крива по модел на *Modified Andreassen* (виж гл. IV т.3.2). Това от своя страна създава известни технологични затруднения, поради увеличеното време и енергия необходими за приготвянето на сместа. При намалено количество цимент, в единица обем на сместа, количеството вода се оказва по-малко. В гл. V. т. 4.1 е по-подробно анализиран приносът от по-големи количества цимент (сравнение между оптимален и моделен състав), и от гледна точка на по-нататъшната топло-влажностна обработка на СВЯБ.

**табл. VI. 1: Модифицирани състави на база оптималния състав от плана на експеримента с различно количеството цимент**

Dmax, mm	В/Ц	МСП, %	СП, %	Цимент, kg	Разстилане, mm	Якост на натиск на 2ри ден, МПа	Якост на натиск на 7ден, МПа	Якост на натиск на 28ден, МПа
0,5	0,22	30	4	930	13,0	85,2	117,0	134,1
				900	12,5	72,1	103,1	129,7
				880	12,0	82,7	117,8	131,6
				830	12,0	74,6	110,8	121,4

Резултатите показват, че с редуцирането на цимента от 930 kg до 830 kg за 1m<sup>3</sup> се понижава якостта на натиск, но едва с 10 % (фиг. VI. 6). Това се дължи основно на намалената обработваемост на сместа, т.е не се потвърждава тезата, че кварцовото брашно води до подобряване на обработваемостта (виж гл. I. т. 2.1.1). Все пак, с оглед прилагането на топло-влажностна обработка при СВЯБ, приемаме, че си струва частична замяна на цимента с кварцово брашно, въпреки редуцираната леко якост.

С цел определяне влиянието на вида на цимента, е изготвен един и същ оптимален състав, като в първия случай е използван български цимент (на фирма Халсим), а във втория – френски (на фирма *Lafarge*). В последствие са изготвени пробни тела, които са поставени да отлежат при различни режими - под вода и при сухи условия (виж гл. III т. 6.2), представени съответно в таблица VI. 2 и VI. 3.

**табл. VI. 2: Влияние на вида на цимента върху якостта на натиск на оптимизиран състав, при отлежаване под вода**

Вид на цимента	Dmax, mm	В/Ц	МСП, %	СП, %	Разстилане, mm	Якост на натиск на:		
						2ден	7ден	28ден
Холсим	0,5	0,22	30	4	13,0	55,8	119,5	144,5
<i>Lafarge</i>					13,0	34,1	130,1	172,3

**табл. VI. 3: Влияние на вида на цимента върху якостта на натиск на оптимизиран състав, при отлежаване в суха среда**

Вид на цимента	D <sub>max</sub> , mm	В/Ц	МСП, %	СП, %	Разстилане, mm	Якост на натиск на:		
						2ден	7ден	28ден
Холсим	0,5	0,22	30	4	13,0	54,5	106,7	129,3
Lafarge					13,0	32,8	108,9	151,2

Оказва се, че активността на цимента има съществен ефект върху якостта на натиск. Повишената активност на цимента (*Lafarge*) (с около 40% на 28 дневна възраст), в сравнение с тази на изпитвания цимент на Холсим, води до нарастване на якостта на натиск с около 17-19 % (в зависимост от условията на отлежаване). Въпреки, че се предполага, че СВЯБ няма развита капиларна порестост (виж. гл. I т. 4.2.1.1), през която водата от обкръжаващата среда да съдейства за повишаване на степента на хидратация, вероятно отлежаването под вода възпрепятства преждевременно загубата на влага от повърхностните слоеве, с което се намалява възникването на опъни напрежения в тях. Това се потвърждава от непосредствените резултати от якостта на натиск, за един и същи състав, когато се промени партидата на изпитван цимент на Холсим. Установена е системна зависимост между условията на отлежаване и набирането на механичните характеристики при СВЯБ. Якостите на натиск на 28-ми ден, постигнати след отлежаване под вода, са с 10-12% по-високи от тези след отлежаване във въздушно-суха среда.

В табл. 4 е представен оптималния състав от плана на експеримента, изготвен съответно с два различни цимента на Холсим. Използването на първия вид цимент води до над 15% по-високи крайни якости на натиск. Поради това, 2-рият вид цимент е използван само за сравнителен при някои от следващите изследвания.

**табл. VI. 4: Влияние на якостта на натиск на цимента върху якостта на натиск на оптималния състав**

	Ден	Якост на натиск, МПа	
		1-ви вид	2-ри вид (сравнителен)
цимент	2-ри	27,0	28,7
	7-ми	47,9	40,3
	28-ми	54,9	43,8
СВЯБ	2-ри	83,4	85,2
	7-ми	114,3	117,0
	28-ми	156,7	134,1

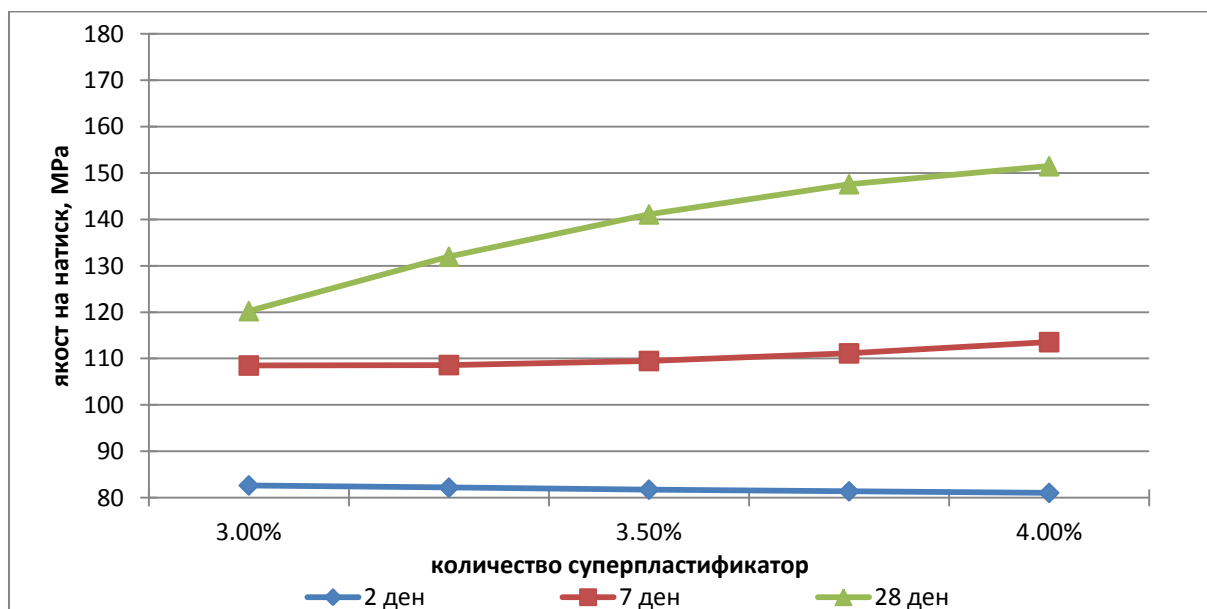
Изследвано е влиянието на количеството на МСП посредством модифициране на оптималния състав от Плана на експеримента, като МСП е намален до 20% от масата на цимента, като промяната в зърнометрията е компенсирана частично с количеството брашно, така че зърнометричната крива да следва максимално референтната. Пониженото количество МСП би било обосновано и по икономически причини. Резултатите от тези изпитвания са представени в таблица VI. 5.

табл. VI. 5: Вариране на количеството на МСП върху оптималния състав от плана на експеримента

Dmax, mm	В/Ц	СП, %	МСП, %	Разстилане, mm	Якост на натиск на 2ри ден, МРа	Якост на натиск на 7ден, МРа	Якост на натиск на 28ден, МРа
0,5	0,22	4	30	13,0	85,2	117,0	134,1
			25	13,0	86,3	105,3	133,3
			20	14,0	80,4	93,8	121,5

Очаквано, след понижаване на количеството на МСП, от 30% на 20%, се наблюдава намаление от около 10% на якостта на матрицата. Следва да бъде изследвано дали редукцията на МСП няма да доведе до намаляване на якостните свойства на СВЯБ и след прилагането на топло-влажностна обработка.

В предварителните изследвания е проследено действието на СП химическа добавка (виж г. III т. 2) върху моделните състави, при което е установено, че с увеличаване на количеството суперпластификатор се постига и по-висока якост на натиск.



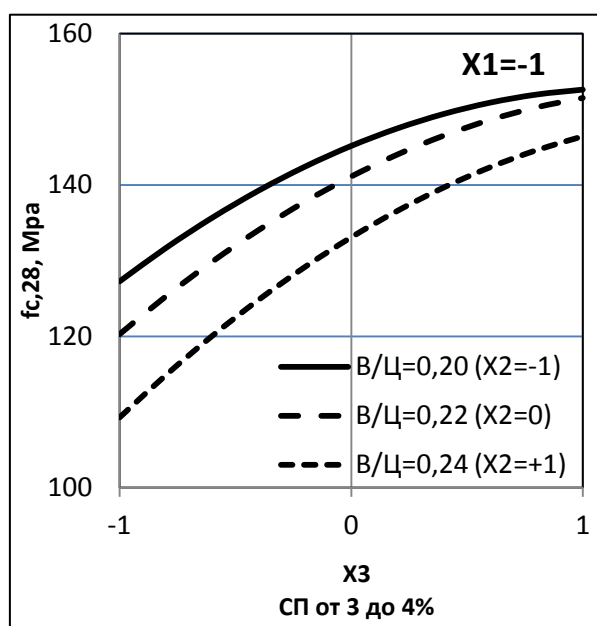
фиг. VI. 6: Влияние на количеството суперпластификатор върху развитието на якостта на натиск във времето на оптималния състав от плана на експеримента

Развитието на якостта на натиск във времето при оптималния състав от плана на експеримента, при вариране количеството на СП, е представено на фиг. VI. 6. Откроява се много бързо набира на якост още на 2-ри ден - до 45% от максималната получена стойност. Между 2-ри ден и 7-ми ден се отчита повишение от още 25%, докато достигне до около 175 МРа на 3-ти месец. Според резултите от плана на експеримента, зависимостта на якостта на натиск от количеството суперпластификатор е параболна, като максималната стойност е извън границите на вариране на фактора (от 3% до 4%) – фиг. VI. 7. Същевременно, с нарастване на суперпластификатора от 3% до 4% се постига около 20% увеличение на якостта на натиск, очевидно поради подобрената обработваемост на прясната бетонна смес и по-доброто омекване на циментовите зърна. Химическата добавка увеличава якостта на натиск във времето не само при обикновените бетони [Heikal, 2005], но и при СВЯБ. Причината за това



е редуцираната порьозност на бетона, в резултат на по-голямото количество вода, която може да достигне до по-голямо количество циментови зърна, поради едновременното разпръскване и отблъскване на отделните частици, причинено от действието на СП (виж. гл. I. т. 2.1.3).

Ефектът върху ранните якости (2-ри ден) е по-силно изразен, като се отчита понижение с около 20%. Това доказва, че СП на база поликарбоксилати има инхибиращ ефект върху реакциите на хидратация (виж гл. I. т. 4.2.2.1). Очаквано този ефект е по-голям при съставите с по-ниско В/Ц отношение. Между 2-ри и 28-ми ден, инхибиращият ефект, на състата с по-голямо количество СП, е преодолян при финозърнестите състави, с  $D_{max}=0,5$  mm.



фиг. VI. 7: Изменение на якостта на натиск на 28-ми ден в зависимост от количеството суперпластифицираща добавка на състави с различно В/Ц отношение и  $D_{max}=0,5$  mm

В същото време, по-нататъчното увеличаване на количеството СП не води до увеличаване на якостта на натиск – табл. VI. 6. С промяната на количеството СП от 4 % на 6 % се установява дори минимално понижение на якостта на натиск на 28 дневна възраст.

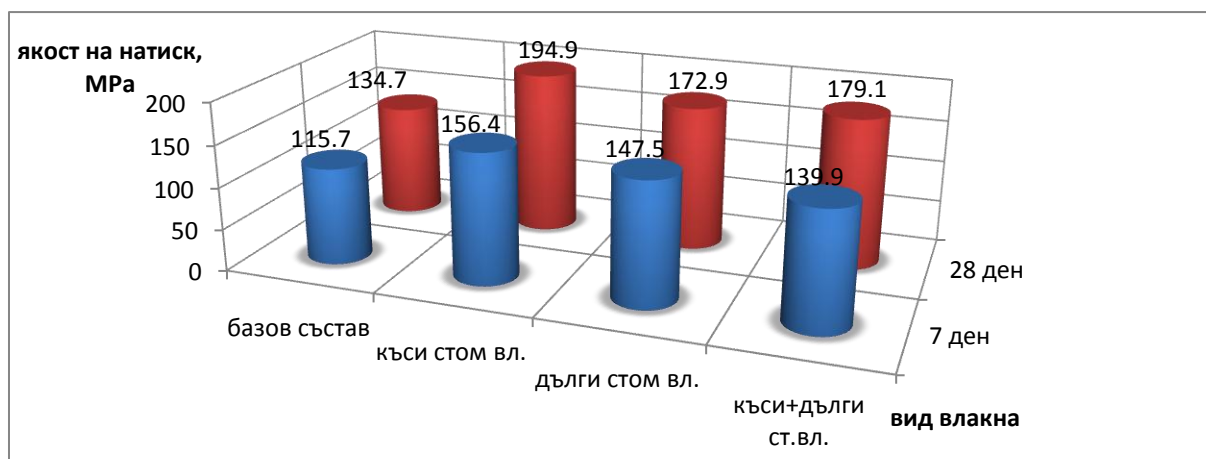
табл. VI. 6: Вариране на количеството на суперпластификатора върху оптималния състав от плана на експеримента

$D_{max}$ , mm	В/Ц	МСП, %	СП, %	Разстилане, mm	Якост на натиск, МПа		
					2-ри ден	7-ми ден	28-ми ден
0,5	0,22	30	4	13,0	85,2	117,0	134,1
			5	15,0	67,5	117,4	129,2
			6	15,0	65,7	107,7	128,9

Резултатите от изпитванията на натиск на армирани СВЯБ, в чиято матрица са вложени стоманени влакна, потвърждават литературните данни, че за разлика от обикновените дисперсно армирани бетони, при СВЯБ използването на стоманени влакна допринася за увеличаване на якостта на натиск с над 30% [Lee, 2006, Soutsos, 2005]. Причината за това е по-

доброто сцепление между влакната и матрицата при СВЯБ, сравнение с това при обикновените бетони, както и предодвратяване появата на макродефекти, причинени от технологични затруднения, с използването на микровлакна в хомогенната матрица. Влагането на стоманени влакна с 4 пъти по-висок Е-модул, от този на матрицата, позволява тя да бъде разтоварена, за сметка на влакната, с което се ограничава (за известно време) образуването и нарастването на микропукнатините. В резултат на това се повишава носимоспособността на композита.

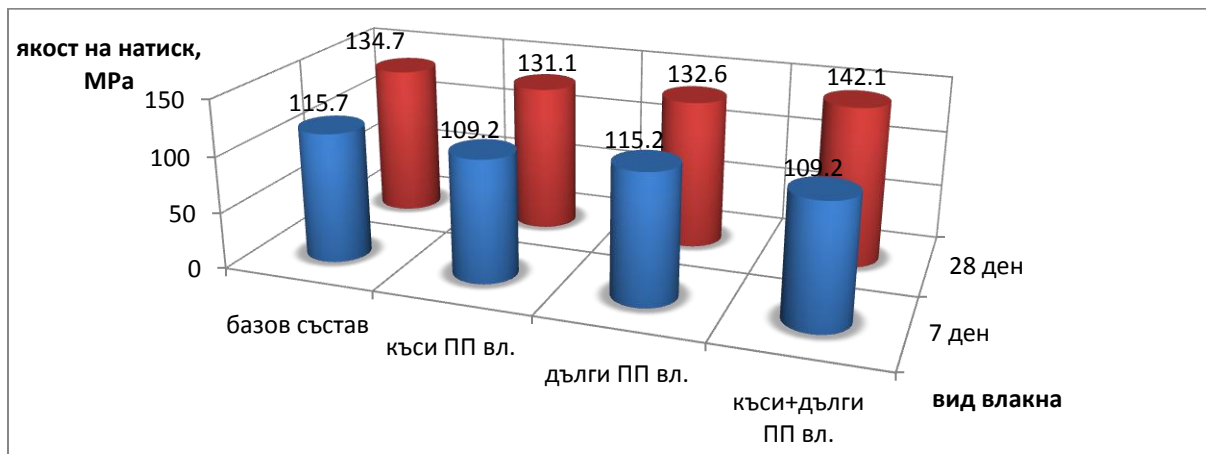
В настоящото изследване е установено, че с влагането на къси стоманени влакна, якостта на натиск нараства с 35% на 7-ми ден и над 45% до 28-ми ден, докато при използването на дълги влакна увеличението е от порядъка на 25% (фиг. VI. 8). Това се дължи на по-големия брой къси влакна в единица обем на матрицата. Комбинираното използване на къси и дълги влакна има междинен ефект.



фиг. VI. 8: Влияние на стоманените влакна върху якостта на натиск на СВЯБ

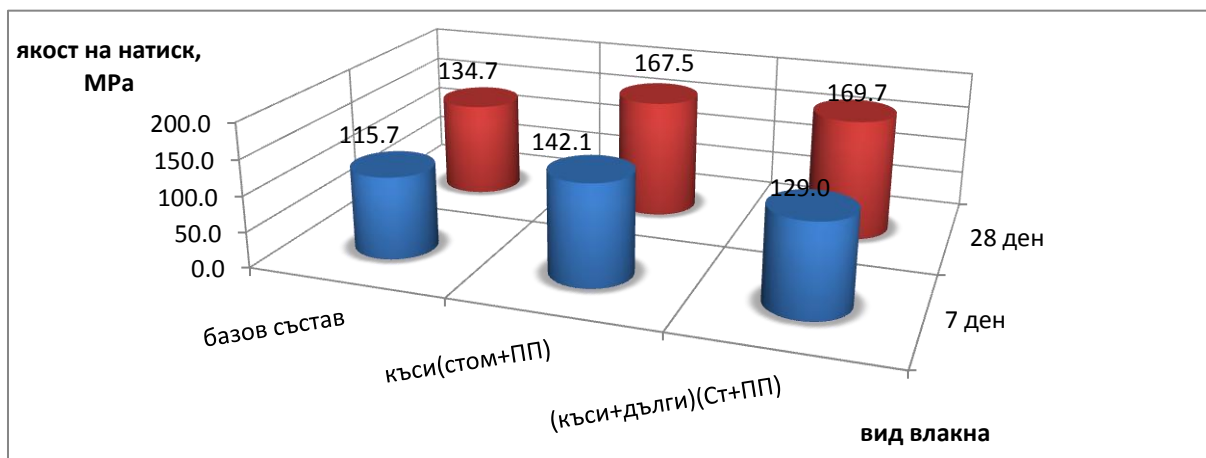
Очаквано, добавянето на микроПП влакна в състава на СВЯБ не дава отражение върху якостните му характеристики на натиск (фиг. VI. 9). Тяхното влияние е продиктувано от възможността за намаляване на собствените деформации (съсхване и набъбване), дисипация на енергия при краткотрайни (ударна жилавост) и дълготрайни (пълзене) въздействия, както и при някои екстремни условия (пожар) и др [Cheyrezy and Behloul, 2001].

Оказва се, че нискомодулните микроПП влакна не водят до редукция на якостта на натиск. Вероятно способността им да дисипират енергия при микропукнатинообразуване надвишава ролята им на по-слаб елемент в системата.



фиг. VI. 9: Влияние на полипропиленовите влакна върху якостта на натиск на СВЯБ

Комбинираното използване на стоманени и ПП влакна в състава на СВЯБ (т.н хибридна армировка) води до повишаване на якостта на натиск от 11% до 23% на 7 ден и с 25% на 28 ден, в сравнение с този на матрицата (табл. VI. 10). Този положителен ефект е резултат от действието на стоманените влакна. В ранна възраст (7-ми ден), определящ е броя влакната в единица обем и затова ефектът от късите влакна е по-силно изразен. В по-късна възраст, когато е подобро сцеплението между влакната и матрицата, ефектът на късите и дългите влакна е практически еднакъв.



фиг. VI. 10: Влияние на хибридна армировка върху якостта на натиск на СВЯБ

### 1.1.2 Влияние на технологични параметри върху якостните свойства

Изследване влиянието на някои технологични параметри върху якостта на натиск, свързани с приготвянето на бетонната смес – скорост и продължителност на изготвяне, както и температура на приготвяне на сместа, е извършено в ЛГУА, Франция.

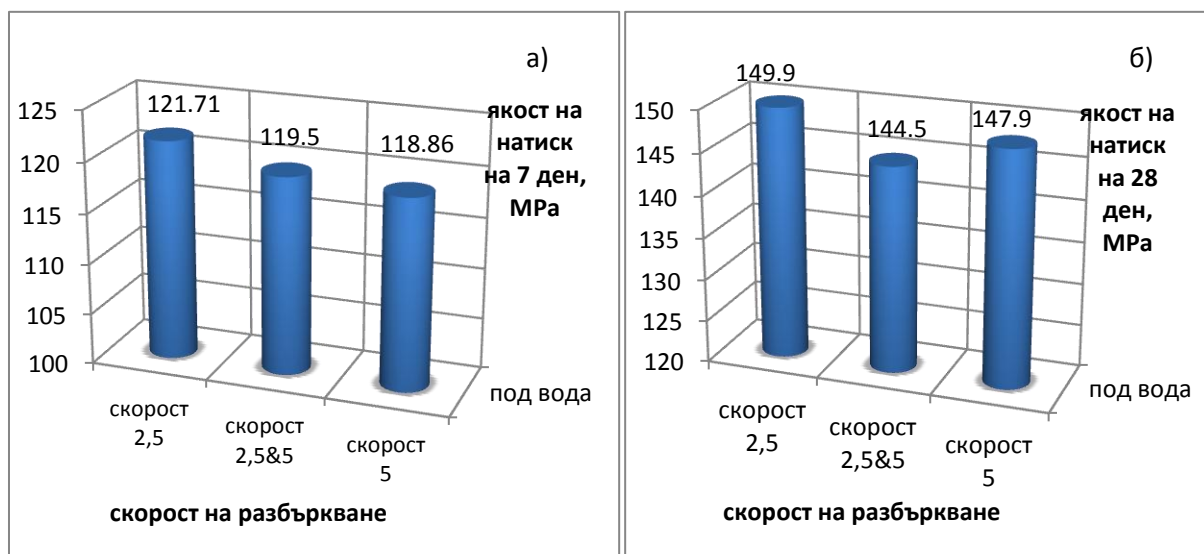
Като база за изследванията е използван оптималният състав от Плана на експеримента. Тъй като якостта на натиск зависи от общата порьозност на бетона, а при СВЯБ въвлеченият въздух е значителна част от нея, е проследено как техническите параметри влияят върху съдържанието на въздух в сместа.

В табл. 7 са показани основните зависимости между планетарната скорост на миксера, изразена в обороти в минута. Известно е, че продължителното бъркане води до по-интензивно въздуховъвличане и затова е представено и съдържанието на въздух в бетонната смес.

**табл. VI. 7: Влияние на технологичните параметри върху бетонната смес**

Време за бъркане, min	Скорост на бъркане (обороти на миксера в min)	Съдържание на въздух, %
43	Бавна (250)	6,0
25	Съчетана (250 и 530)	5,6
22	Бърза (530)	5,4

Съдържанието на въздух се променя относително малко (с под 1%), въпреки почти двойното намаляване на времето за забъркване с увеличаване на скоростта. Затова, резултатите за якостта на натиск, в зависимост от скоростта на забъркване не са учудващи – те не се влияят от нея – от порядъка на 120 МПа на 7-ми ден и 150 МПа на 28-ми ден (фиг. VI. 11). При това, те са относително най-високи при най-голямото съдържание на въздух – очевидно определящо за якостта на натиск е доброто хомогенизиране на матрицата. С оглед оптимизиране времето за забъркване е избрана комбинация от бърза и бавна скорост. В последствие, бързата скорост на миксера мобилизира суперпластификатора до ‘точката на протичане’. Тази комбинация е избрана за всички експерименти, свързани с използването на миксер с обем от 20l. Необходимо е да бъде усъвършенствана технологията на приготвяне на бетонната смес, чрез използване на високоскоростни миксери. Световният опит показва, че с увеличаване на оборотите на миксерите, якостта на натиск може да се покачи с 30% [Schachinger, 2004], а особено след използване на такива работещи във вакуум до 50% [Dils, 2012].



**фиг. VI. 11: Влияние на скоростта на разбъркване върху якостта на натиск на: а) 7-ми ден; б) 28-ми ден**

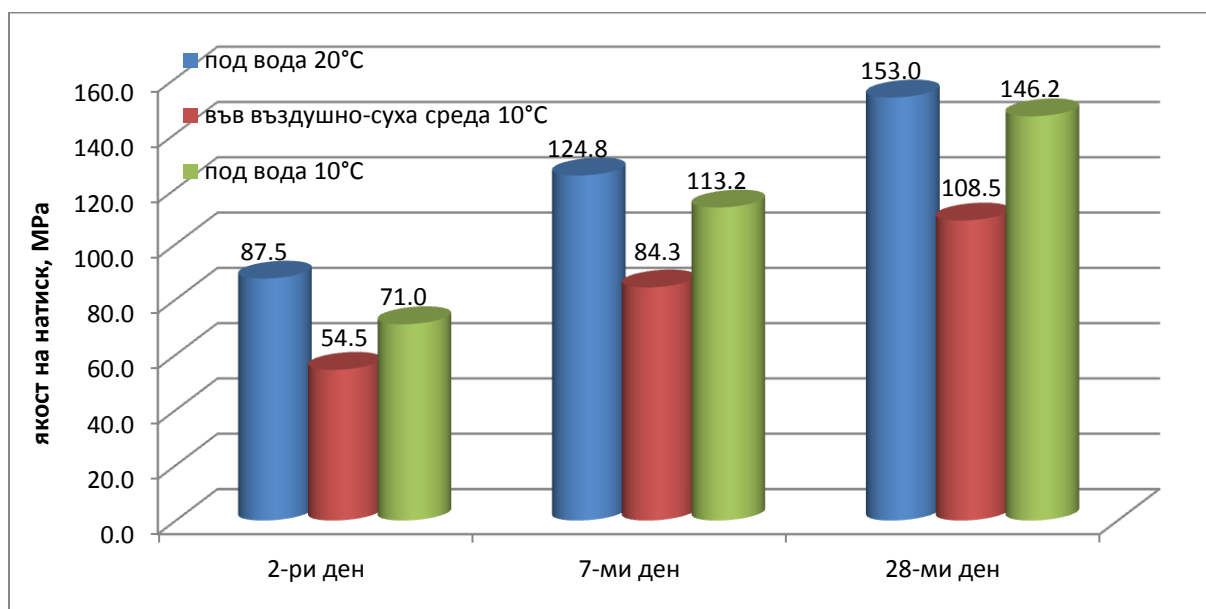
Температурата, при изготвяне и отлежаване на пробните тела, дава отражение върху развитието на якостните характеристики във времето.

При температура от 10°C, при отлежаване на пробните тела във въздушно-суха среда, получените стойности на якостта на натиск на матрицата на СВЯБ са едва 54,5 МРа, което е по-ниско с 38%, в сравнение с пробните тела отлежавали под вода при 20°C (фиг. VI. 12). При отлежаване на СВЯБ под вода, макар и при 10°C, се позволява да се компенсира частично бавното набиране на якост, но като цяло остава с 19% по-ниска крайната ѝ стойност.

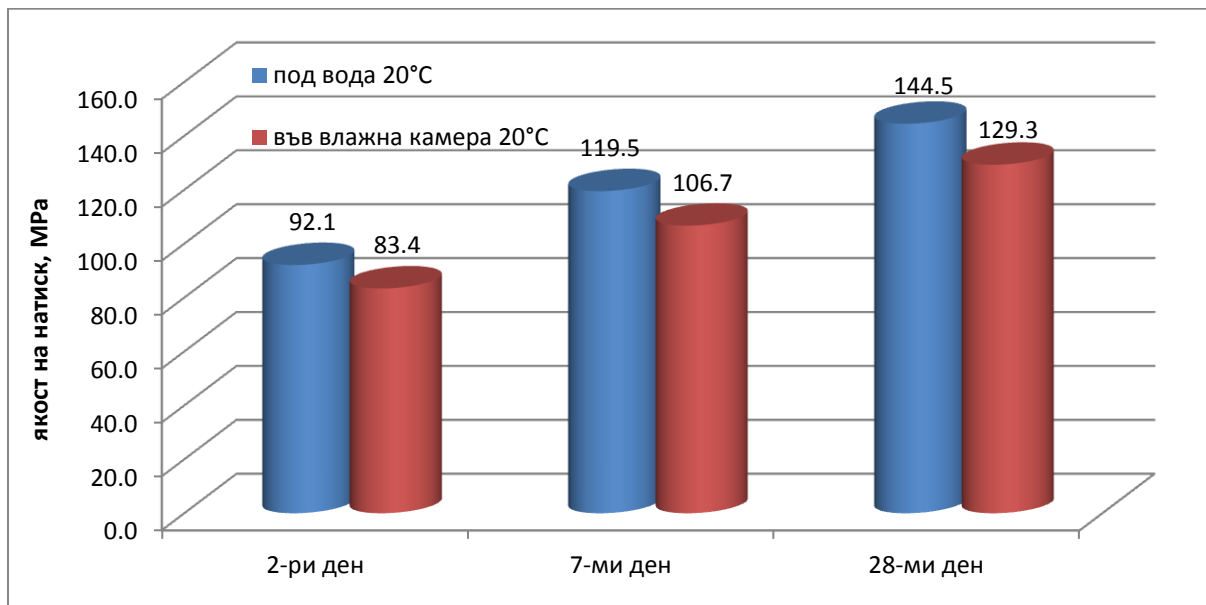
Влиянието на условията на отлежаване намалява с течение на времето и на 28 дневна възраст якостта на натиск, след отлежаване под вода, е около 150 МРа, независимо от температурата на водата (при +10°C или +20°C).

Сравнително голяма остава разликата (около 30%) между образците отлежавали под вода и тези във въздушно-суха среда с температура от +10°C. Влажността има влияние върху якостта на натиск, дори когато пробните тела отлежават при температура от 20°C – фиг. VI. 13. Якостта на натиск на пробните тела отлежавали във вода е с около 10% по-висока за всяка от изследваните възрасти.

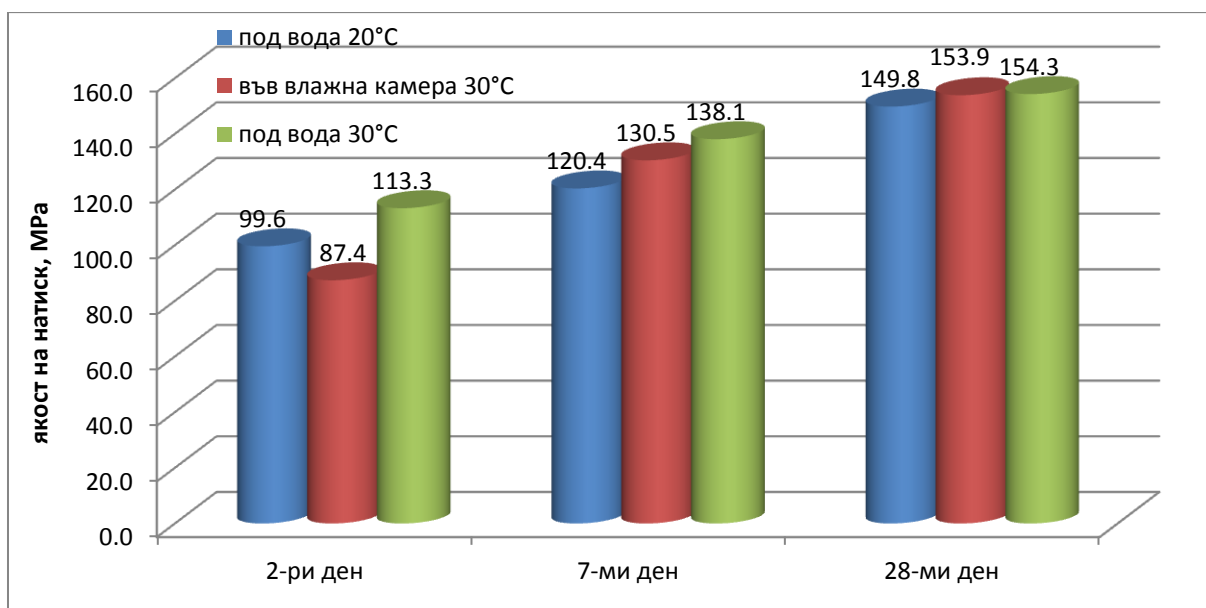
С приготвянето и отлежаването на пробните тела при температура от 30°C (фиг. VI. 14), очаквано се отчитат по-високи начални якости на натиск на СВЯБ, поради ускоряването на хидратацията на цимента. По-съществено влияние оказва средата на отлежаване в ранна възраст (2-ри ден), когато структурирането на матрицата е най-интензивно: отчетени са разлики от 30% при отлежаване под вода и във въздушно-суха среда. До 28-ми ден якостта на натиск се изравнява, независимо от условията на средата, като достига 155 МРа.



фиг. VI. 12: Влияние на температурата и условията на отлежаване на пробни тела, изготвени при 10°C, върху якостта на натиск във времето



фиг. VI. 13: Влияние на температурата и условията на отлежаване на пробни тела, изготвени при 20°C, върху якоостта на натиск във времето



фиг. VI. 14: Влияние на температурата и условията на отлежаване на пробни тела, изготвени при 30°C, върху якоостта на натиск във времето

Независимо от кинетиката на нарастване на якоостите, при различни температурно-влажностни условия, следва да се отбележе, че като цяло якоостта на 28 дневна възраст достига и дори надминава стойността, характерна за стандартните условия на изготвяне и отлежаване (под вода при температура +20°C) – табл. VI. 8. Известно изключение е само якоостта на натиск (по-ниска с 16%), при изготвяне и отлежаване при +10°C във въздушно-суха среда.

табл. VI. 8: Относителни стойности на изменението на якостта на натиск на СВЯБ във времето, според различни условия на изготвяне и отлежаване, отнесени към стандартни условия на изготвяне и отлежаване под вода при 20°C

Условия на изготвяне и отлежаване <i>Изготвяне и отлежаване под вода при 20°C</i>	Отношение на якостта на натиск на:		
	2-ри ден, %	7-ми ден, %	28-ми ден, %
<i>Изготвяне и отлежаване под вода при 10°C</i> <i>Изготвяне и отлежаване под вода при 20°C</i>	77	95	101
<i>Изготвяне и отлежаване под вода при 30°C</i> <i>Изготвяне и отлежаване под вода при 20°C</i>	123	116	107
<i>Изготвяне при 10°C и отлежаване под вода при 20°C</i> <i>Изготвяне и отлежаване под вода при 20°C</i>	95	104	106
<i>Изготвяне при 30°C и отлежаване под вода при 20°C</i> <i>Изготвяне и отлежаване под вода при 20°C</i>	108	101	104
<i>Изготвяне при 10°C и отлежаване във възд. – сух. среда при 10°C</i> <i>Изготвяне и отлежаване под вода при 20°C</i>	58	79	84
<i>Изготвяне при 30°C и отлежаване във възд. – сух. среда при 30°C</i> <i>Изготвяне и отлежаване под вода при 20°C</i>	94	122	119

Ефектът на топло-влажнотната обработка (пропарване или автоклавиране) е оценен посредством сравнение между якостта на натиск на третирани образци с тези на контролни проби от три състава, отлежавали във влажна среда – моделен състав; оптимален състав и оптимален състав с 2% стоманени влакна – табл. VI. 9.

табл. VI. 9: Описание на съставите на СВЯБ, подложени на топло-влажностна обработки

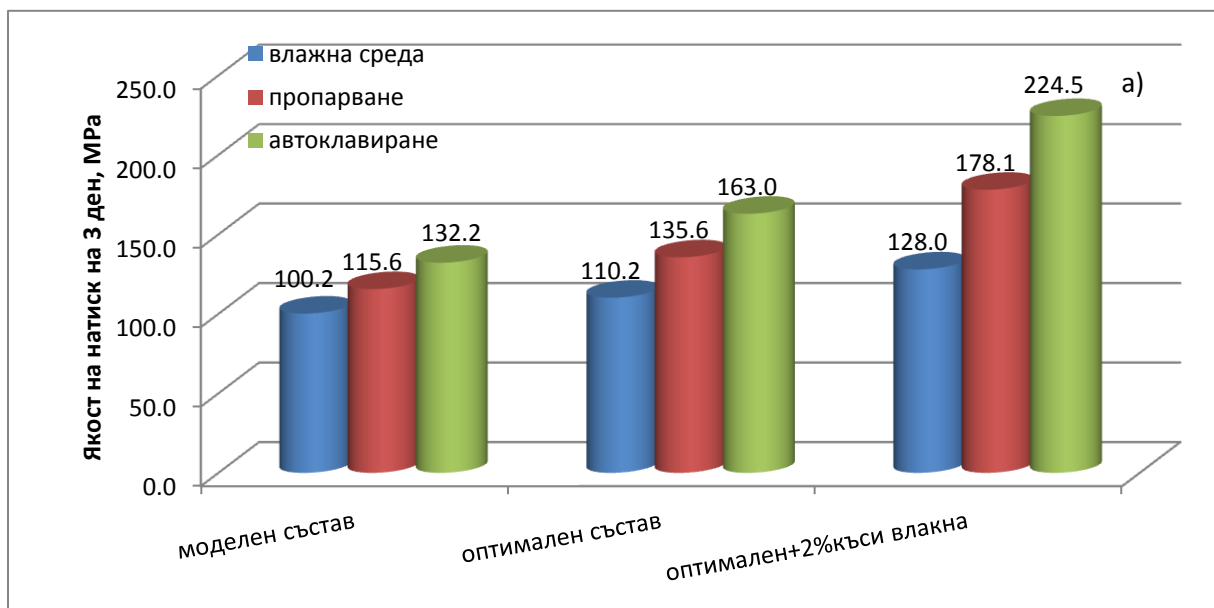
Състав	моделен	оптимален	оптимален+влакна
Цимент клас (количество, кг)	CEM I 52.5 N (840)	CEM I 52.5 N (930)	
Добавъчен материал (Dmax)	Кварцов пясък (1.0 mm)	Кварцов пясък (0.5 mm)	
Активна минерална добавка (% от масата на цимента)	Микросилициев прах (20%)	Микросилициев прах (30%)	
Фин пълнител (% от масата на цимента)	няма	Кварцово брашно (40%)	
Суперпластификатор (% от масата на цимента)	Glenium 51 (2.5%)	Glenium 51 (4%)	
Водо-циментно отношение	0,22		
Дисперсна армировка (% по обем)	няма	няма	Къси стоманени влакна (2%)

Получените резултати за якостта на натиск (фиг. VI. 15) след прилагането на топло-влажностна обработка, потвърждават като цяло литературните данни [Yazini, 2008, Tafraoui, 2009]:

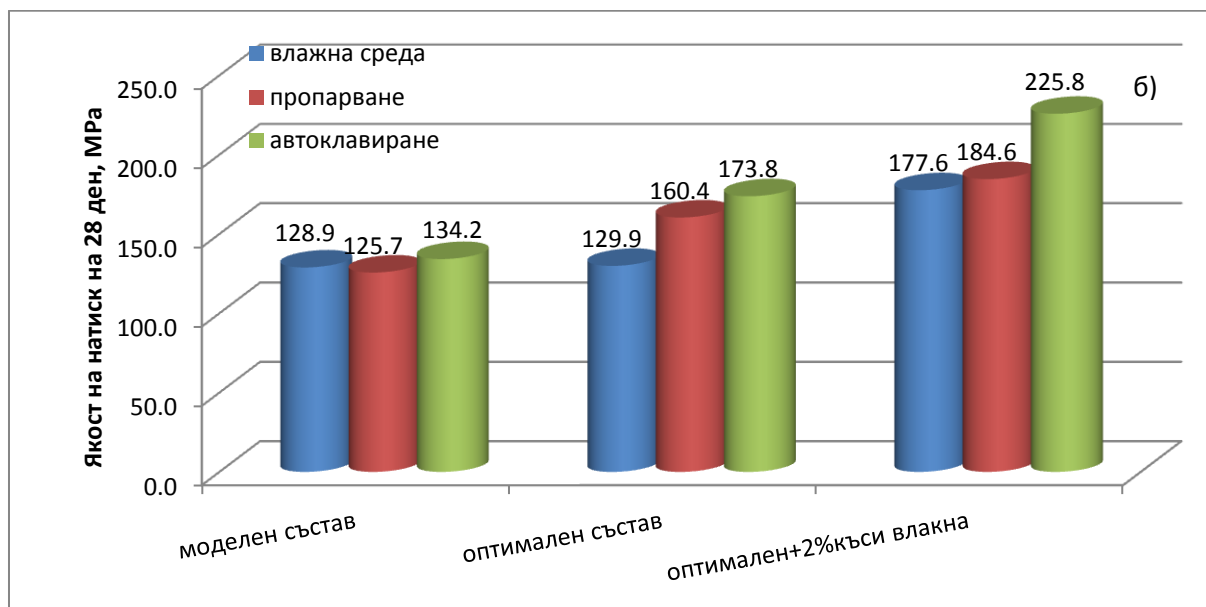
- Тепло-влажностната обработка на СВЯБ води до повишение на якостта на натиск на 3-ти ден и при трите състава, в сравнение с якостите на контролните образци, отлежавали във влажна среда;
- Ефектът от автоклавирането е почти двойно по-голям от този на пропарването;
- Най-голям е ефектът от автоклавирането върху дисперсно-армирания състав: след автоклавирането увеличението на якостта на натиск на 3-ти ден е от порядъка на 30% при моделния състав, 45% при оптимизираната матрица и достига до 75% при дисперсно-армирания композит, поради доброто сцепление на влакната с модифицираната матрица (виж гл. V т. 4.2.2).

След топло-влажностна обработка, нарастването на якостта на натиск между 3-ти и 28-ми ден е пренебрежимо малко (само няколко процента, в рамките на разсейването на единичните резултати), което при такова кратковременно третиране води на практика до достигане на максималната стойност на якостта на натиск. За сравнение, при отлежаване във влажна среда (контролни условия), якостта на натиск на образците между 3-ти и 28-ми ден нараства с 20% (при оптималния състав) до 40% (при дисперсно-армирания състав), което се дължи на продължаващите процеси на хидратация на цимента. Тъй като ефектът от пропарването е по-слабо изразен, след него СВЯБ запазва известен потенциал за продължаваща хидратация и якостта на натиск се увеличава от 15% до 40% при различните състави.

Причината за по-изразеното влияние на автоклавната обработка при оптималния състав, отколкото при моделния, е, че тя не просто ускорява процесите на хидратация на цимента, както е при обикновените бетони, а води до формиране на по-голямо количество хидратационни продукти, дължащи се на вторични хидратационни процеси, в резултат от използването на кварцово брашно и завишено количество МСП.







фиг. VI. 15: Влияние на топло-влажностната обработка при различни състави върху якоостта на натиск на: а) 3-ти ден; б) 28-ми ден

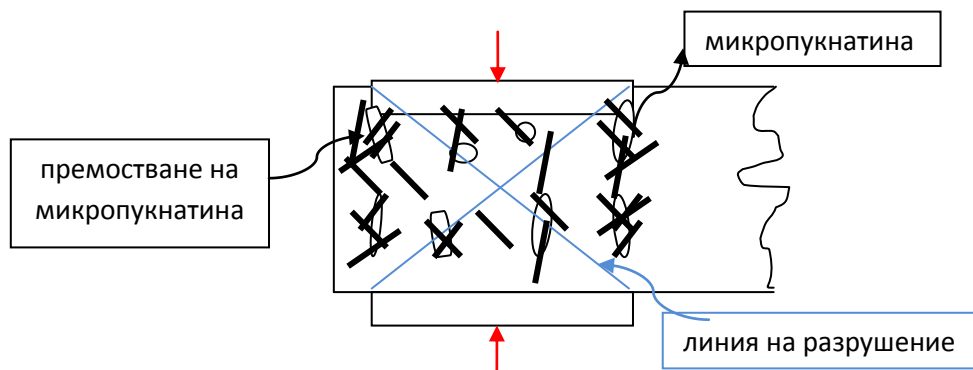
### 1.1.3 Влияние на вида и размерите на пробните тела

В табл. VI. 10 са представени резултати от проведено изпитване за определяне на якоостта на натиск на пробни тела с размери: 50/50/50 mm (въз основа на стандарт [ASTM C109/C109M-13]), половинки на призмите 40/40/160 mm, както и на призми с основа 40x40 mm и височина от 160 mm, от два разглеждани състава – оптимален и влакнесто-армиран оптимален състав. С увеличаване на размера на пробните тела се отчита по-ниска стойност на якоостта на натиск (разликата от порядъка на 23%), по подобие на зависимостите при обикновените бетони. Освен по-голямото съдържание на дефекти в по-големите образци, следва да се отчита, че половинките призми има и съдействие на ненатоварената част на пробното тяло в сравнение с кубчетата. С въвеждането на стоманени влакна разликата между кубчетата и половинките призми намалява на 15%, тъй като стоманената армировка съдейства за намаляване на ефекта от микродефектите, както и за възпрепятстване разтварянето на микропукнатини (фиг. VI. 16). Не се наблюдават деформации от триенето между пробното тяло и плочите на пресата. Отношението между якоостта на кубчетата и на призмите е около 87%. Тази стойност е по-висока от характерните за обикновения бетон (75-80%).

табл. VI. 10: Влияние на вида на пробното тяло върху якоостта на натиск при различни състави

Вид на пробното тяло	Якоост на натиск на 28-ми ден, МПа	
	Оптимален състав	Оптимален състав +2% стоманени влакна
Кубчета 50/50/50 mm	103,2	170,3
Цели гредички 40/40/160mm	117,4	182,6
Половинки гредички 40/40/160 mm	134,7	194,9

При натоварването, при призми с отношение  $H/a=4$ , без дисперсна армировка в тях, разрушението настъпва взривно, тъй като напречните деформации в средната част на пробното тяло, водещи до разрушението му, достигат своите гранични стойности при по-ниски стойности от тези при обикновения бетон (виж гл. VI. т. 1.2.2). Характерно за СВЯБ с дисперсна армировка, е много по-големият модул на еластичност в сравнение с обикновения бетон (виж гл. I т. 5.3.1), особено по-голямата му линейна зона на нарастване на деформациите при натоварване.



фиг. VI. 16: Премостване на микропукнатини със стоманени влакна при половинки гредички 40/40/160 mm, натоварени на натиск

Хомогенното разпределение на влакната в обема му съдействат срещу създаване на мигновено поле на напреженията, което да формира разрушителни пукнатини. При влакнесто-армирания композит, отношението между якостта на натиск при кубчетата и при призмите е още по-висока (94%) и от тази на матрицата. Това се дължи на повишената способност за развитие на напречни деформации.

## 1.2 Деформационни характеристики

### 1.2.1 Модул на линейни еластични деформации (Е-модул)

Според [ACI 2005] обикновеният бетон, с якост на натиск между 28 MPa и 55 MPa, има модул на еластичност в интервала от 25 GPa до 35 GPa. При СВЯБ е получен модул на еластичност над 50 GPa, като влагането на стоманени влакна води до допълнителното му увеличаване с около 3%, а след прилагането на топло-влажностна обработка са достигнати стойности над 56 GPa. Получените резултати следват тенденциите описани в литературата [Ahlborn, 2008, Graybeal, 2005].

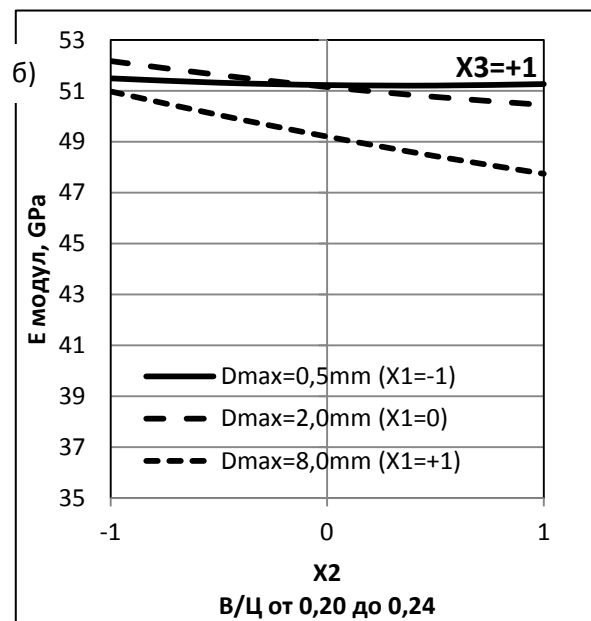
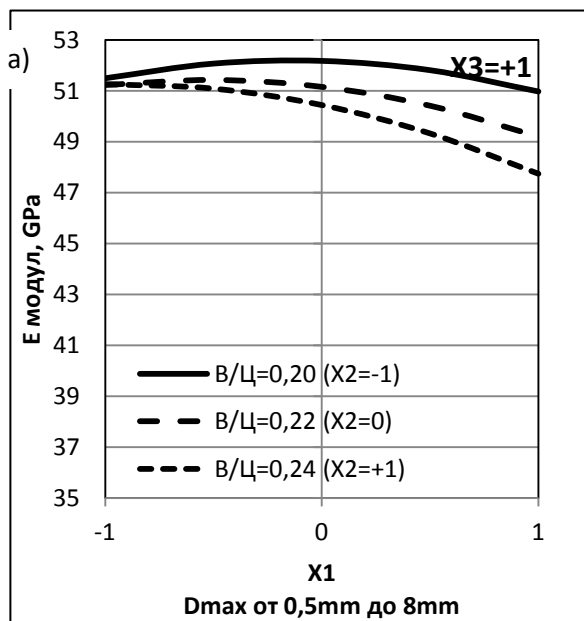
#### 1.2.1.1 Влияние на рецептурни параметри

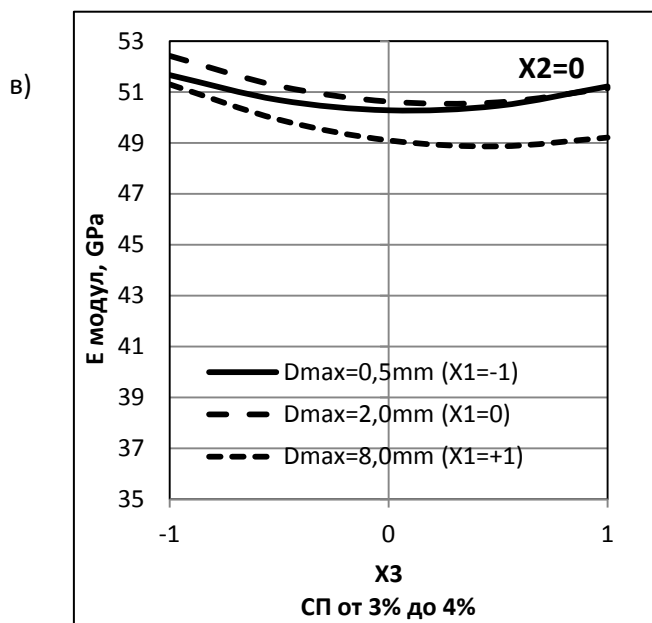
Установено е, че модулът на еластичност на матрицата на СВЯБ е от 47,6 GPa до 51,9 GPa. Получените стойности отговарят на предписанията за СВЯБ в световната литература [AFGC/SETRA, 2013]. Модулът на еластичност, като една много по-консервативната характеристика на бетона в сравнение с останалите му характеристики. Основните му фактори, които му влияят са: вложената дисперсна армировка, приложената топло-влажностната обработка и зърнометричния състав.

От плана на експеримента е установена следната зависимост на модула на еластичност на матрицата от изследваните фактори:

$$Y = 50,63 - 0,596x_1 - 0,936x_1^2 - 0,75x_1x_2 - 0,413x_1x_3 - 0,465x_2 + 0,156x_2^2 - 0,4x_2x_3 - 0,636x_3 + 1,159x_3^2$$

Оказва, се че коефициентите  $\beta$  пред неизвестните са много малки, което означава, че Е-модула се влияе в много малка степен от  $D_{max}$ , В/Ц отношение и количеството СП. Това се потвърждава и от квазиеднофакторните модели, представени на фиг. VI. 17. Установено е, че с увеличаване на максималния размер на добавъчния материал, се намалява модула на еластичност (фиг. VI. 17-а и 17-б). При едрозърнестите смеси (с  $D_{max}=8$  mm), увеличеното количество вода предизвиква редукция на модула на еластичност от 4,0% до 6,5%. Това се дължи на формираната плаваща структура на бетона, при която зърната на добавъчния материал не могат да си взаимодействат по между си и натоварването се поема в по-голяма степен от матрицата. Така ЕДМ се превръща в по-слабо звено, през които протича разрушението (виж гл. I. т. 4.1). Този ефект е по-силно изразен с нарастване на В/Ц отношение. При дребнозърнестите бетони (с  $D_{max}=0,5$  mm), независимо от В/Ц отношение, Е-модулът има стойности над 51 GPa. С увеличаване на суперпластифициращата добавка леко се намалява Е-модула на СВЯБ (с около 4-5%), независимо от максималния размер на добавъчния материал (фиг. VI. 17-в).





фиг. VI. 17: Изменение на модула на еластичност в зависимост от: а) Dmax, при количество на СП=4%; б) В/Ц отношение, при количество на СП=4%; в) СП, при В/Ц=0,20

От съпоставката на модула на еластичност, спрямо експерименталните данни и теоретично изчислените (виж. гл. I т. 5.3.1), въз основа на зависимости между Е-модула и якостта на натиск, може да се установи, че най-подходящ за матрицата на СВЯБ е моделът на *Sritharan*, според който:

$$E = 4150\sqrt{f_c}$$

където:

$E$  е модулът на еластичност в МПа,

$f_c$  е якостта на натиск на бетона в МПа.

Изчисленото отклонение на експерименталните данни от изчислителните е между 1% и 15%. По-големи са отклоненията при по-едрозърнестите състави (с Dmax=8 mm и Dmax=2 mm). С увеличаване на СП, в повечето случаи се увеличава и разликата между експерименталните данни и теоретичния модел (табл. VI. 11). Останалите разгледани модели водят до по-големи отклонения между експерименталните и теоретични стойности – между 8% и 15%. Измереният Е-модул от 51,5 GPa за оптималния състав най-много се доближава до теоретичната си стойност, с отклонение от под 1%. Този оптимален състав е избран за изчисляване на влиянието и на други параметри върху Е-модула.

**табл. VI. 11: Съпоставка между експериментални резултати и теоретични зависимости за определяне модула на еластичност на СВЯБ**

Ф-ри от ПЕ	Dmax (x <sub>1</sub> )	0,5	8	2	0,5	8	2	0,5	8	2	2	0,5	8	2
	В/Ц (x <sub>2</sub> )	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	СП (x <sub>3</sub> )	3,5	3,5	3	3,5	3	4	3	3,5	3	4	4	4	3,5
Ескп. данни		50,6	51,9	51,6	49,4	51,0	51,5	52,3	47,6	53,2	51,5	51,5	48,5	50,6
Изчислителни стойности:	Sritharan	50,0	47,4	48,0	47,0	47,7	45,8	45,4	46,3	46,7	46,5	52,0	43,0	48,0
	Graybeal	46,3	43,8	44,4	43,5	44,2	42,4	42,0	42,9	43,2	43,1	48,1	39,8	44,4
	Ma'2002	46,6	44,9	45,3	44,6	45,1	43,8	43,4	44,1	44,4	44,3	47,9	41,7	45,3
	Ma'2004	46,4	44,7	45,1	44,5	44,9	43,7	43,4	44,0	44,3	44,2	47,5	41,9	45,1

Възрастта на СВЯБ не оказва съществено влияние върху Е-модула. Той нараства с около 3%, в рамките на една година, при отлежаване под вода. За разлика от него, якостта на натиск отбелязва увеличение с над 12% (табл. VI. 12).

**табл. VI. 12: Влияние на възрастта на бетона върху модула на еластичност на СВЯБ**

Вид състав:	Якост на натиск, 28-ми ден, МПа	Е-модул, 28-ми ден, GPa	Якост на натиск, 1-на година, МПа	Е-модул, 1-на година, GPa
Оптимален състав	156,7	51,53	176,2	53,06

Добавянето на 2% стоманени влакна също води до малки промени в модула на еластичност (53,4 GPa), въпреки, е тя е с 4 пъти по-висок Е-модул от този на матрицата на СВЯБ (табл. VI. 13). Това се дължи основно на много ниската степен на натоваване (до 40% от максималната сила), при която не може да бъде цялостно използван големия потенциал на стоманените влакна при опън.

**табл. VI. 13: Влияние на дисперсната армировка върху модула на еластичност на СВЯБ**

Вид състав:	Е-модул, 28-ми ден, GPa
Оптимален състав	51,53
Оптимален състав+2% стом.влакна	53,37

Същевременно, при финозърнестите смеси, влиянието на стоманената влакнеста армировка може да се моделира с матрица ( $E_p = \varepsilon_p = \sigma_p$ ) и влакна ( $E_a = \varepsilon_a = \sigma_a$ ), с обемно съдържание 'g', чрез теоретичния опростен двуфазов модел на бетона според Illston [Illston, 2010], описан в гл. I т. 5.3.1. Може да се предположи, е при тази степен на натоварване, матрицата и влакната имат едни и същи деформации (работят съвместно) – модел 'А'. Още по-добре поведението на СВЯБ се описва с комбинирания модел 'В', според който всяко влакно е обгърнато от матрица. Изчисляването на модула на еластичност с тази предпоставка е най-близко до експерименталните данни (табл. VI. 15).

табл. VI. 14: Изчислителни стойности на модула на еластичност на СВЯБ спрямо теоретичните модели на Illston

Вид модел:	Модул на еластичност:		
	Предпоставки:	Теоретичен модел:	Изчислителни стойности, GPa:
А	$\varepsilon_c = \varepsilon_a = \varepsilon_p$	$E_c = E_a \cdot g = E_p(1 - g)$	54,62
Б	$\sigma_c = \sigma_a = \sigma_p$	$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_a} \cdot g + \frac{1}{E_p}(1 - g)$	42,31
В	комбинирано действие	$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - \sqrt{g}}{E_p} + \frac{\sqrt{g}}{E_a \cdot g + E_p(1 - \sqrt{g})}$	53,78

#### 1.2.1.2 Влияние на технологични параметри

Разгледаните два различни топло-влажностни режима на третиране на пробните тела от оптималния състав (виж гл. III т. 6.3), водят до увеличаване на модула на еластичност на матрицата с около 3% след прилагане на пропарване и с около 6% след автоклавиране (табл. VI. 15). Добавянето на влакнеста армировка покачва с 3,6% Е-модула му, а якостта му на натиск се повишава с 5%. Прилагането на автоклав върху влакнесто-армираните СВЯБ има по-съществен ефект върху якостта на натиск (25% увеличение) в сравнение с нарастването на Е-модула (близо 6%) до 56,4 GPa.

Цялостното увеличение на модула на еластичност, в следствие на реализираната топло-влажностна обработка, се дължи на формираната по-плътна микроструктура на СВЯБ (виж гл. V т. 4.2.2). Резултатите показват по-значителен ефект от третирането на пробните тела, в сравнение с използването на дисперсна армировка. Това се дължи на по-голямо влияние на матрицата на СВЯБ върху модула на еластичност, в сравнение с влакната (2 % по обем).

табл. VI. 15: Влияние на вида на топло-влажностна обработка върху модула на еластичност на СВЯБ

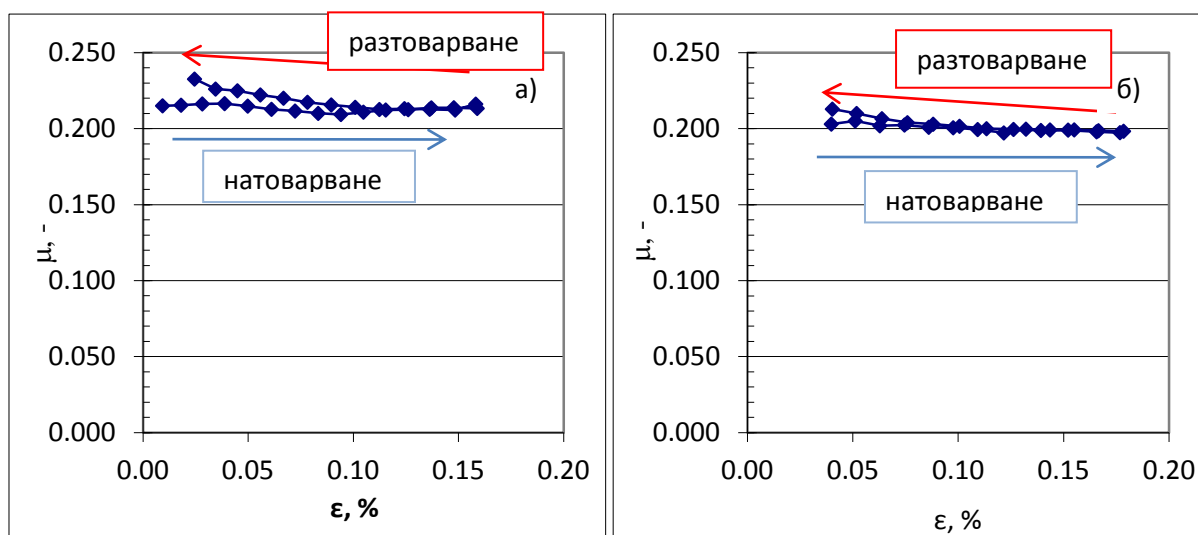
Условия на отлежаване:	Модул на еластичност, GPa	
	Оптимален състав	Оптимален състав+2% стом.влакна
Влажна среда	51,53	53,37
След пропарване	53,25	55,28
След автоклавиране	54,47	56,44

## 1.2.2 Коефициент на Поасон

## 1.2.2.1 Влияние на рецептурни параметри

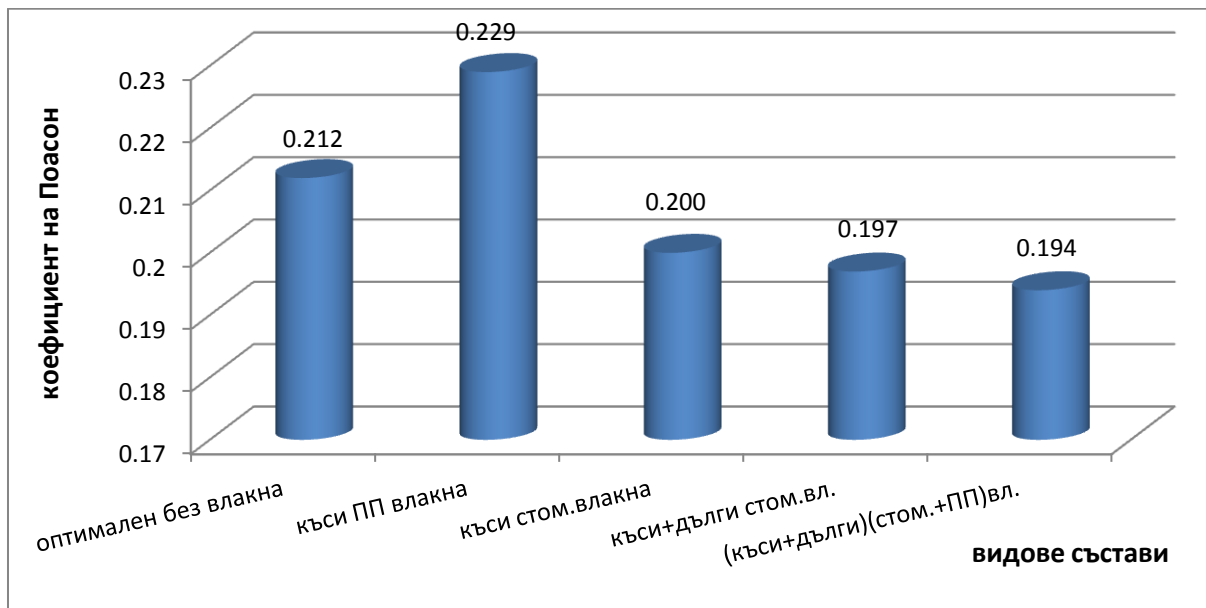
На фиг. VI. 18 е представено изменението на коефициента на Поасон в непрекъснат вид, при натоварване и последващо разтоварване (виж гл. III. т. 9.4.2) на оптимален състав (фиг. VI. 20-а) и състав с 2% по обем къси стоманени влакна (фиг. VI. 18-б). И при двата състава се наблюдава почти права линия при реализиране на натоварването, което показва линейно нарастване на деформациите. Кривата на разтоварване изцяло припокрива кривата на натоварване при състава с дисперсна армировка, което е показател и за действието на влакната в предотвратяване на появата на микропукнатини, чийто микродефект се отразява в подобно 'пластифициране'. Вижда се, че в състава без влакна, макар и много малки (при тази ниска степен на натоварване), подобни невъзвратими (пластични) деформации съществуват.

Получената средна стойност, за коефициента на Поасон на матрицата, е 0,21, което е близко до референтните стойности в *EuroCode 2* [БДС EN 1992-1-1:2005/NA:2011] за обикновените бетони. След добавяне на къси стоманени влакна, коефициентът на Поасон намалява до 0,20.



фиг. VI. 18: Изменение на коефициента на Поасон спрямо надлъжната деформация при: а) оптимален състав; б) оптимален състав с къси стоманени влакна

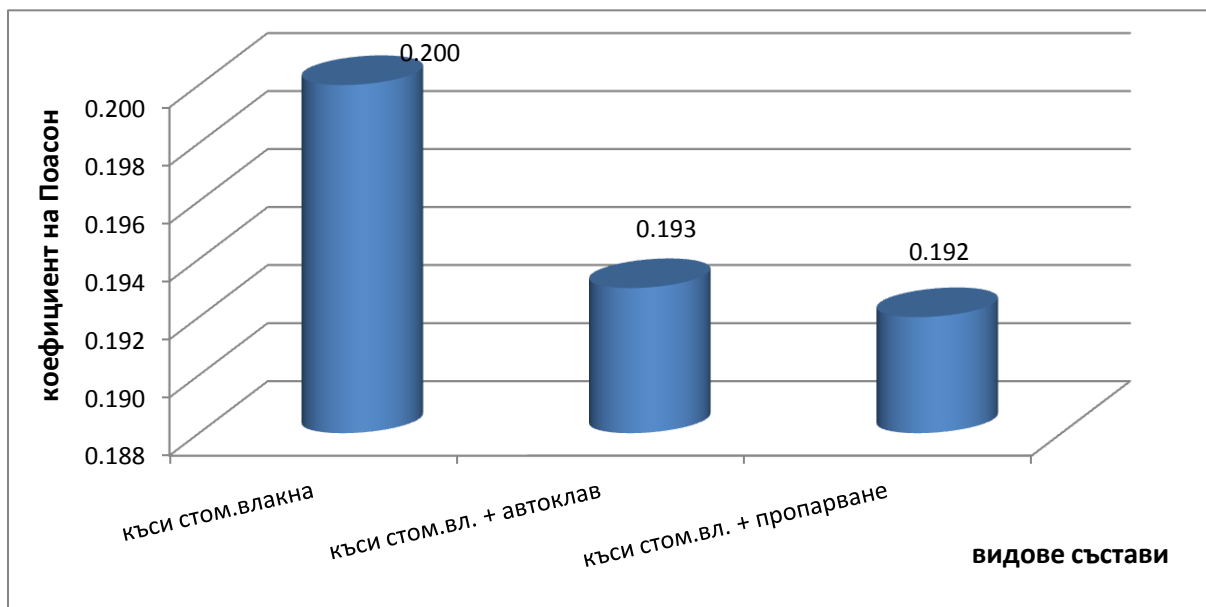
Изследване на коефициента на Поасон при състави от СВЯБ, в зависимост от наличието на различни по размер и количество стоманени и ПП влакна, досега не е известно. Извършеният експеримент показва известни различия между отделните състави (фиг. VI. 19). Потвърждава се тенденцията, че с използването на стоманени влакна се понижава коефициента на Поасон, тъй като те ограничават възникването и развитието на микропукнатини, т.е водят до повишаване на коравината на композита. Измерените стойности са от порядъка на 0,2, което съвпада с френските норми за проектиране на конструкции от СВЯБ [AFGC/SETRA, 2013]. Влагането на ПП влакна води до повишаване на коефициента на Поасон до 0,23, поради намалената коравина на композита.



фиг. VI. 19: Влияние на вида на дисперсната армировка върху коефициента на Поасон

#### 1.2.2.2 Влияние на технологични параметри

Топло-влажностната обработка съдейства допълнително за повишаване на коравината на матрицата и на сцеплението между влакната и матрицата (фиг. VI. 20). Това се отразява в допълнително намаляване на коефициента на Поасон до 0,19 на третираните влакнесто-армирани композити. Литературните данни показват, че при СВЯБ коефициентът на Поасон не се влияе от приложената обработка [Ahlborn, 2008, Vogel, 2008].



фиг. VI. 20: Влияние на вида на топло-влажностната обработка върху коефициента на Поасон



## 2. Якост на опън при разцепване

Якостта на опън при разцепване на 28 дневна възраст на СВЯБ е от порядъка на 7 МПа за матрицата и 13 МПа за влакнесто-армиран композит. В табл. VI. 16 са дадени сравнителни резултатите между якостта на опън при разцепване и якост на натиск на матрицата на СВЯБ на възраст 28-ми ден. При обикновения бетон якостта на натиск превишава тази на опън при разцепване между 15 и 20 пъти [Симеонов, 1991]. При СВЯБ това отношение е 15 пъти. За намаляване на разликата между якостта на опън при разцепване и якостта на натиск благоприятства силно уплътнената структура на материала, с минимално количество пори. Получените резултати съвпадат с литературните данни, където при отчетен резултат за якостта на натиск от около 103 МПа, якостта на опън при разцепване е около 14 пъти по-малка. С увеличаване на якостта на матрицата на натиск (150 МПа) обаче, това отношение се увеличава, като достига якост на натиск от 17 МПа [Pu Hincheng, 2013].

**табл. VI. 16: Сравнение между якостта на опън при разцепване и якостта на натиск на кубчета 50/50/50 mm върху матрицата на СВЯБ**

Вид състав	Якост на опън при разцепване на 28-ми ден, МПа	Якост на натиск на 28-ми ден, МПа
Оптимален състав	7,02	103,2

Допълнителното влагане на дисперсна армировка от къси стоманени влакна към оптимален състав СВЯБ, увеличава якостта на опън при разцепване с над 80%, като достига 12,69 МПа (табл. VI. 17). Освен приносът на хомогенното разпределение на фибрите в целия обем, което води до разтоварване на матрицата, основен ефект имат влакната в средното сечение на пробното тяло, в което възникват опънни напрежения. Счита се, че при тези относително къси и гладки влакна, не може да се използва пълноценно якостта им на опън, а разрушаването настъпва поради отслабване на преходната зона между матрицата и дисперсната армировка и постепенното им изтръгване.

**табл. VI. 17: Сравнение между якостта на опън при разцепване и якостта на натиск на кубчета 50/50/50 mm върху дисперсно-армиран СВЯБ**

Вид състав	Якост на опън при разцепване на 28-ми ден, МПа	Якост на натиск на 28-ми ден, МПа
Оптимален състав + 2% къси стоманени влакна	12,69	170,3

## 3. Поведение при огъване

Изследване на поведението на бетона при огъване е от първостепенно значение при елементи, премостващи големи отвори. Определената якост на опън при огъване, дефинирана в гл. III т. 9.1.1 има за цел да бъдат сравнени различни състави по отношение на разглежданите рецептурни и технологични параметри. В последствие е подробно анализирано якостно-

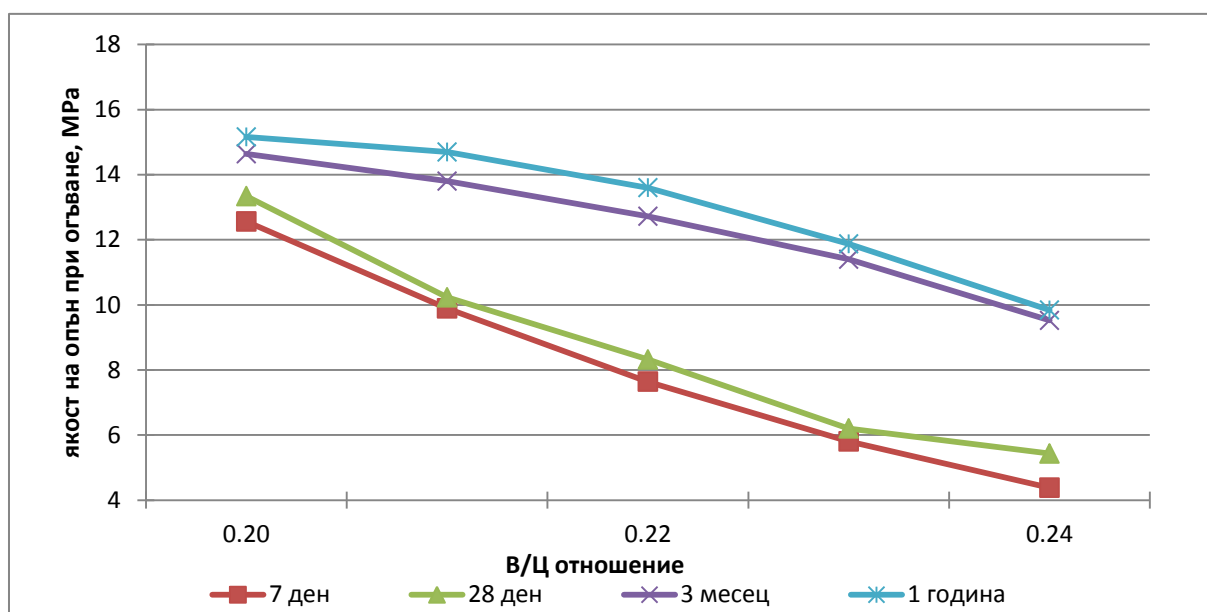
деформационното поведение на СВЯБ, което значително се отличава от това на линейно-еластичните материали.

### 3.1 Якоствни характеристики

#### 3.1.1 Влияние на рецептурни параметри

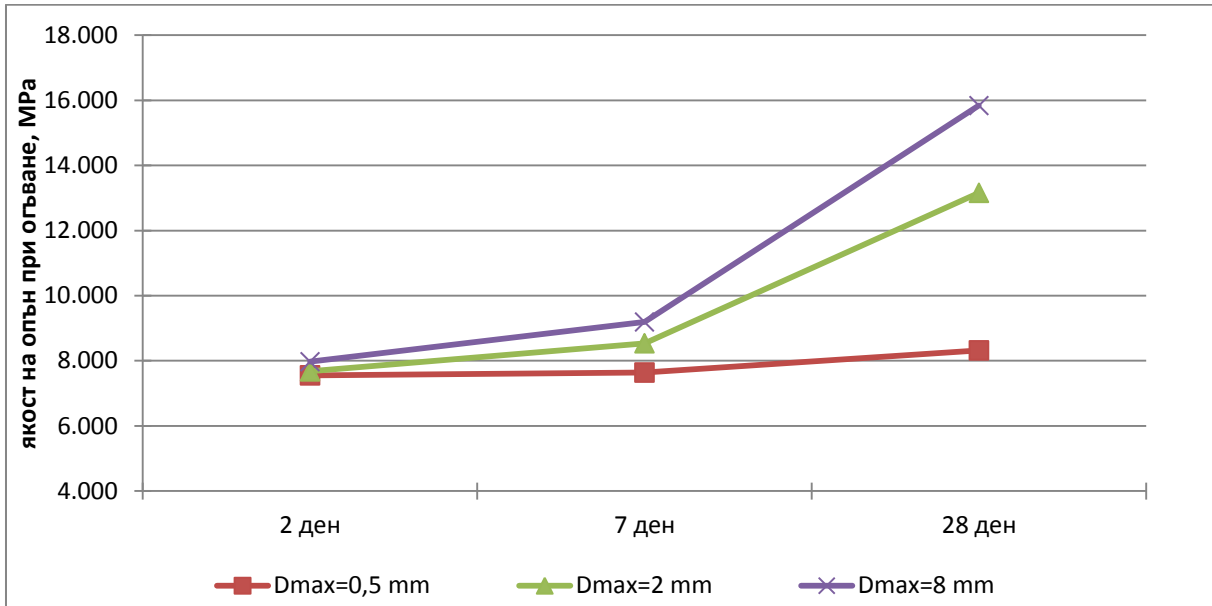
Резултатите от плана на експеримента показват, че якостта на опън при огъване на матрицата на оптималния състав, с  $D_{max}=0,5$  mm и  $V/C=0,22$ , е от порядъка на 8 MPa (на 28 дневна възраст) и достига до 13,5 MPa (на 1 година).

Основен фактор, който влияе на якостта на опън при огъване, се оказва  $V/C$  отношение – фиг. VI. 21. По подобие на якостта на натиск, с намаляване на  $V/C$  отношение, се забелязва увеличаване на якостните характеристики на огъване. Разликата в якостта на опън при огъване, при състави с  $V/C=0,20$  и  $V/C=0,24$ , е около 2,5 пъти, до 28 дневна възраст. С нарастване на процеса на хидратация тази разлика намалява, тъй като съставите с повече вода имат възможност да постигнат по-висока степен на хидратация на възраст 1 година. Състави с  $V/C=0,24$  имат якост на опън при огъване 10 MPa, а тези с  $V/C=0,20$  – 15 MPa.



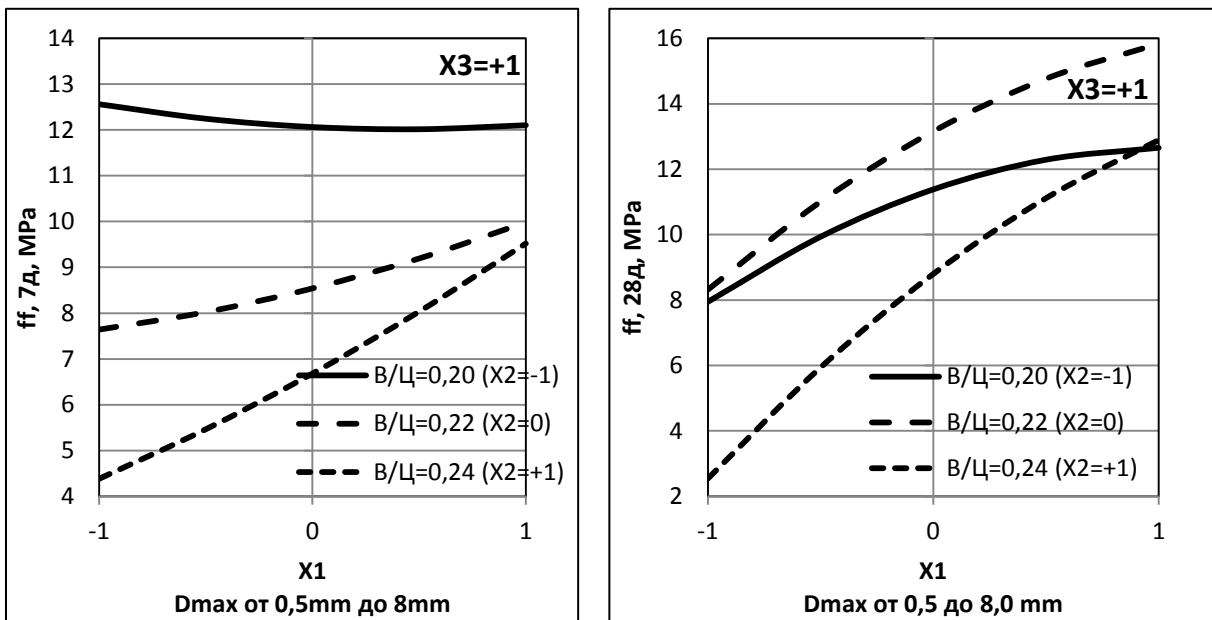
фиг. VI. 21: Развитие във времето на якостта на опън при огъване на матрицата на СВЯБ в зависимост от  $V/C$  отношение

Друг важен фактор върху якостта на опън при огъване е максималният размер на добавъчния материал. В ранна възраст няма разлика между съставите с различно  $D_{max}$ , докато с нарастване на възрастта нараства и влиянието му – най-силно изразено при едрозърнестите бетони ( $D_{max}=8,0$  mm) – фиг. VI 22. Това най-вероятно се дължи на по-коравата матрица на дребнозърнестите бетони ( $D_{max}=0,5$  mm), която се разрушава по-крехко при натоварване на опън при огъване.



фиг. VI. 22: Развитие във времето на якостта на опън при огъване на матрицата на СВЯБ в зависимост от  $D_{max}$

По-големият размер на добавъчния материал води до нарастване на якостта на опън при огъване, при съставите с по-голямо В/Ц отношение. Това се дължи на по-ниската специфична повърхнина на добавъчния материал, с което водата успява да хидратира по-голямо количество цимент – фиг. VI. 23-а. Този ефект е по-силно изразен в късна възраст (фиг. VI. 23-б).



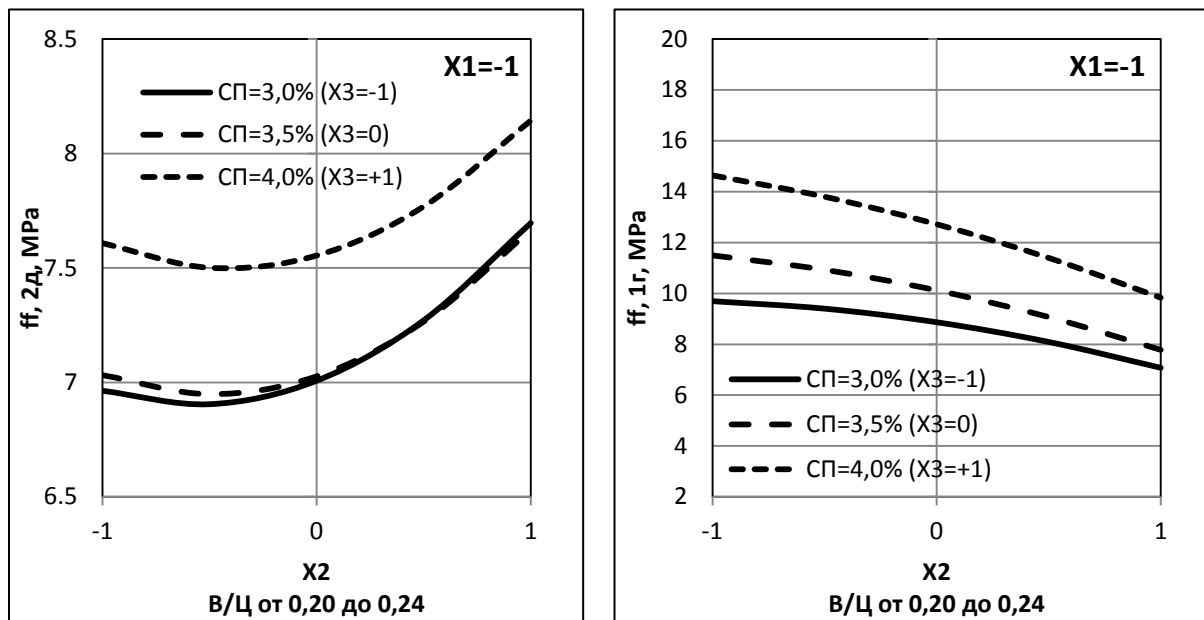
фиг. VI. 23: Изменение на якостта на опън при огъване в зависимост от максималния диаметър на добавъчния материал, с 4% суперпластифицираща добавка при различно водо-циментно отношение на:

а) 7-ми ден

б) 28-ми ден

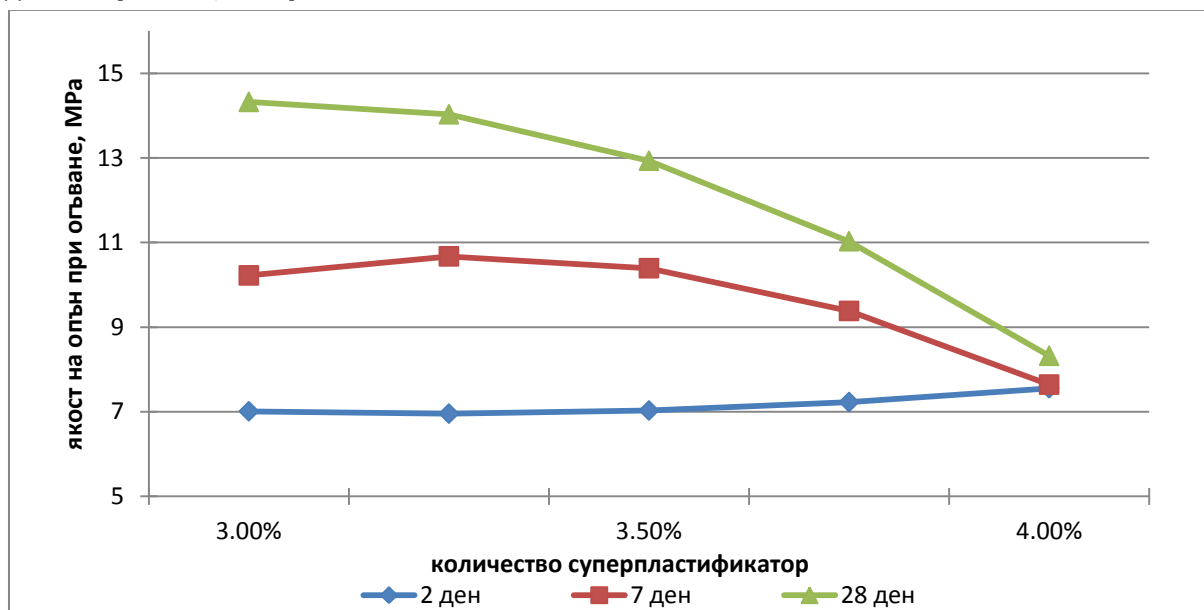
Влагането на по-голямо количество суперпластификатор води до нарастване на якостта на опън при огъване, тъй като се подобрява обработваемостта на финнозърнестата матрица.

Значението на обработваемостта е илюстрирано на фиг. VI. 24-а – якостта на опън при огъване е по-висока в ранна възраст (2-ри ден), при състави с най-голямо В/Ц отношение. В по-късна възраст, очаквано, преобладаващ е ефектът на намалената порьозност на състави с ниско В/Ц отношение – фиг. VI. 24-б.



фиг. VI. 24: Изменение на якостта на опън при огъване в зависимост от водо-циментните отношения на дребнозърнест бетон с  $d_{max}=0,5$  mm и различно количество суперпластифицираща добавка на:  
 а) 2-ри ден  
 б) 1-на година

При оптималния състав от плана на експеримента, влиянието на по-голямото количество СП е по-скоро негативно – фиг. VI. 25. Това най-вероятно се дължи на нарастване на крехкостта на матрицата. Получените резултати следват тенденциите за промяна на якостните характеристики на обикновения бетон, при използване на различно количество СП химическа добавка [Puertas, 2005].



фиг. VI. 25: Влияние на количеството суперпластификатор върху якостта на опън при огъване във времето при оптималния състав от плана на експеримента

Намаляването на количеството на цимента води до съществено понижение на якостта на опън при огъване (с 14% на 2-ри ден и до 26% на 7-ми ден). Основната причина се дължи на влошаването на обработваемостта на сместа.

**табл. VI. 18: Вариране на количеството на цимента върху модифицирани състави от плана на експеримента**

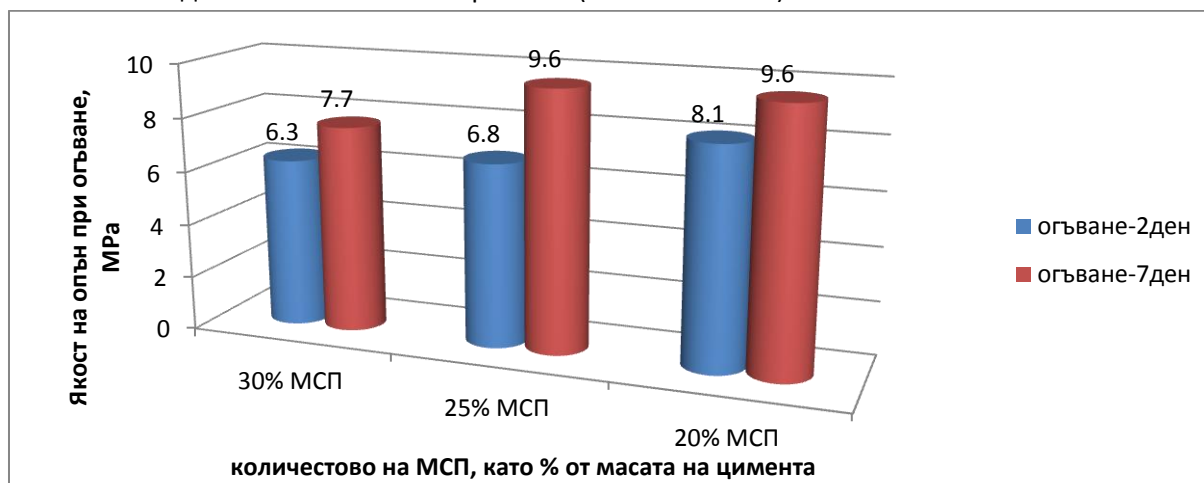
Dmax, mm	В/Ц -	МСП, %	СП, %	Цимент, kg	Разстилане, mm	Якост на опън при огъване, МПа	
						2-ри ден	7-ми ден
0,5	0,22	30	4	930	13,0	7,3	9,9
				900	12,5	6,9	8,7
				880	12,0	6,3	7,7
				830	12,0	6,3	7,3

Активността на цимента има определящо значение за якостта на опън при огъване на СВЯБ – по-високата активност на цимент I води до 30% по-високи якости на огъване на 28 дневна възраст, в сравнение със състава изготвен с цимент II – табл. VI. 19.

**табл. VI. 19: Влияние на активността на цимента върху якостта на опън при огъване на СВЯБ**

	Ден	Якост на опън при огъване, МПа		Якост на натиск, МПа	
		цимент I	цимент II	цимент I	цимент II
цимент	2-ри	6,0	5,9	27,0	28,7
	7-ми	6,3	6,4	47,9	40,3
	28-ми	9,8	6,7	54,9	43,8
СВЯБ	2-ри	6,7	6,3	83,4	85,2
	7-ми	7,3	7,7	114,3	117
	28-ми	10,5	8,1	156,7	134,1

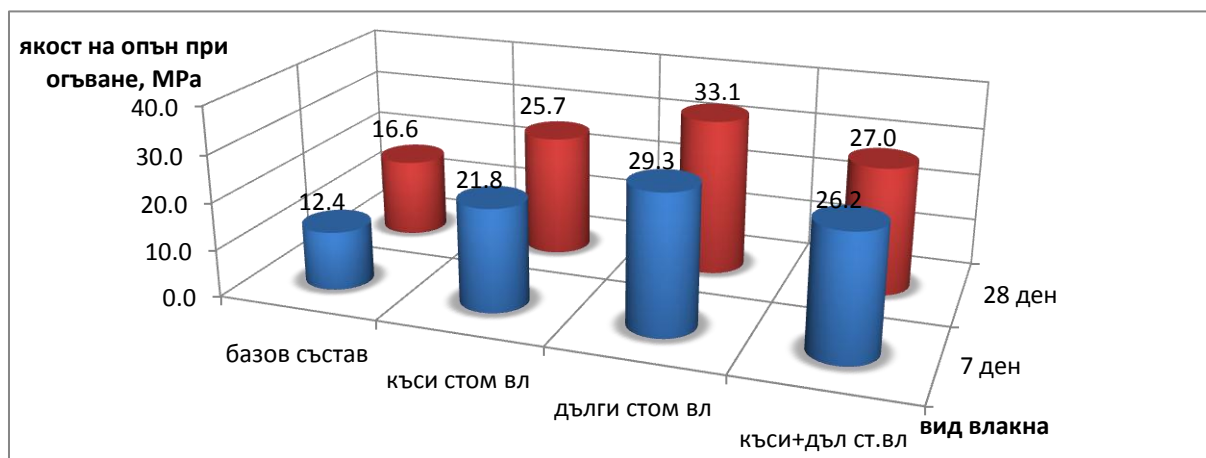
Ранната якост на опън при огъване (2-ри и 7-ми ден) е по-висока при състави с по-ниско съдържание на МСП, тъй като тези смеси са били с по-добра обработваемост – фиг. VI. 26. Благоприятният ефект на МСП върху якостните свойства на СВЯБ се проявява в по-късна възраст и особено след топло-влажностна обработка (виж гл. VI. т.3.1).



**фиг. VI. 26: Якост на опън при огъване на СВЯБ в зависимост от количеството на МСП**

Прилагането на дисперсна армировка към СВЯБ променя изцяло поведението му на огъване. С увеличаване на процента на армиране и отношението L/D на влакната, нараства многократно и якостта на опън при огъване: от 12 МПа до 22-29 МПа (на 7-ми ден) и от 17 МПа до 25-33 МПа (на 28-ми ден).

Характеристиките на поведението на СВЯБ на огъване би следвало да се разглежда не само чрез получените стойности на якостта на опън при огъване, а и с параметрите на дуктилността – енергията на разрушение, индексите на пластично разрушение (*toughness index*) и фактора на остатъчната якост на бетона (*residual strength factor*), чрез които се характеризира допълнителната носимоспособност на композита след поява на първа пукнатина при натоварване на огъване, чрез измерване на надлъжната деформация в опънна зона и провисването на гредата в средната зона (виж гл. III т. 9.4.3 и 9.4.4). Освен това, от крехко поведението се превръща в дуктилно. Затова най-голям е приносът на стоманената влакнеста армировка. Якостта на опън при огъване се повишава със 76% до 153% и достига средни стойности от порядъка на 30 МПа (фиг. VI. 27). Колкото е по-високо съдържанието на дълги стоманени влакна, толкова якостта на опън при огъване е по-висока - дългите влакна благоприятстват поведението на огъване в по-голяма степен, тъй като освен премостването и възпрепятстването на развитието на микропукнатините, работят и след образуването на макропукнатини, тъй като имат по-голяма закотвяща дължина, докато късите влакна са по-податливи на изтръгване.

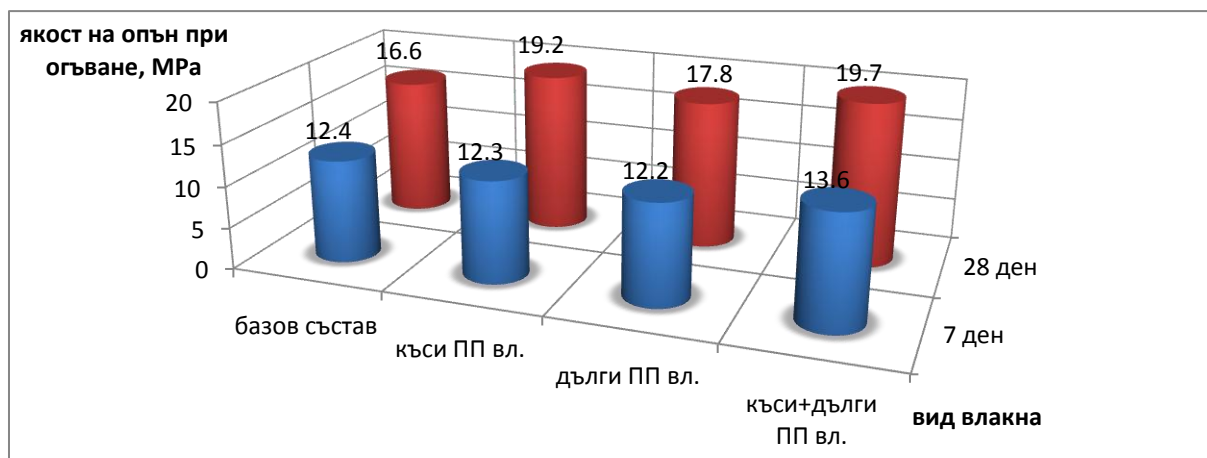


фиг. VI. 27: Влияние на стоманените влакна върху якостта на опън при огъване на СВЯБ

Получените резултати са изключително показателни за ролята на стоманените влакна в състава на СВЯБ и потвърждават тяхната ефективност. Вложеното количество е оптимално (по литературни данни), 2 % по обем, но то води до над 2,5 пъти увеличена якостта на опън при огъване както на 2-ри, така и на 7-ми и 28-ми ден. Разрушението в материала настъпва след продължителна деформация на образеца, благодарение на реализираното изтръгване на влакната от матрицата. Счита се, че при късите влакна не е възможно да се мобилизира голяма част от носещата способност на влакната.

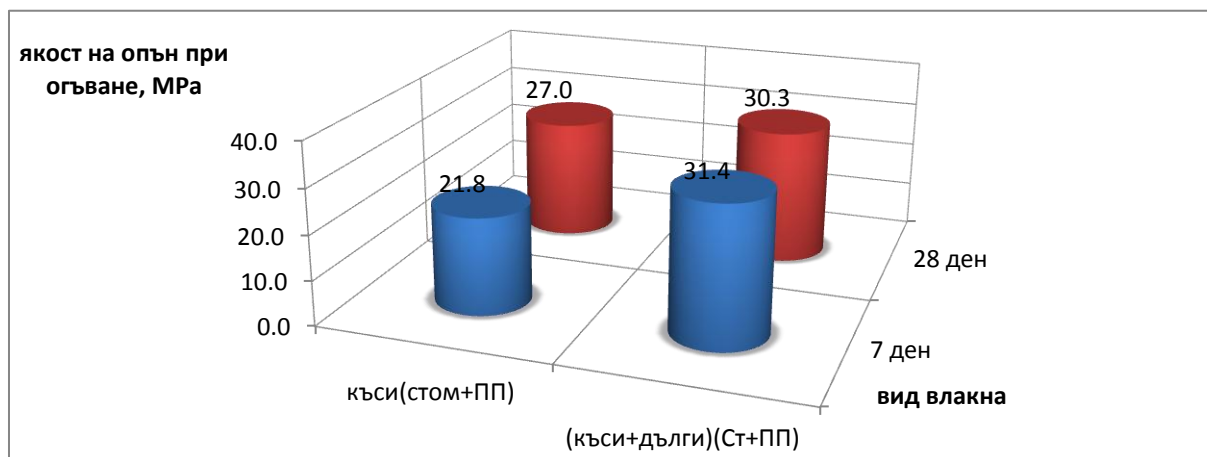
Както и при якостта на натиск, влагането единствено на микроПП влакна не променя якостта на опън при огъване и тя е съизмерима с тази на базовия състав (фиг. VI. 34). Известно е, че голям процент на армиране с ПП влакна, с мрежеста конфигурация, води до повишаване

на дуктилността на цимент-съдържащите композити [Vornemann, 2004], което в по-малка степен се потвърждава и от направените изследвания.



фиг. VI. 28: Влияние на полупропиленовите влакна върху якостта на опън при огъване на СВЯБ

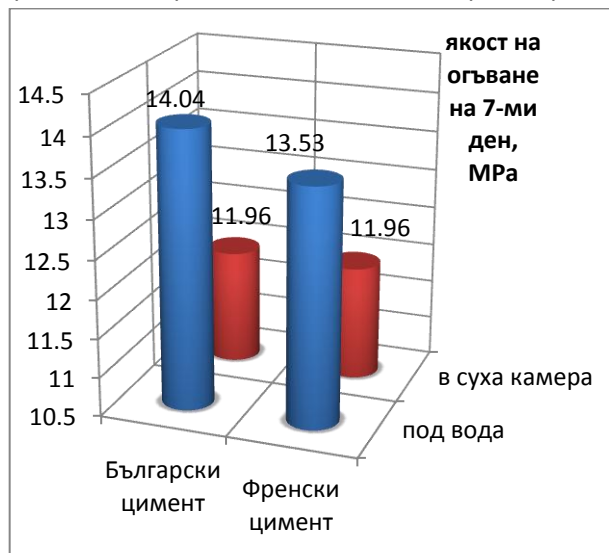
Ефектът от използването на хибридна армировка е илюстриран на фиг. VI. т. 29. Той е по-голям, когато се използва комбинация от къси и дълги стоманени и ПП влакна.



фиг. VI. 29: Влияние на хибридна армировка върху якостта на опън при огъване на СВЯБ

### 3.1.2 Влияние на технологичните параметри

От съществено значение се оказват условията на отлежаване на пробните тела върху набирането на якост на опън при огъване – фиг. VI. 30. И при двата разглеждани вида цимент (български и френски), получените стойности за якостта на опън при огъване са от 13% до 16% по-високи при отлежаване под вода, в сравнение с тези в суха среда. Това се дължи на по-високата им степен на хидратация, въпреки липсата на капилярна порестост.



фиг. VI. 30: Якост на опън при огъване на оптимизиран състав на 7-ми ден, при използване на български и френски цимент при различни условия на отлежаване

Топло-влажностната обработка води до повишаване на якостта на опън при огъване (фиг. VI. 31), съответно над 30% след пропарване и 35% след автоклавирание. За разлика от якостта на натиск, няма практическа разлика в якостта на опън при огъване между оптималния и моделния състав. Прилагането ѝ върху състава с дисперсна армировка, има значително посилен ефект, не само поради действието ѝ върху матрицата, но и поради подобреното сцепление на влакната с матрицата (виж гл. V т. 4.2.2).



фиг. VI. 31: Влияние на топло-влажностната обработка при различни състави върху якостта на опън при огъване



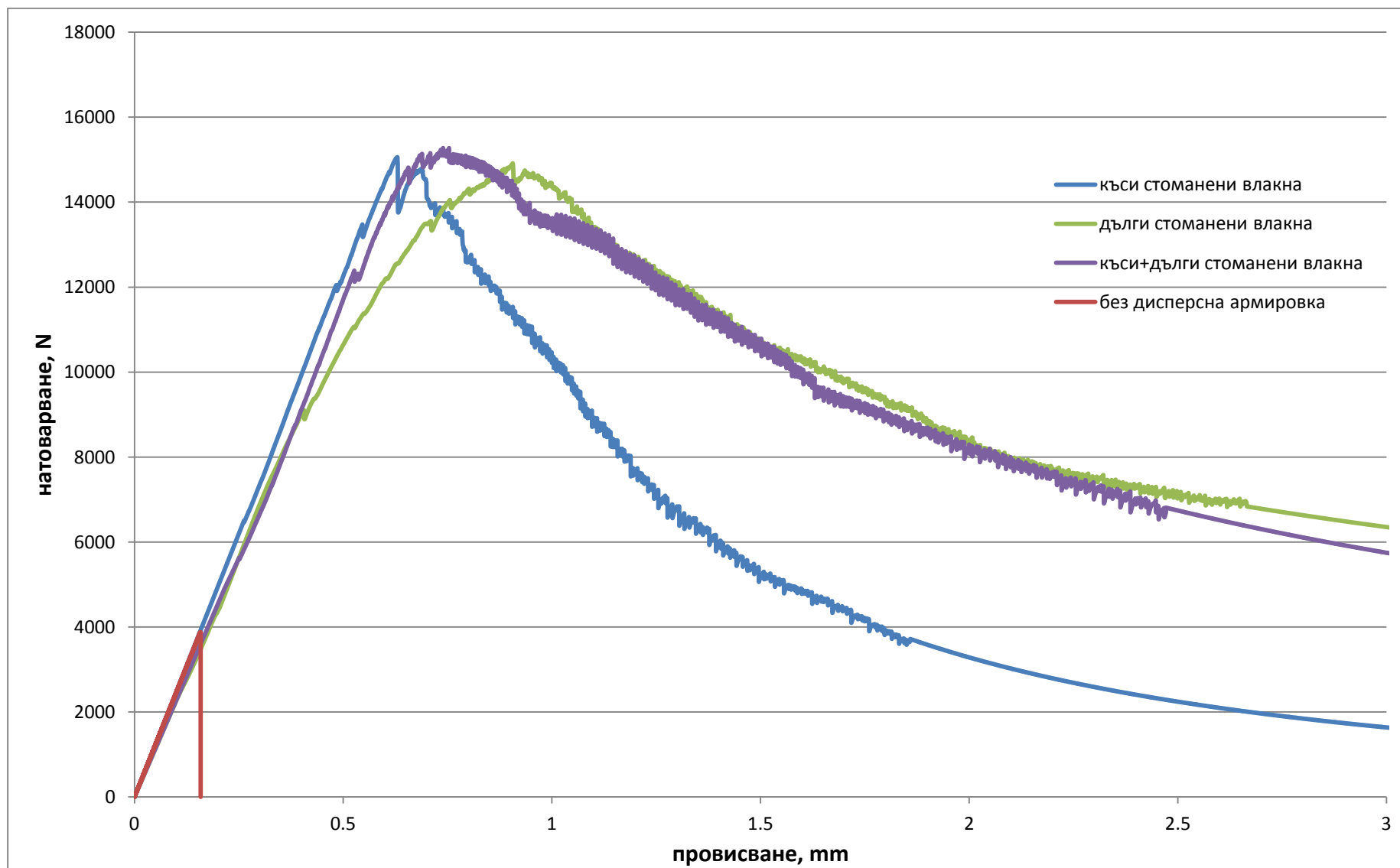
### 3.2 Особенности на работните диаграми при натоварване на огъване

Използването на дисперсна армировка е задължителен елемент в състава на СВЯБ, с оглед редуциране крехкостта на материала. По този начин се предотвратява възможността за мигновена загуба на носеща способност след достигане на максимална сила. Влакната превръщат втвърдения бетон в една по-деформируема композитна система с еднакви характеристики в цялото сечение, което позволява композита да поема по-големи опънни напрежения, в това число и при знакопроменливо натоварване, дори след процеса на пукнатинообразуване [Ростовски, Найденов, 2012]. Якостта на опън при огъване е една условна характеристика, която не може да разкрие сложеността на действие на натоварването и съответната реакция на материала. Поради това се налага изследване на множество други параметри, характеризиращи поведението на СВЯБ. В получените диаграми „натоварване-провисване“ и „натоварване-надлъжна деформация в опънна зона“ (виж гл. III т. 9.4.3 и 9.4.4) са формирани четири зони: зона на пропорционалност (до първа пукнатина), зона на уякчаване (до максимална достигната сила), зона на пластифициране (увеличена деформация при запазена носимоспособност) и зона на остатъчна носимоспособност (увеличаване на деформацията, за сметка на намалена носимоспособност), описват поведението на СВЯБ по време на целия период на натоварване на композита.

#### 3.2.1 Влияние на влакнестата армировка

##### 3.2.1.1 Стоманени влакна

Основен параметър, при изследване на якостно-деформационното поведение при влакнесто армираните композити със стоманени влакна, според ASTM C1018-97, е моментът на образуване на първа пукнатина. Това е точката от диаграмата, след която се наблюдава нелинейна зависимост между напреженията и деформациите, т.е. тя е началото на пукнатинообразуване в матрицата, което се изразява в развитието на пластични деформации. По коректен би бил терминът „псевнопластичен“, тъй като се разрушават определени макро- и микрообеми.



фиг. VI. 32: Работна диаграма 'натоварване-провисване' при СВЯБ, с използване на различни видове стоманени влакна

Наклонът на линейната част от кривата „натоварване-провисване“, който дава представа за Е-модула на материала, е приблизително еднакъв. Следователно се потвърждават тенденциите, установени при изпитването на Е-модула на натиск, че стоманените влакна, вложени в количество 2% по обем имат незначително влияние върху стойностите на Е-модула.

Зависимостта между натоварването и провисването остава почти линейна до сравнително високи стойности на натоварването: около 75% от максималното натоварване при състави с къси влакна и около 60% при състави с дълги влакна (фиг VI. 31), което потвърждава литературните данни, че зоната на еластичност при СВЯБ е значително по-дълга от тази при обикновените бетони (30-40%) и продължава практически до поемане на първата пукнатина. Разликата между съставите с къси и дълги влакна се дължи на факта, че при един и същи процент на армиране (2% по обем), съставите с къси влакна имат много по-голямо количество влакна в единица обем, с което те съдействат повече при разтоварването на матрицата, намаляване върховите напрежения в краищата на пукнатините (*crack tip*), както и премостването на микропукнатините. Това е и причината първата пукнатина да бъде регистрирана при по-висока стойност на натоварващата сила при съставите с къси влакна – фиг. VI. 32.

Въвеждането на 2% по обем стоманени влакна превръща крехката матрица в композитен материал с деформационно-уякчено (*strain-hardening*) поведение при огъване (виж гл. I. т. 5.1.3) – след появата на първа пукнатина натоварването продължава да нараства, като при това се наблюдава и по-голяма деформируемост, в резултат на възникване на множество микропукнатини, чийто макро-ефект е т.н. „пластифициране“. Развитието до критична стойност на пукнатините е възпепятствано от действието на влакната. Зоната между напрежението, съответстващо на появата на първа пукнатина (*first-cracking stress*) и максималното напрежение след нея (*max post-cracking stress*) е зона на деформационно-уякчаване, която е значително по-дълга при съставите с дълги влакна.

След зоната на уякчаване следва зона на пластифициране, което отговаря на интензивно пукнатинообразуване, при запазена носимоспособност. Тази зона е сравнително къса при изследваните състави, тъй като процента на армиране е малък, схемата на натоварване е триточково огъване, пробните тела са сравнително къси [Orgass, 2004; Empelmann, 2004; Grünewald, 2012; Bornemann, 2004]. Относително по-дълга е тази зона при съставите, армирани с дълги стоманени влакна, тъй като те са по-ефективни в премостването на възникнали пукнатини и запазване на носеща способност при нарастване на деформациите. При съставите с къси влакна тази зона практически липсва.

След зоната на пластифициране, следва зоната на загуба на носеща способност, съпроводена със значителни деформации, водещи до нарастване на провисването. Скоростта на загуба на носимоспособност (по-голяма съответно на по-стръмен падащ клон), е в пряка зависимост от вида и дължината на влакната. Гладките влакна при СВЯБ се изтръгват от матрицата поради малката закотвяща дължина, но използването на дълги влакна е по-благоприятно тъй като изисква повече енергия и следователно забавя процеса на разрушение, като осигурява по-големи деформации преди разрушаване.

При анализа на кривата „натоварване-провисване“ ( $F - \delta$ ) е важно да бъде установено при каква опитна постановка те са записани. Стандарта [ASTM 1609] изисква да стане при прилагане на постоянна скорост на деформациите (провисването), с което се избягват неточности от скокове при „саморазтоварване“ на матрицата, в резултат на пукнатинообразуването, което се забелязва при прилагане на натоварването с постоянна скорост. У нас, за съжаление, не разполагаме с подобна апаратура, адаптирана към изпитване на бетон и все още по-често се използва система за натоварване при постоянно нарастване на натоварването (виж гл. III т. 8.4.3).

Сравняването на резултатите, получени по двата метода, по отношение на стойностите на провисването, измерени при първа пукнатина и при максимално натоварване, показват задоволително съответствие – табл. VI. 20. И по двата метода на натоварване, провисването е около 25-35 пъти по-високо от това, специфицирано в стандарт ASTM C 1018 и ASTM 1609.

табл. VI. 20: Експериментално определяне на провисването на греди 40/40/160 mm, армирани със стоманени влакна, при натоварване на опън при огъване, реализирано съответно по сила и по деформации

Състав	Първа пукнатина		Максимална сила	
	Провисване, mm (натоварване по сила)	Провисване, mm (натоварване по деформации)	Провисване, mm (натоварване по сила)	Провисване, mm (натоварване по деформации)
къси стом.вл.	0,26	0,25	0,31	0,39
дълги ст.вл.	0,46	0,23	0,56	0,68
къси+дълги ст.вл.	0,24	0,31	0,26	0,52

Анализът на кривите „натоварване-надлъжна деформация в опънна зона” ( $F - \epsilon$ ), като цяло потвърждават изводите от диаграмите  $F - \delta$  - фиг. VI 33:

- поведението на матрицата е крехко, от типа „деформационно-облекчено” (виж гл. I. т. 5.1.3);
- до появата на първа пукнатина поведението е предимно линейно-еластично;
- модулът на еластичност се влияе малко от наличието на влакнеста армировка;
- по-големият принос на дългите влакна за деформационно-уякченото поведение на огъване се дължи на способността им да прододвратяват разтварянето на пукнатините и да дисипират енергия посредством триене между влакната и матрицата, тъй като контактната им площ е по-голяма от тази на късите влакна. Коефициентът *FIER* (*fiber intrinsic effective ratio*)[Naaman, 2003], който дава връзка между околната повърхнина на влакното отнесена към напречното сечение, при кръгли влакна, се изчислява по следния начин:

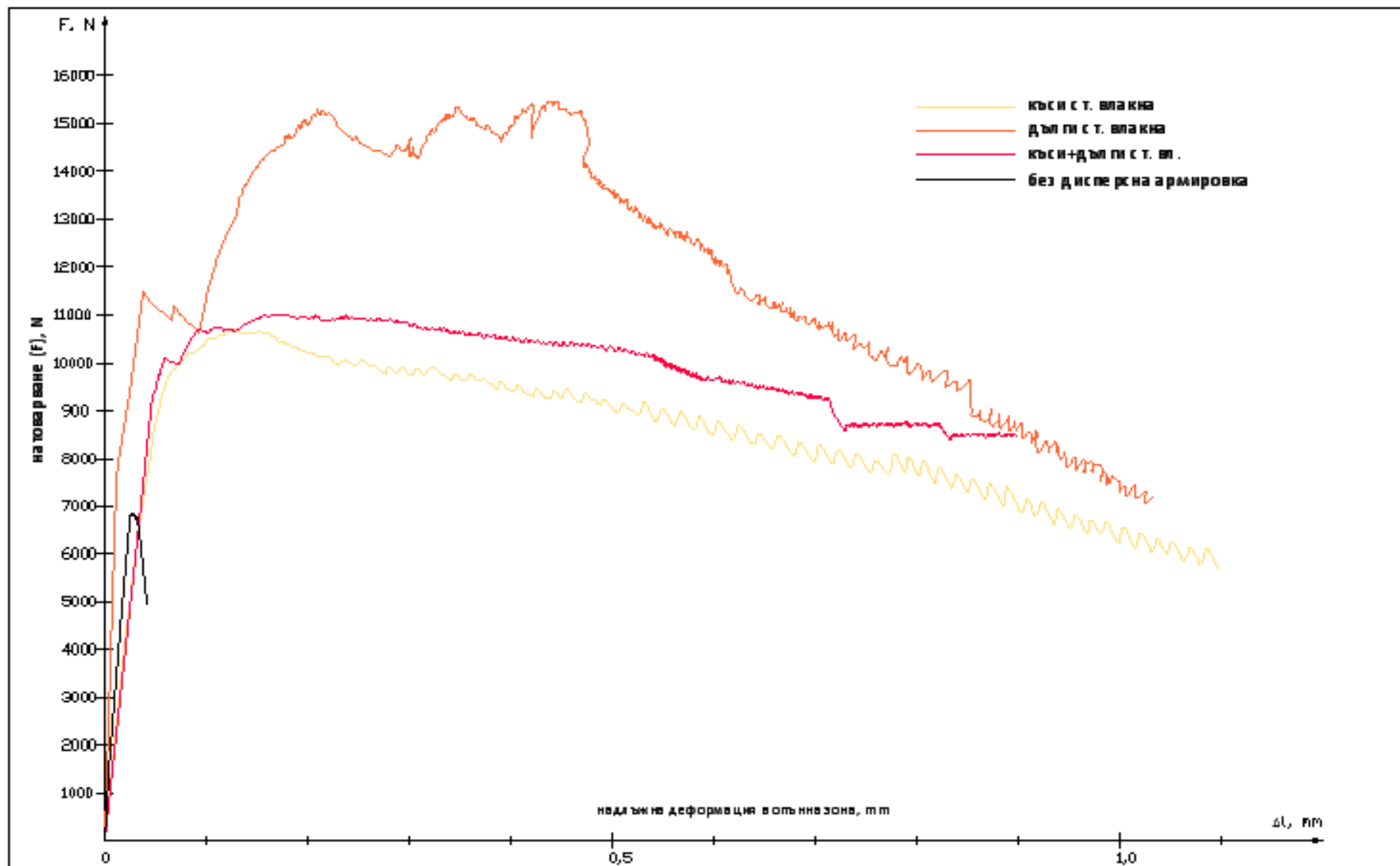
$$FIER = \frac{1}{4} \cdot \frac{L}{D}$$

където:

$L$  е дължина на влакно, mm;

$D$  е диаметър на влакно, mm,

По този начин дългите фибри имат  $FIER=16,250$ , а късите 8,571. Въпреки, че бройката на късите влакна е с 40% по-голяма от тази на дългите, общата контактна площ при дългите влакна е по-голяма. Използването на комбинация от два вида стоманени влакна не води до различия в началния еластичен период в сравнение с отделното използване на двата вида стоманени влакна.



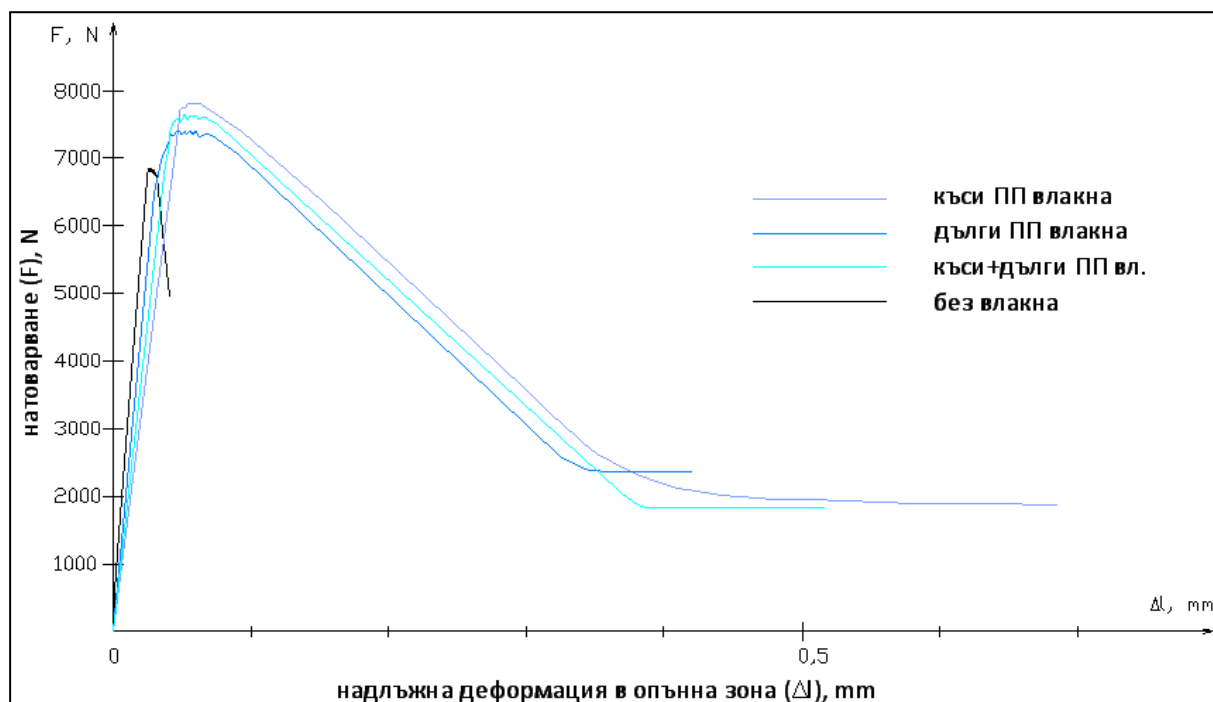
фиг. VI. 33: Работна диаграма 'натоварване-надлъжна деформация' в опънна зона при СВЯБ, с използване на различни видове стоманени влакна

## 3.2.1.1 Микрополипропиленови влакна

Не се потвърждават преположенията на Vornemann, че якостта на опън при огъване при използване на ПП влакна е по-малка отколкото при матрицата на СВЯБ [Vornemann, 2004]. Няма крехко поведение на материала, а се наблюдава както зона на деформационно уякчаване, така и падащ клон на диаграмата – фиг. VI. 34. Ефектът от ПП влакна се проявява в слабо повишената деформативност на композитите, в сравнение с матрицата и е толкова относително по-изразен, колкото влакната са по-дълги или съдържанието на влакната е по-голямо.

Тази деформативност може да се обясни с вида на диаграмата  $F - \varepsilon$ :

- Е-модулът на композита е по-нисък;
- Има известно пластифициране, което показва, че микроПП влакна са в състояние да съдействат за образуването на множество микропукнатини (*multiple cracking*), с размери под критичните – на това се дължи площадката, отговаряща на максимална сила, при която деформациите нарастват без загуба на носимоспособност.
- Падащият клон на кривата е също много по-плавен от този на матрицата, което показва известен дисипиращ ефект на микроПП влакна, при развитие на пукнатините.



фиг. VI. 34: Работна диаграма 'натоварване-надлъжна деформация в опънна зона' при СВЯБ, с използване на различни видове полипропиленови влакна

Интересът от употребата на микроПП влакна в СВЯБ с друг - прилагането им се свързва с подобряване на други свойства на материала, като съсъхване, пукнатинообразуване, изтриваемост, огнеустойчивост, водопропускливост и др.

### 3.2.1.1 Хибридна армировка

Използването на хибридна армировка няма синергетичен ефект върху – фиг. VI. 35. Получените резултати не потвърждават изследванията на *Singh*, според които използването на хибридна армировка от стоманени и микроПП влакна дава по-добри резултати от поотделното влагане на всяка една от тях [Singh, 2010]. Преобладаващо е влиянието на стоманените влакна. Получените диаграми имат характер, наподобяващ поведението на композитите армирани със стоманени влакна, но първата пукнатина възниква при по-ниски стойности на натоварването и респективно провисването е по-малко. Макар и с минимална разлика, провисването, отговарящо на максималния товар също е по-ниско, в сравнение със съставите, армирани само със стоманени влакна. Очевидно ПП компонента води до намаляване на коравината на СВЯБ.

Дължината на зоната на деформационно уякчаване е по-къса, като разликата е съществена при съставите, армирани с дълги влакна. За сметка на това, при тях е по-дълга зоната на пластифициране. Ефектът се дължи вероятно на изтръгването на ПП влакна в зоната на максимално натоварване и разтоварване на пукнатините.

След изтръгването на влакната се отчита рязък спад в коравината на елемента, водещ до загуба на носимоспособност (много силно изразен при състава с къси влакна), след който, благодарение на стоманените влакна се запазва плавният характер на падащия клон на диаграмата ' $F - \delta$ ' - фиг. VI. 35 и се предодврътвява внезапното разрушение. Като цяло съставът с дълги влакна има много по-дуктилно поведение.

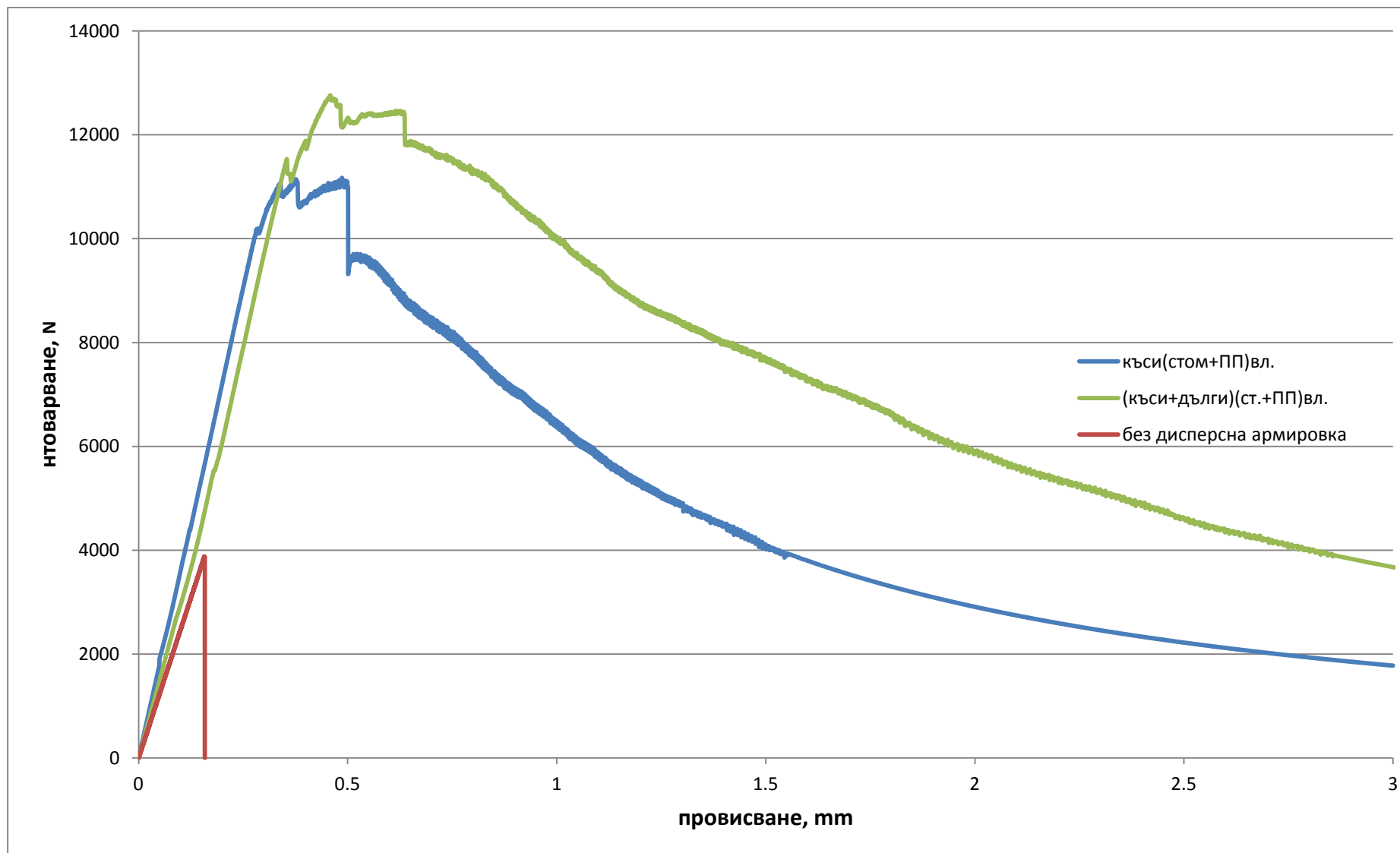
От диаграмата ' $F - \epsilon$ ' (фиг. VI. 36) се потвърждава, че поведението на влакнесто-армирания СВЯБ е далеч от това на идеално-пластичен материал, моделиран по *EuroCode2* за бетон – влакната дават както много по-дълга зона на еластично поведение, така и спомагат за преодоляване на рязката загуба на носимоспособност, заради което при обикновения бетон се налагат да се понижат значително допустимите работни напрежения (виж гл. I т. 5.4.1.1.4). Същевременно, при увеличаване на процента на армиране, може да се очаква значителна зона на пластифициране от загубата на носимоспособност.

Сравняването на резултатите от двата използвани подхода (табл. VI. 21), потвърждава подходящия избор на параметрите на опитната постановка, при контролиране на скоростта по сила на натоварване и по деформация. При липса на лабораторно оборудване по затоварване по деформации, може да бъде прилаган метода по сила.

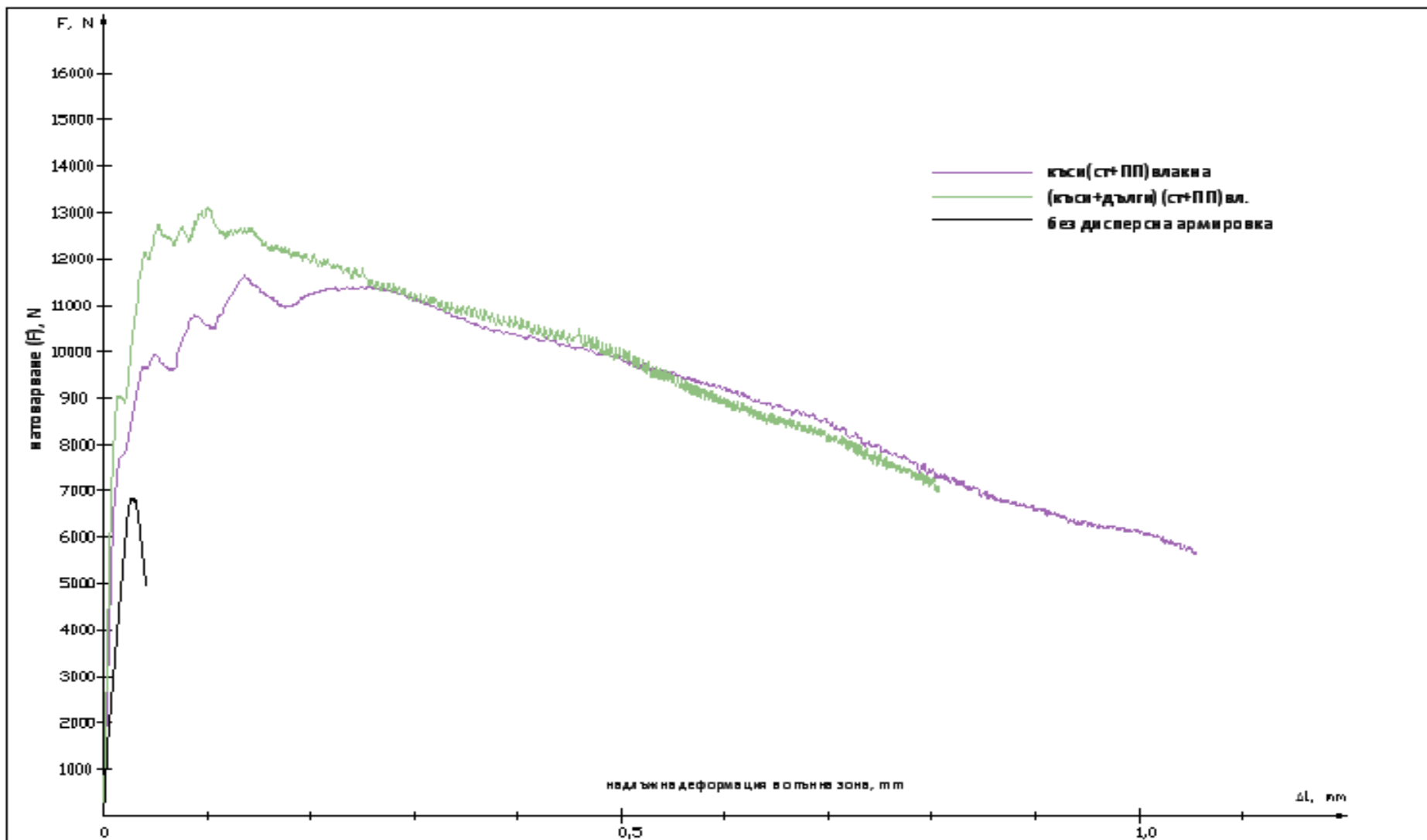
табл. VI. 21: Експериментално определяне на провисването на греди 40/40/160 mm, армирани със стоманени влакна, при натоварване на опън при огъване, реализирано съответно по сила и по деформации

Състав	Първа пукнатина		Максимална сила	
	Провисване, mm (натоварване по сила)	Провисване, mm (натоварване по деформации)	Провисване, mm (натоварване по сила)	Провисване, mm (натоварване по деформации)
къси(ст.+ПП)вл.	0,20	0,27	0,24	0,49
(къси+дълги)(ст.+ПП)вл.	0,22	0,35	0,27	0,47





фиг. VI. 35: Работна диаграма 'натоварване-провисване' при СВЯБ, с използване на хибридна армировка

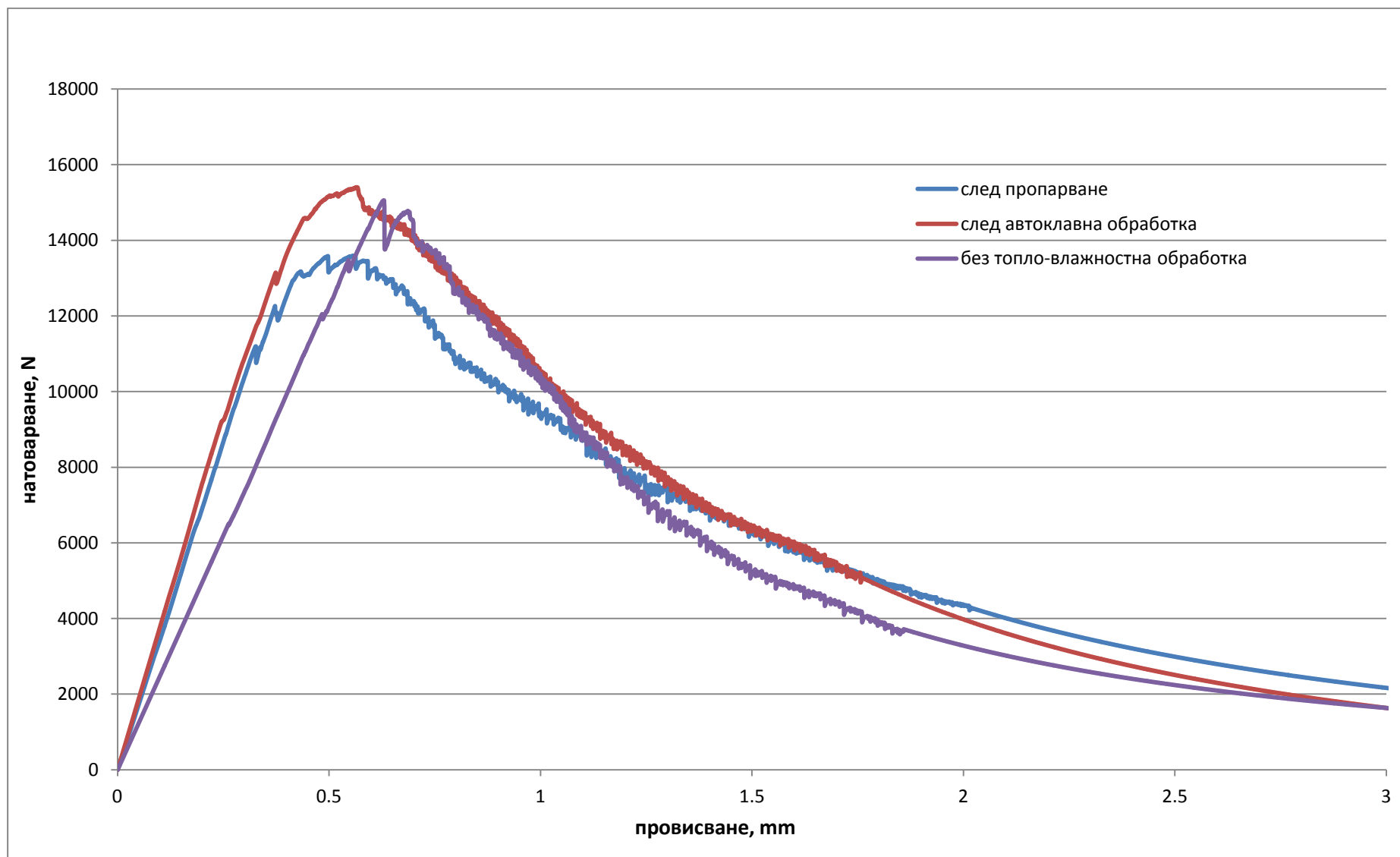


фиг. VI. 36: Работна диаграма 'натоварване-надлъжна деформация' в огънна зона при СВЯБ, с използване на различни видове стоманени и полипропиленови влакна

### 3.2.2 Влияние на технологичните параметри (топло-влажностна обработка - пропарване и автоклавиране)

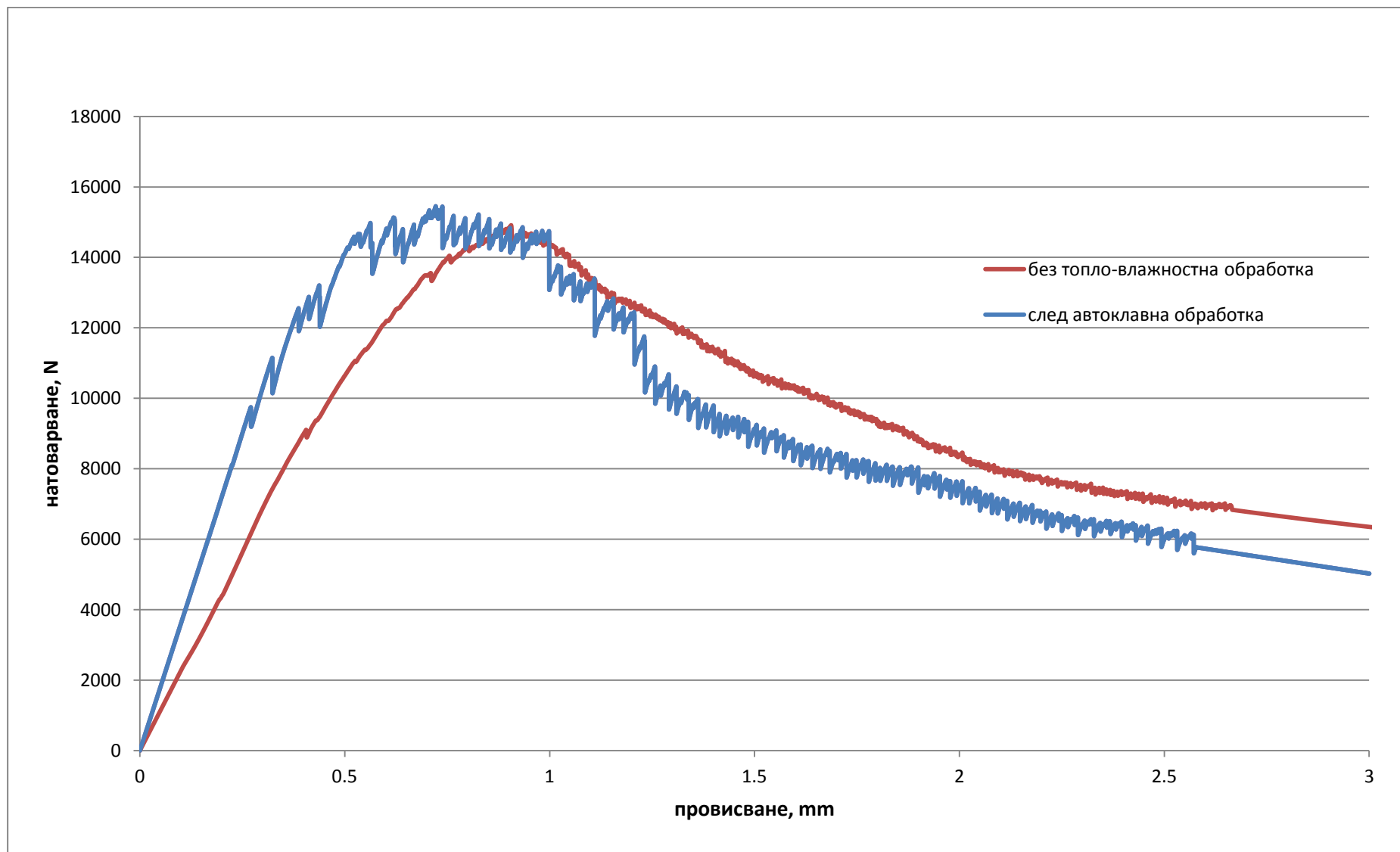
Очаквано, топло-влажностната обработка създава по-малка деформируема структура на бетона, с по-силно изразена крехкост – фиг. VI. 37. Третираните състави имат по-висок Е-модул (виж гл. VI. т. 1.2.1.2). Това обяснява по-малкия наклон на линейния участък в диаграмата 'натоварване-провисване', както и появата на първа пукнатина при по-малко провисване. След момент на първа пукнатина следва продължителен период на изтръгване на стоманените влакна от матрицата. Това води до деформационно-уякчаване на материала и на интензивно пукнатинообразуване при увеличаване на деформацията. Наблюдава се значително по-широка зона на пластифициране, при обработените образци, с по-плавно преминаване към падащ клон на диаграмата. Този ефект се дължи на топло-влажностната обработка на състава, довела до по-добро сцепление между високоякоостната матрица и късите стоманени влакна (виж гл. V т. 4.2.2). Сравняването на двата вида топло-влажностни обработки показва по-силно влияние на автоклавната обработка от гледна точка на по-дългия еластичен стадий и по-силно изразената уякчена зона, но след автоклавна обработка е относително по-къс участъкът на пластифициране. Все пак, топло-влажностна обработка има съществен пронос в увеличаване на зоната на пластифициране на третираните образци, в сравнение с нетретираните.

Подлагането на състава с дълги стоманени влакна на топло-влажностна обработка предизвиква аналогичен резултат както при късите влакна (фиг. VI. 38). Модулът на еластичност се покачва, поради увеличаване на коравината след третиране. Това се дължи на образуването по-голямо количество CSH гел [Neville, 2002] от една страна и от друга подобрената контактна зона между матрицата и влакната. Появата на първите пукнатини в матрицата от натоварване настъпват при една и съща приложена сила, но нивото на деформиране е с 35% по-малко след топло-влажностна обработката. Периодът на деформационно уякчаване не се различава значително при двата разглеждани състава, но изтръгването на влакната е много по-отчетливо.



фиг. VI. 37: Работна диаграма 'натоварване-провисване' на СВЯБ с къси стоманени влакна, подложен на различни топло-влажностни обработки

Именно в този контекст е направено допълнително сравнение между съставите с къси и дълги стоманени влакна, вложени отделно в матрицата (фиг. VI. 38). Установено е че, модулът на еластичност на СВЯБ след топло-влажностна обработка не се влияе от вида на стоманените влакна – тъй като на този стадий на натоварване влакнестата армировка играе роля предимно на високоякоостен „пълнител“, с обемно съдържание от 2% (виж гл. VI. т. 1.2.1). Началният праволинеен участък на диаграмата ‘натоварване-провисване’ напълно съвпада и при двата разглеждани състава. Топло-влажностната обработка оказва влияние върху матрицата и заздравяване контактната зона, независимо от геометричните размери на стоманената армировка. По-големият брой, обаче, на късите стоманени фибри в целия обем по-дълго възпрепятства образуването на микропукнатини в него, с което се увеличава еластичната зона. Следователно, използването им би било подходящо за предварително изготвени елементи, които имат изискване за по-висока граница на пукнатиноустойчивост. Впоследствие, премостването на образуващите се микропукнатини е значително по-трудно постижимо с късите фибри и формираните макропукнатини, не може да бъдат възпрепятствани поради малката им закотвяща дължина. Докато при дългите стоманени влакна, по-ранното формиране на първата макропукнатина се компенсира с по-голям деформационно уякчен период. След достигане на максималната сила, зоната на пластифициране на късите стоманени влакна практически липсва, докато тя е силно изразена при съставите с дълги влакна. Енергията, необходима за изтръгването на дългите влакна е достатъчно голяма и определя дуктилното им поведение. Падащият клон на диаграмите при двата състава има сходен характер.



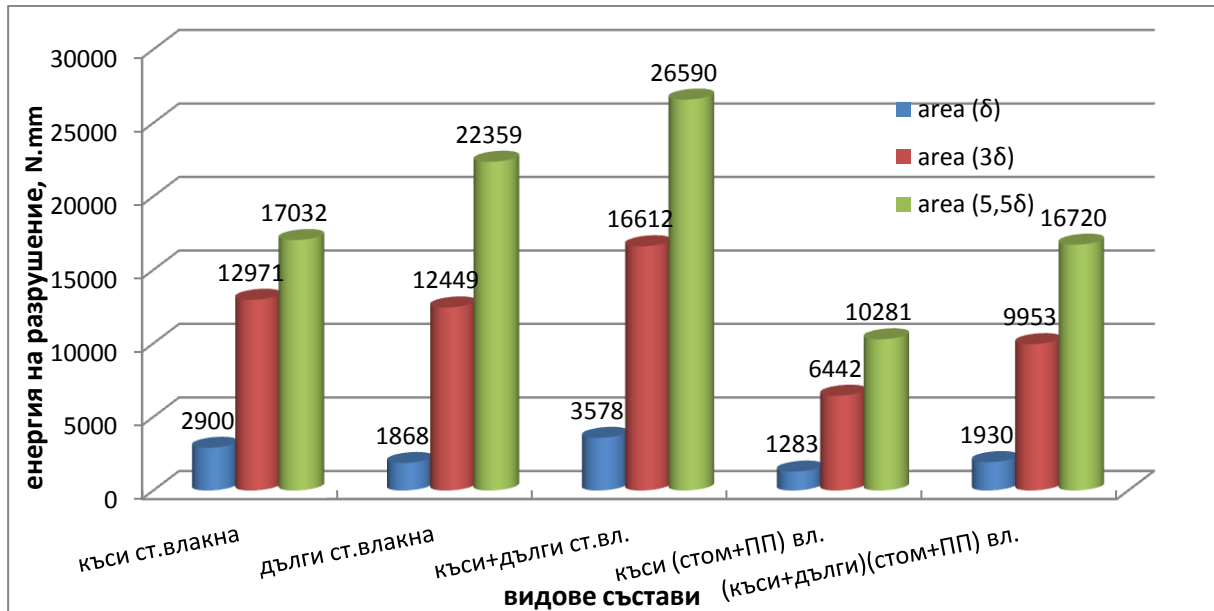
фиг. VI. 38: Работна диаграма 'натоварване-провисване' на СВЯБ с дълги стоманени влакна, подложена автоклавна обработка

### 3.3 Енергия на разрушението

#### 3.1.1 Влияние на вида на влакнестата армировка

##### 3.3.1.1 Според провисването при първа пукнатина

Резултатите от изчислената енергия на разрушението по методиката на ASTM C1018-97 и ASTM C 1609/C 1609M-10 (2010), базиращи се на провисването реализирано при първата пукнатина, са показани на фиг. VI. 39.



фиг. VI. 39: Влияние на вида дисперсната армировка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според ASTM C1018-97

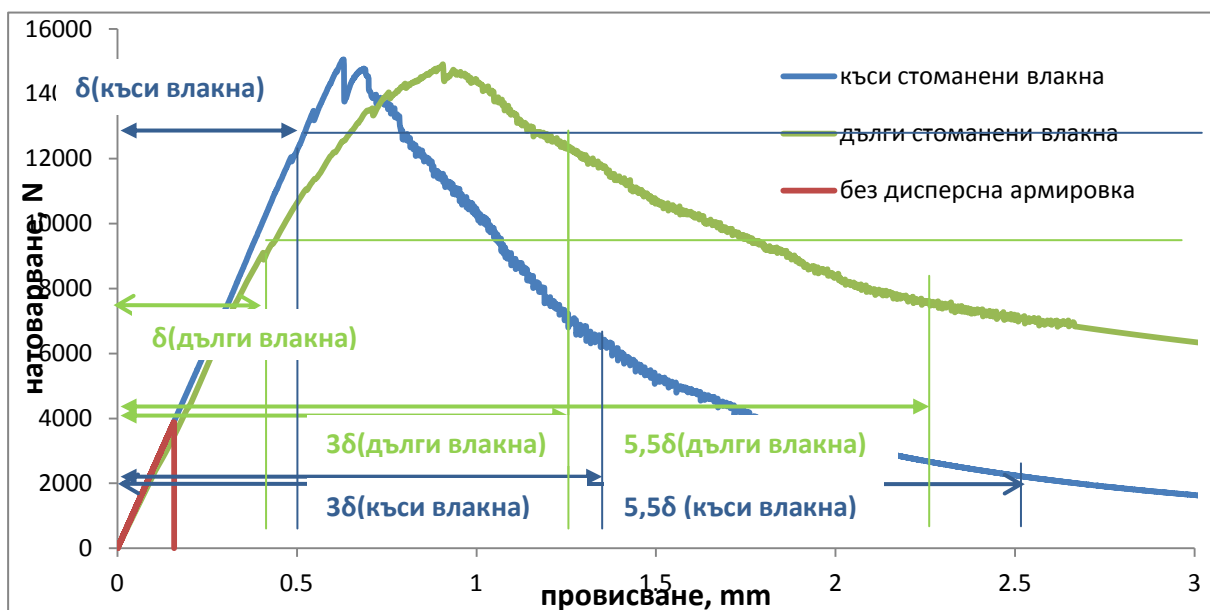
Стойностите на енергията на разрушение ( $G_f$ ) потвърждават наблюдението, че късите влакна съдействат в по-голяма степен (поради по-големия си брой в единица обем) за разтоварването на матрицата и така първата пукнатина се появява при по-високи стойности на напрежението, в сравнение с тази при армираните с дълги влакна композити. Получената стойност за  $G_f$  при първа пукнатина, т.е.  $G_f(\delta)$  е с над 50% по-висока при композитите, армирани с къси влакна, в сравнение със състава с дълги стоманени влакна.

$G_f(3\delta)$  отразява поведението на зоните на деформационно-уякчаване, пластифициране и дори, в случая, на частична загуба на носимоспособност. Т.е.  $G_f(3\delta)$  е по-обобщена характеристика, което маскира различията на влакната (къси и дълги) в отделните зони. По тази причина,  $G_f(3\delta)$  има приблизително еднакви стойности при съставите с къси и дълги влакна. Според ASTM C1018-97, реализираната деформация от  $3\delta$  при обикновените дисперсно-армирани композити, попада в зоната на пластифициране. При СВЯБ, дори с използване на дълги стоманени влакна, тя е отчетена в падащия клон на диаграмата. Следователно, това не е подходяща характеристика за класифициране поведението на СВЯБ.

$G_f(5,5\delta)$  отразява в по-голяма степен приноса на влакната за възпрепятстване на внезапното разрушение и затова, очаквано, тя има с 30% по-високи стойности, при състави с дълги влакна. Съставите с хибридна армировка имат много по-ниска енергия на разрушение, но и тя показва нарастване с влагане на дълги стоманени влакна.

И трите изчислителни стойности на енергията на разрушение, обаче, показват, че комбинирането на къси и дълги влакна има синергетичен ефект – при тази комбинация е необходима повече енергия, както за възникване на първа пукнатина  $G_f(\delta)$ , така и за уякчаване и пластифициране на материала ( $G_f(3\delta)$ ), както и за пиковото разрушаване  $G_f(5,5\delta)$ .

Влагането на къси влакна повишава пукнатиноустойчивостта на матрицата. Първата пукнатина настъпва при по-голяма деформация, с което  $G_f$  отчита по-високи стойности – фиг. VI. 40. В последствие обаче, използването само на дълги влакна очаквано има по-голям принос към якостно-деформационното поведение и реализираното деформационно уякчаване. Нараства носещата способност на композита, с развитие на по-големи пластични деформации, в сравнение със състава само с къси влакна. По този начин енергията на разрушение определена до деформацията от  $3\delta$ , обхваща по-голяма част от падащия клон на диаграмата.

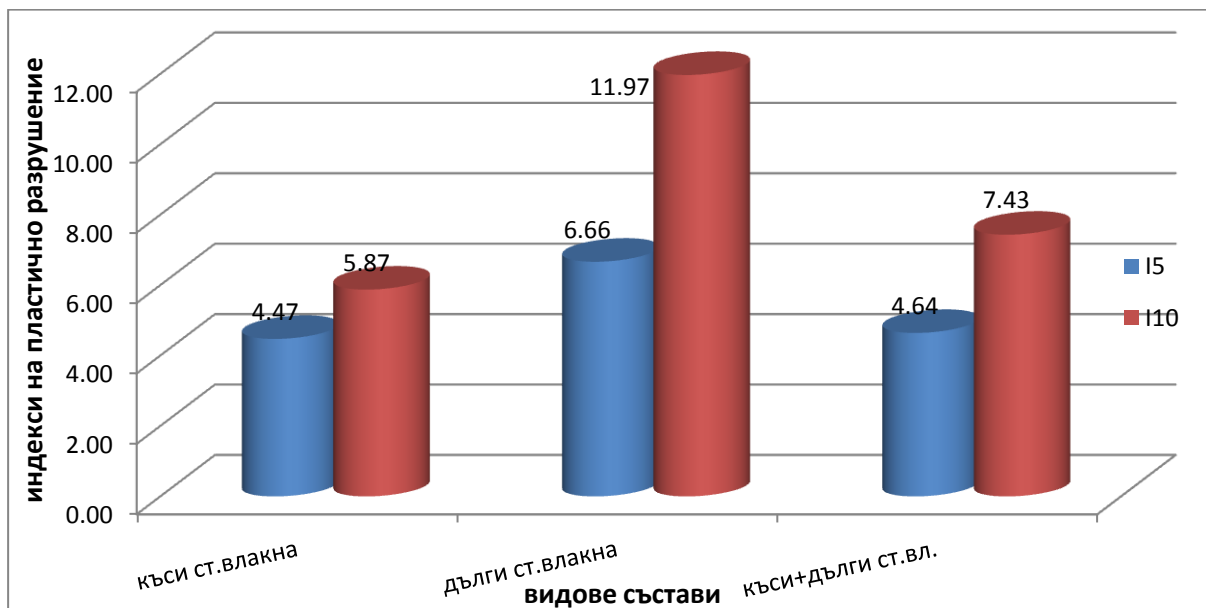


фиг. VI. 40: Работна диаграма 'натоварване-провисване' при СВЯБ с къси и с дълги влакна, с отчитане на основните й характеристики според ASTM C1018-97

Индексите на пластично разрушение (индекси на жилавост), които според ASTM C1018-97 са представителни за описание на поведението на влакнесто-армирани композити, характерни за еласто-пластичното поведение, потвърждават направените изводи, че дългите стоманени влакна имат по-значим принос за дуктилното поведение на СВЯБ. Индексът  $I_5$  и  $I_{10}$  са значително по-високи. Фактът обаче, че  $I_5$  има стойност над 5 и  $I_{10}$  има стойност над 10, за съставите с дълги влакна, е показателен за зоната на деформационно уякчаване, което отличава поведението на СВЯБ от модела на идеален еласто-пластичен материал, за които са дефинирани максимални стойности на  $I_5=5$  и  $I_{10}=10$ .

Индексът  $I_{10}$  обикновено отчита проноса на зоната на пластични деформации и има стойности от 1 до 10: едно отчита изцяло крехко разрушение, а 10 отговаря на материал с пластично поведение, след максималната сила. При дългите влакна този индекс е 12, което въпреки че се дължи предимно на деформационното уякчаване, показва и по-големите пластични деформации при тези състави – фиг. VI. 41. Превिшаването на горната граница на идеално пластично поведение се среща и при [Graybeal, 2005].

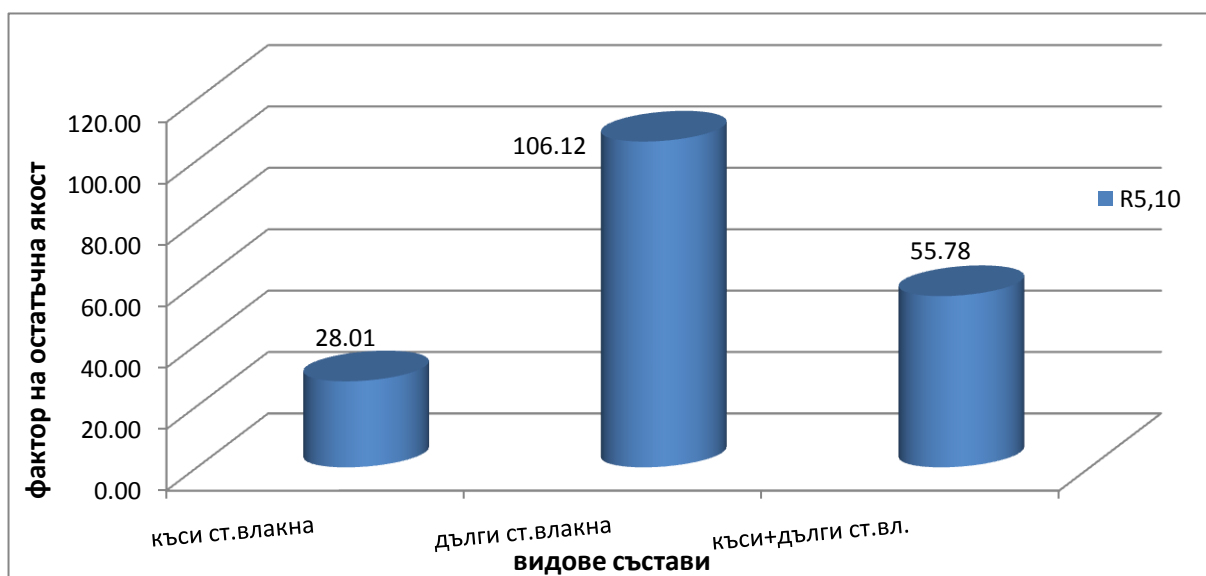




фиг. VI. 41: Влияние на вида дисперсната армировка върху индексите на пластично разрушение на СВЯБ, според ASTM C1018-97

Факторът на остатъчна якост  $R_{5,10}$  е показателен за това колко бързо се губи носимоспособност след достигане на максимална сила – по-високите стойности на  $R_{5,10}$  са индикатор за по-дуктилно поведение – загубата на носимоспособност е постепенна и съпроводена с развитие на пластини деформации – в случая на СВЯБ – с интензивно микропукнатинообразуване, разтваряне на пукнатини и изтръгване на влакната – т.е на дисипация на енергия.

Оказва се, че по-близко до дуктилното поведение е това на СВЯБ, армиран с дълги влакна. При тях дори  $R_{5,10}$  надвишава 100, което показва, че материалът не е с идеално-пластино поведение, а има „резервна носимоспособност“, дължаща се на зоната на деформационно-уякване.



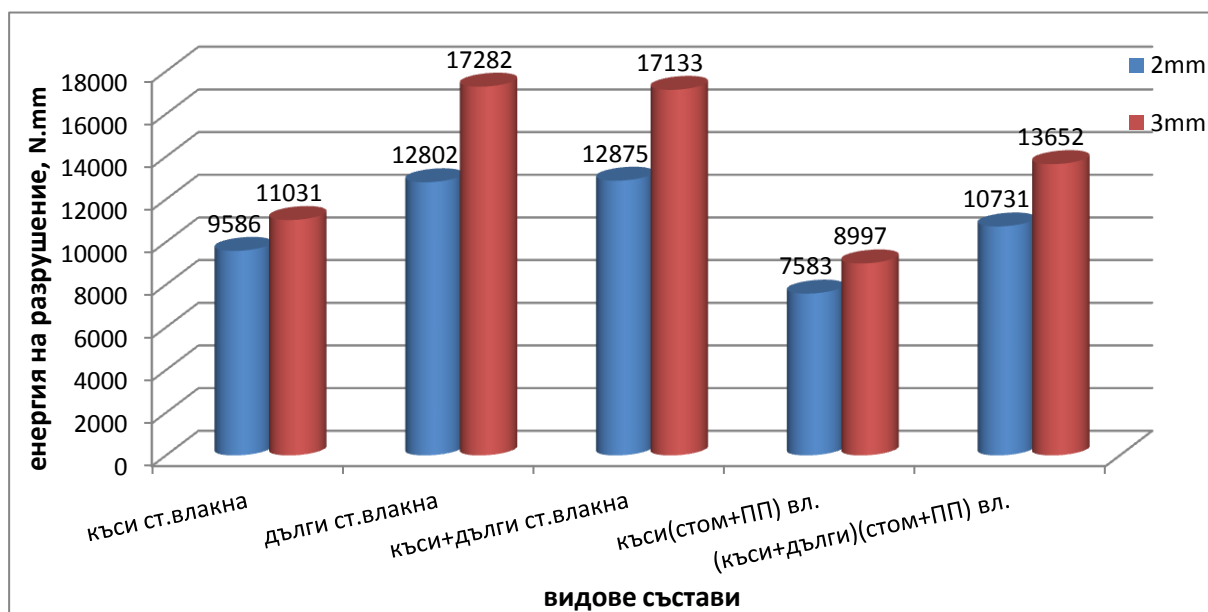
фиг. VI. 42: Влияние на вида дисперсната армировка върху фактора на остатъчна якост на СВЯБ, според ASTM C1018-97

Факторът на остатъчна якост на състава с къси влакна е значително по-нисък ( $R_{5,10} = 28$ ), което предполага, че такъв тип състави не следва да се използват при елементи, предназначени за моёмане на земетръсни въздействия на принципа на формиране на пластични стави.

$R_{5,10}$  на състава с къси и дълги влакна има междинна стойност (55,78), което не показва синергетичен ефект върху остатъчната носимоспособност.

### 3.3.1.2 При фиксирано максимално провисване

Анализът на резултатите за енергията на разрушение, изчислена по препоръките на RILEM 50-FMC, на база на фиксирано максимално провисване потвърждават резултатите, получени с прилагането на първия подход – дългите влакна водят до значително повишаване на енергията на разрушение, необходима за реализиране на определени деформации (провисване). Интересно е да се отбележе техният ефект, свързан с нарастване на частта на  $G_f$ , необходима за реализиране на провисване от 2 mm, в зоната на падащия клон на диаграмата. Тя е повече от два пъти по-голяма (33-35%), отколкото при съставите с къси влакна (15%). Тази тенденция се запазва, дори при понижена коравина, какъвто е случаят с въвеждане на микроПП влакна (хибридна армировка) – фиг. VI. 43.



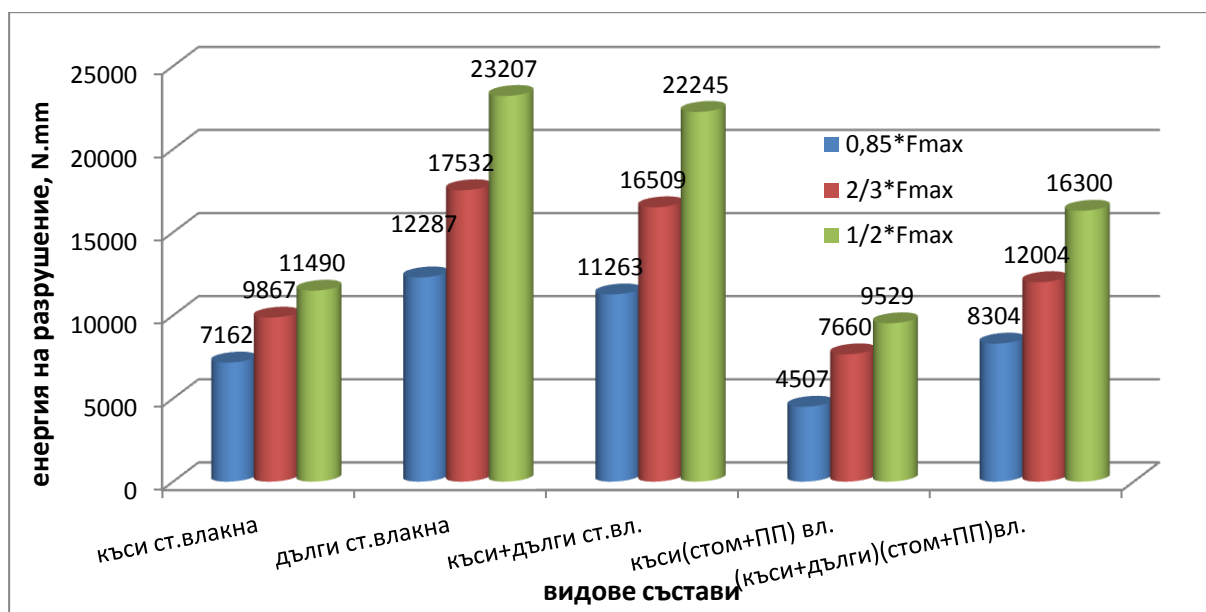
фиг. VI. 43: Влияние на вида дисперсната армировка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според RILEM 50-FMC

Следователно, дългите влакна биха имали по-съществен принос в критичен момент на разрушението – не биха позволили бързо разрушение, в резултат на лавинообразно нарастване на деформациите.

### 3.3.1.3 При фиксирана остатъчна носимоспособност

Резултатите, получени при използването на предишните два подхода се потвърждават и при отчитането на остатъчната носимоспособност – фиг. VI. 44.  $G_f$ , необходима за частично разрушение на композита (до  $0,85 F_{max}$ ;  $2/3 F_{max}$  и  $1/2 F_{max}$ ), е най-голям при съставите, съдържащи дълги стоманени влакна. Колкото по-голям е техният дял, толкова  $G_f$  е по-висока.

Освен абсолютните стойности на  $G_f$ , важно е да се отчете и частта от  $G_f$ , която се изразходва допълнително за загуба на носимоспособност – от 0,85%  $F_{max}$  до 2/3  $F_{max}$  и от 2/3  $F_{max}$  до 1/2  $F_{max}$ . При използването на дълги влакна, във всички състави, тези стойности са между 43% и 46% и съответно между 32% и 35% от  $G_f$ , изразходена на предното стъпало на остатъчна якост. Това показва огромен потенциал на тези състави да запазват носимоспособност след започнал процес на разрушение. При съставите с къси стоманени влакна, тези стойности са съответно 38% и 16%.

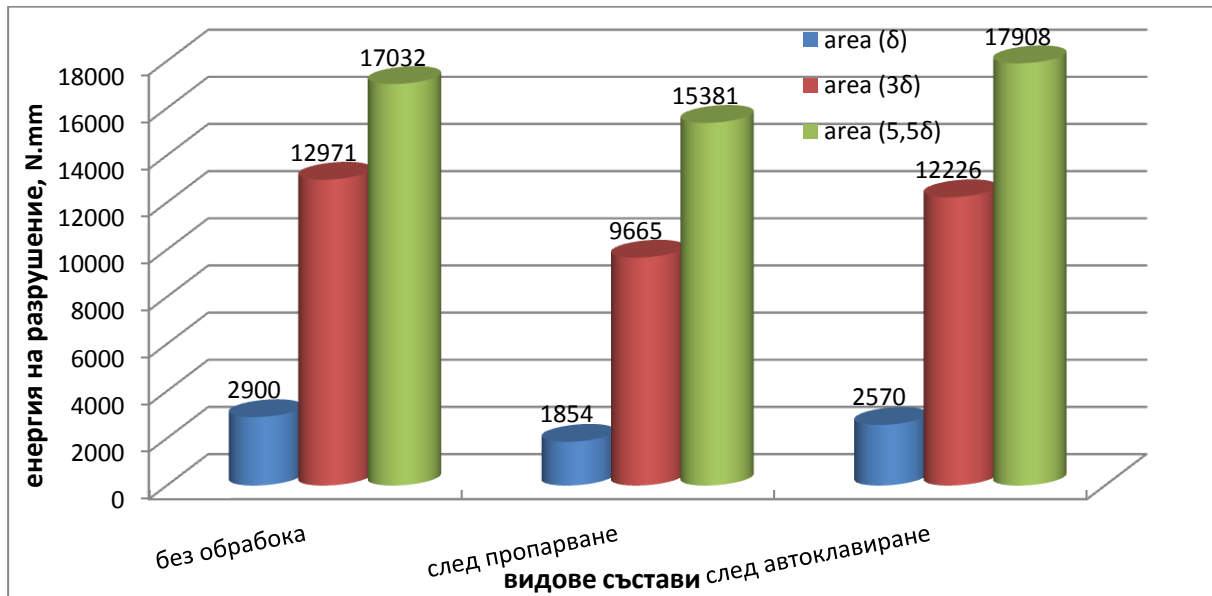


фиг. VI. 44: Влияние на вида дисперсната армировка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според фиксирана остатъчна носимоспособност

Определянето на енергията на разрушение и чрез трите използвани подхода дава близки резултати. При използването в стандарта ASTM C1018-97 обаче, може да бъдат изчислени различни параметри, които позволяват да се оцени приноса на дисперсната армировка върху различните деформационни зони на поведението на СВЯБ при огъване. От разгледаните комбинации от влакна, влагането на къси стоманени фибри увеличава границата на пукнатинуостойчивост, докато дългите стоманени влакна създават едновременно по-дуктилно поведение на композита и увеличена остатъчна носимоспособност на композита. Използването на хибридна армировка не е оправдано от гледна точка подобряване на якостно-деформационното поведение.

### 3.3.2. Влияние на технологичните параметри (пропарване и автоклавиране)

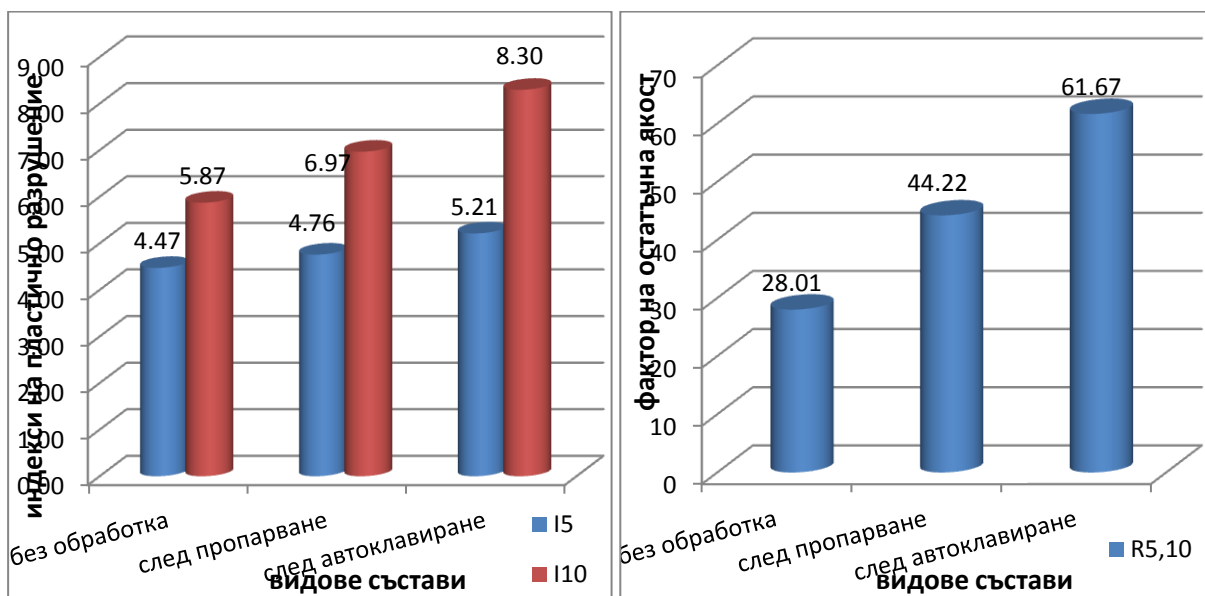
Енергията на разрушение остава почти еднаква, при различните състави – без обработка, след пропарване и след автоклавиране фиг. VI. 45. Получената по-малка деформация при появата на първата пукнатина рефлектира на по-малка изчислителна площ на енергията на разрушение. Впоследствие по-силно изразената зона на уякчаване и пластифициране на третираните проби компенсирани по-малките стойности на провисване (до 3δ и 5,5δ) до която се изчислява  $G_f$ , с което площите се изравняват и дори надвишават тези на състава без топло-влажностна обработка.



фиг. VI. 45: Влияние на вида на топло-влажностната обработка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според ASTM C1018-97, армиран с къси стоманени влакна

Приносът на дисперсната армировка остава не явно изразен върху  $G_f$ . Използването на индексите на пластично разрушение, особено  $I_{10}$ , дава по-добра представа за ролята на топло-влажностната обработка за постигане на по-голяма зона на пластифициране, поради подобреното сцепление на влакната с матрицата и необходимост от повече енергия за изтръгването им фиг. VI. 46-а.

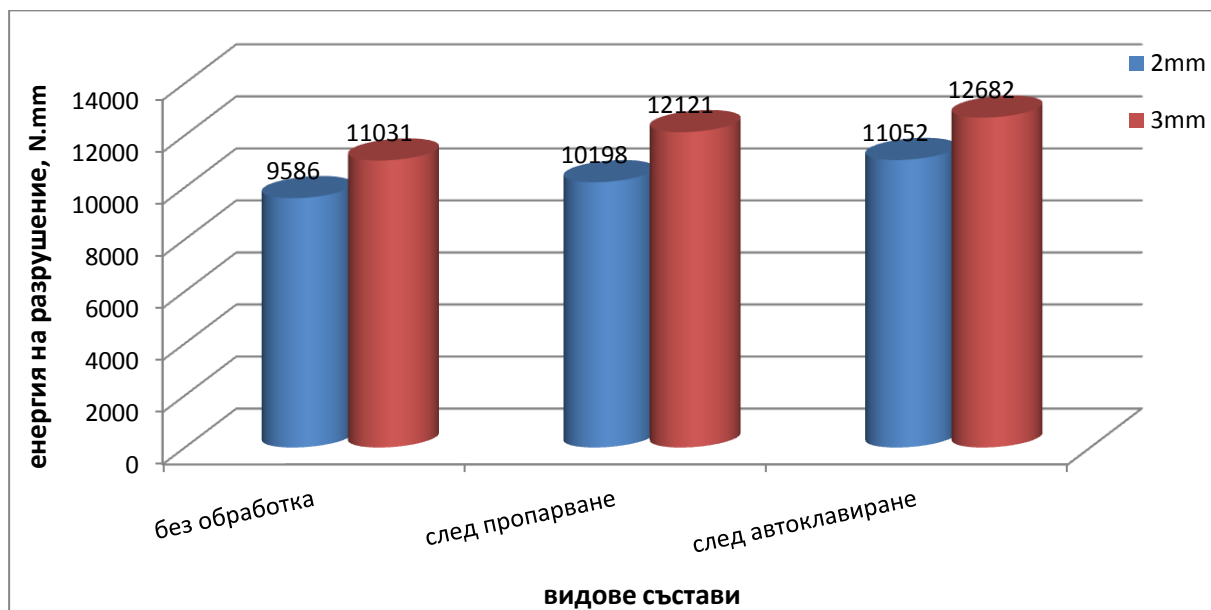
Факторът на остатъчна якост също позволява по-отчетливо да се види ефекта от топло-влажностната обработка върху постепенната загуба на носимоспособност, дуктилното поведение на третирани образци фиг. VI. 46-б. Подобно на резултатите, за якостните свойства, ефектът от автоклавирането е по-силно изразен.



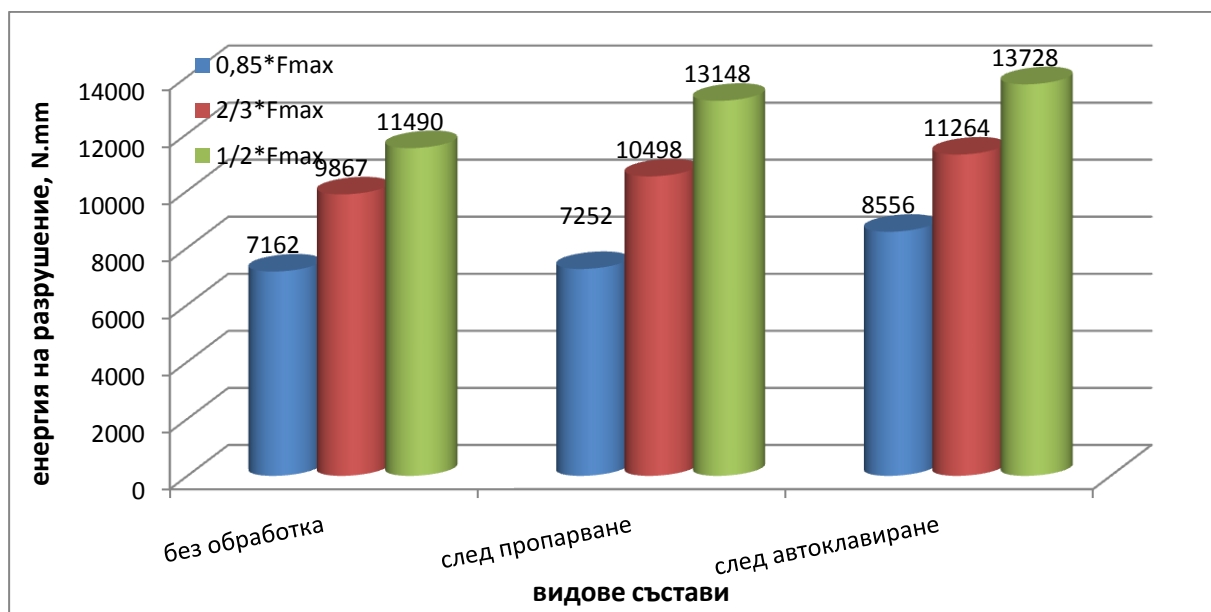
фиг. VI. 46: Влияние на вида на топло-влажностната обработка на СВЯБ, армиран с къси стоманени влакна, върху

а) индексите на пластично разрушение според ASTM C1018-97      б) фактора на остатъчна якост според ASTM C1018-97

Подобни резултати, за ефекта на топло-влажностната обработка върху енергията на разрушение, се получават и при прилагането на другите два подхода за изчисляването ѝ - фиг. VI. 47 и фиг. VI. 48. Все пак, според изчислената енергия на разрушение, на база на максималното фиксирано провисване, приносът на пропарването е от 6% (при деформация от 2 mm) и до 10% (при деформация от 3 mm), а на автоклавирането 15% и до двете реализирани деформации. Още по-добро диференциране на третирани от нетретирани образци, дава методът на остатъчната носимоспособност – след автоклавиране осатъчните деформации до  $0,85 F_{max}$ ;  $2/3 F_{max}$  и  $1/2 F_{max}$  се покачват съответно с 19%; 14% и 20%, докато след пропарване нарастването е съответно с 9%; 6% и 14%.



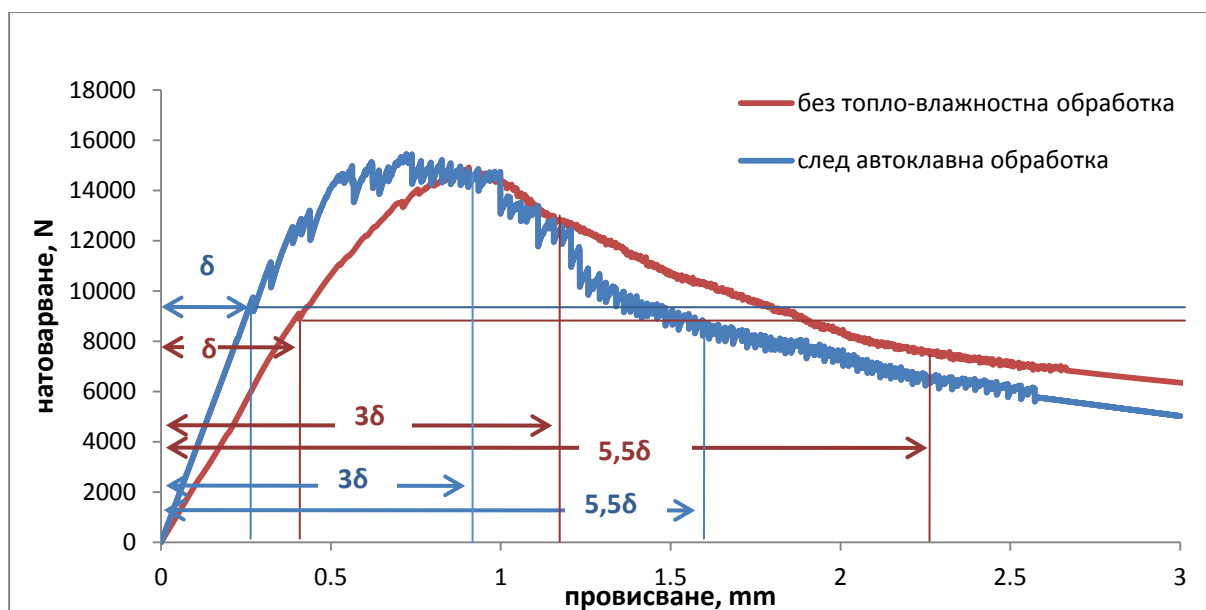
фиг. VI. 47: Влияние на вида на топло-влажностната обработка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според RILEM 50-FMC, армиран с къси стоманени влакна



фиг. VI. 48: Влияние на вида на топло-влажностната обработка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според фиксирана остатъчна носимоспособност, армиран с къси стоманени влакна

### 3.3.2.2 При дълги стоманени влакна

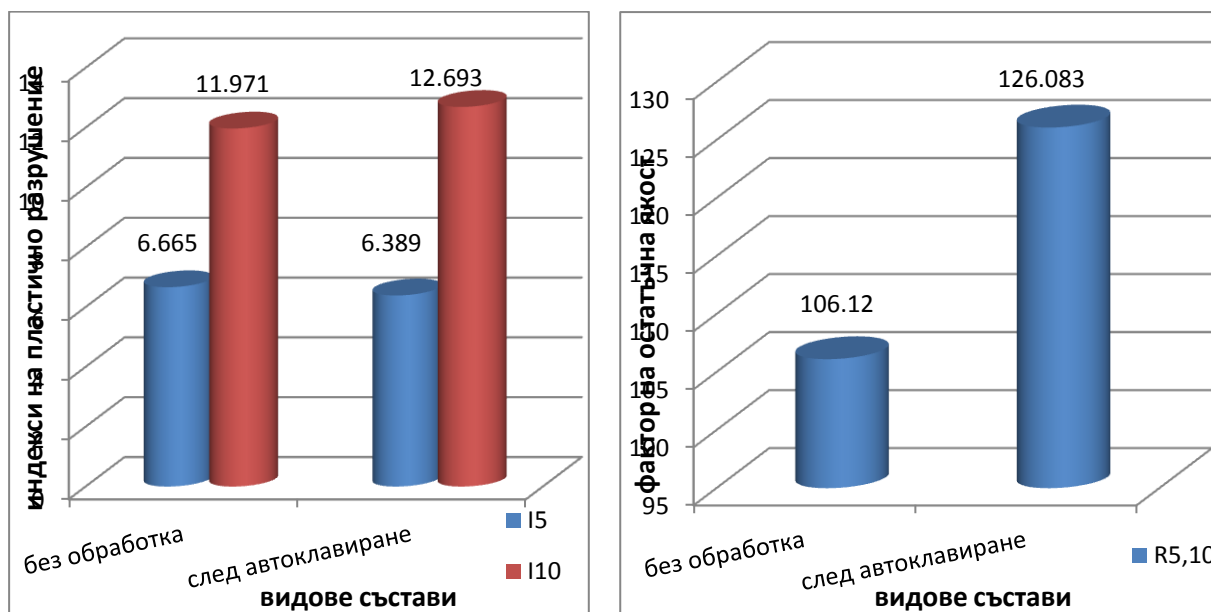
Ефектът от увеличаване на коравината на матрицата на СВЯБ, след термична обработка, е още по-силно изразен при дългите влакна, в сравнение с късите (фиг. VI. 49). Получената деформацията, в момента на първата пукнатина, е по-малка след топло-влажностна обработка, при достигане на приблизително еднакво натоварване. Това рефлектира на по-малка изчислена енергия на разрушение до пукнатинообразуване, при третирания състав. В последствие, топло-влажностната обработка на дава съществен принос към деформационно-уякченото поведение на композита, до достигане на максималната разрушителна сила, но тя се отразява в по-голяма степен върху увеличената зона на пластифициране.



фиг. VI. 49: Работна диаграма 'натоварване-провисване' при СВЯБ, преди и след прилагане на топло-влажностна обработка, с отчитане на основните й характеристики според ASTM C1018-97

Индексите на пластично разрушение при дългите влакна, практически не се влияят от топло-влажностната обработка - фиг. VI. 50-а, поради по-ранното пукнатинообразуване, при третираните образци, с което се „замаскира“ ефекта от по-голямата му зона на деформационно уякчаване. Стойността на индексът  $I_5$  е над 6, което показва, че СВЯБ се отличава от обикновените еласто-пластични материали, а индексът  $I_{10}$  е над 12, след прилагане на автоклавна обработка, поради още по-голямата му зона на пластифициране.

Факторът на остатъчна якост (фиг. VI. 50-б) след автоклавна обработка е изключително висок – над 126, което показва, че материалът бавно губи носимоспособност след достигане на максимална сила. Това доказва приносът на топло-влажностната обработка към увеличаване на дуктилността на СВЯБ, особено силно изразено при състави с дълги влакна. Материалът много по-дълго се съпротивлява на развитието на пластичните деформации, чрез изтръгване на влакната от матрицата, поради подобрената контактна зона (виж гл. V т. 4.2.2).

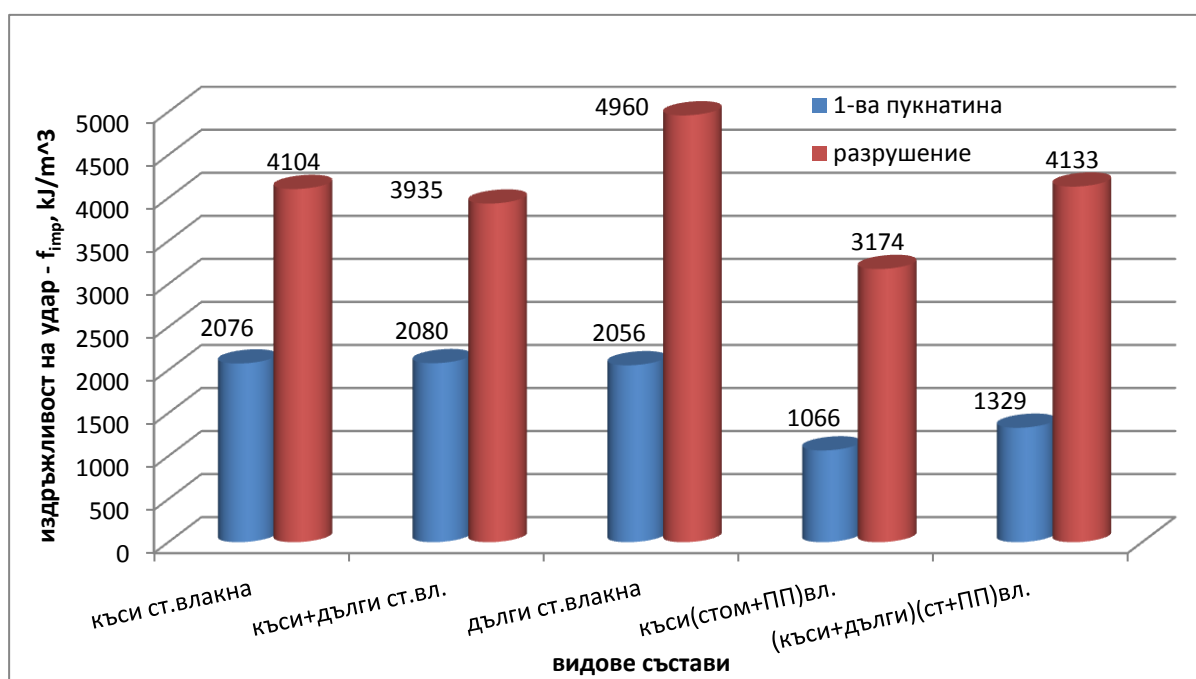


фиг. VI. 50: Влияние на автоклавната обработка на СВЯБ, армиран с дълги стоманени влакна, върху:  
 а) индексите на пластично разрушение, според ASTMС1018-97      б) фактора на остатъчна якост, според ASTMС1018-97

#### 4. Ударна жилавост

##### 4.1 При бетони със стоманена влакнеста армировка

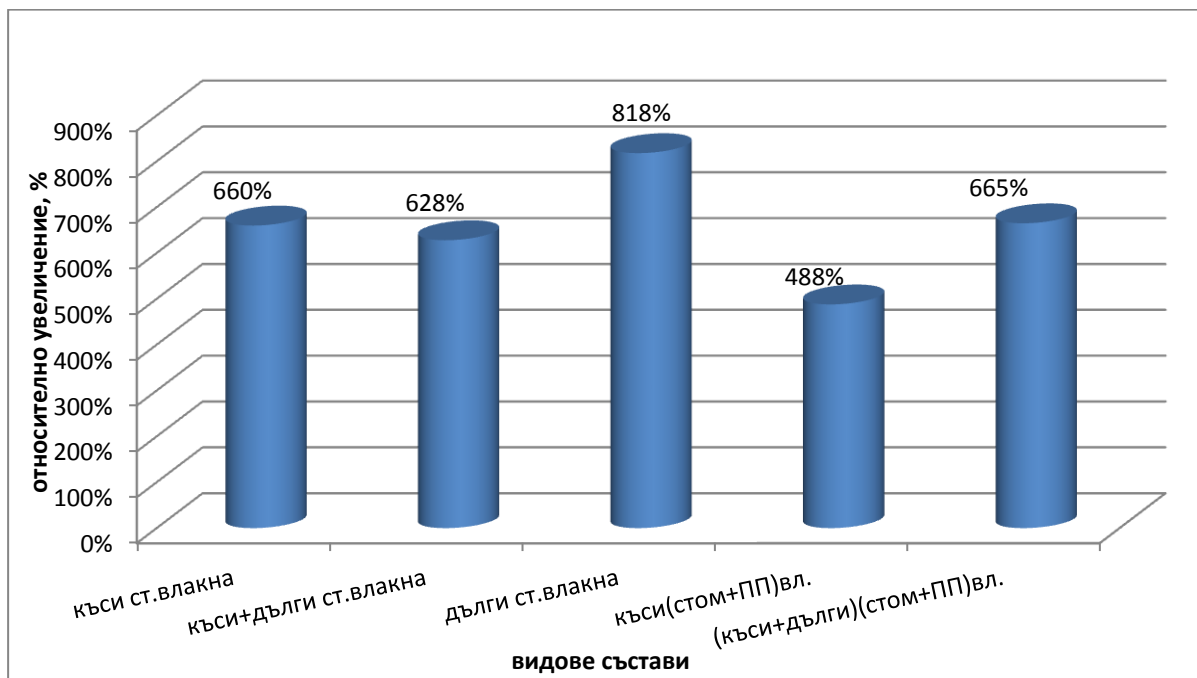
Най-голям принос за повишаване на ударната жилавост на влакнесто-армиран СВЯБ има използването на дълги стоманени влакна (фиг. VI. 51). При сравняване на резултатите при първа пукнатина се установява, че различните видове стоманена армировка удължават издръжливостта на удар до едни и същи граници (около 2100 кJ/m<sup>3</sup>). За издръжливостта на удар до пълно разрушение, най-голям ефект имат дългите влакна, при които тя достига до близо 5000 кJ/m<sup>3</sup>. Около 20% по-ниски са получените стойности при другите състави със стоманени влакна, както и при хибридната армировка от стоманени и ПП влакна (къси и дълги). Влиянието на комбинирането им с ПП влакна е видимо още до първата пукнатина, когато се отчитат стойности между 1050 и 1330 кJ/m<sup>3</sup>.



фиг. VI. 51: Издръжливост на удар на състави с различен вид и количество стоманени и ПП влакна

На фиг. VI. 52 е представено относителното увеличение на издръжливостта на удар при състави с различен размер и количество стоманени и хибридни стоманени и ПП влакна, спрямо неармираната супервисокоякоостна матрица, т.е тези стойности описват абсорбцията на енергия (*energy absorbtion*) (виж гл. I. т. 5.4.3). Най-голям принос върху издръжливостта на удар – над 8 пъти, имат дългите стоманени влакна, следвани над 6,5 пъти от всички останалите състави, с изключение на хибридната армировка от къси стоманени и ПП влакна, където относителното увеличение е под 5 пъти. Следователно, влакнестата армировка с дълги стоманени влакна при СВЯБ предлага ненадминати възможности за поемане на циклични динамични натоварвания. Това се дължи на благоприятният ефект на хомогенната матрица и подобреното сцепление между дисперсната армировка и матрицата.

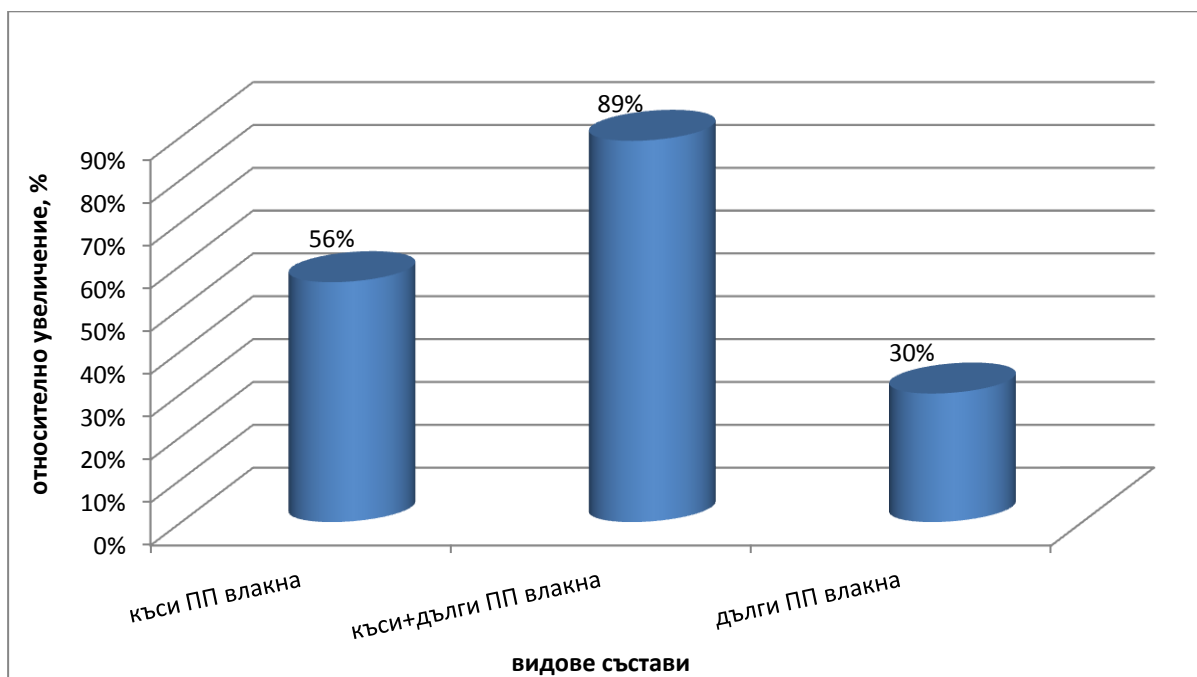




фиг. VI. 52: Относително увеличение на издръжливост на удар, изразено в %, на пробни тела армирани със стоманени и комбинирани влакна спрямо неармирани проби

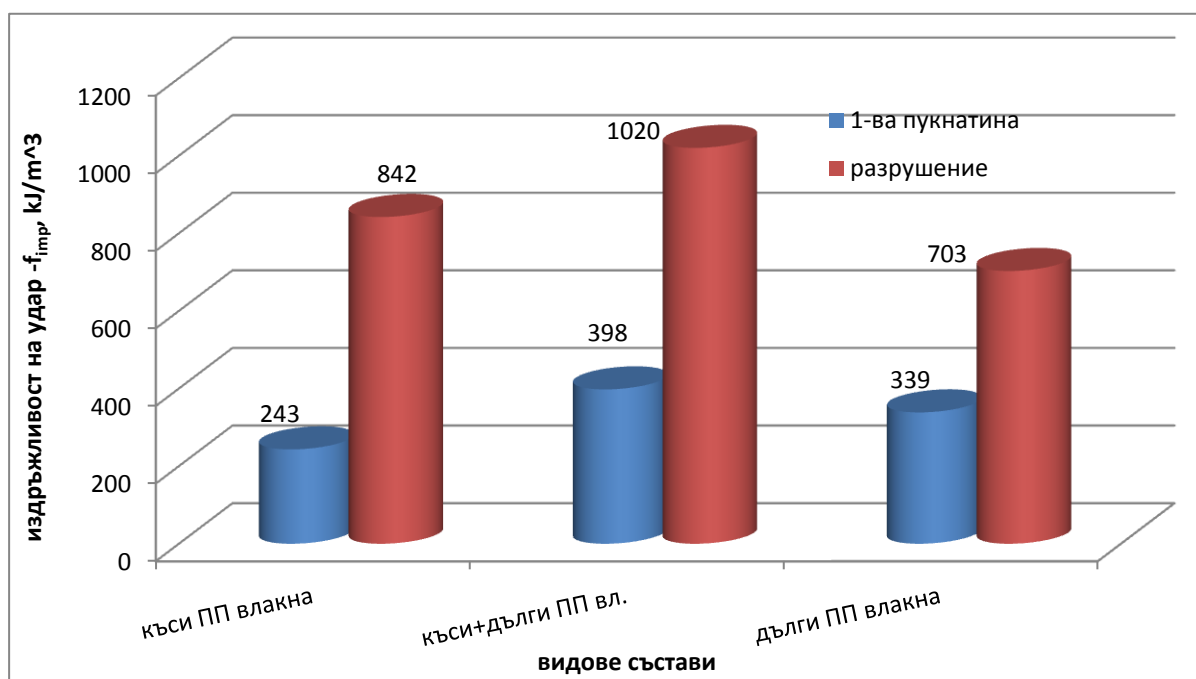
#### 4.2 При бетони с микрополипропиленови влакна

Въвеждането на микроПП влакна също води до повишаване на способността за дисипация на енергия, но в значително по-малка степен – от 30% до 90%, в сравнение с ефекта на стоманените влакна (600-900%) и хибридната армировка (450-650%). Интересен е фактът, че комбинирането на къси и дълги ПП влакна дава по-добър резултат, отколкото самостоятелното им използване – фиг. VI. 53 .



фиг. VI. 53: Относително увеличение на издръжливост на удар, изразено в %, на пробни тела армирани с ПП влакна спрямо неармирани проби

На фиг. VI. 54 е представена графика на получените резултати за издръжливостта на удар, до образуване на първа пукнатина и до разрушение при използването на микроПП влакна. Отчетен е най-голям ефект при комбинираното прилагане на къси и дълги влакна. При него се отбелязват над 60% по-високи стойности на издръжливостта на удар, в сравнение със състава с къси влакна и над 15% по-високи от дългите фибри. Получените стойности доказват положителния ефект от вложената дисперсна армировка от ПП влакна, която според някои литературни източници не води до повишаване на ударната жилавост [Farman, 2008]. При комбинираното използване на къси и дълги ПП влакна е по-висока и стойността на ударната жилавост до развитие на първа пукнатина. Макар и в по-ниска степен прави впечатление, че до разрушаване СВЯБ се прилага около 1,1-3,0 пъти повече енергия, отколкото за образуване на първа пукнатина, докато при стоманените влакна това отношение е по-ниско – 1,0-1,5 пъти.



фиг. VI. 54: Издръжливост на удар на състави с различен вид и количество ПП влакна

### 5. Връзка между поведението на огъване и ударната жилавост

Едни и същи тенденции в поведението на материала са установени чрез двата приложени метода за характеризирание на енергията на разрушение на влакнесто армираните композити – енергията на разрушение (*fracture toughness*), определени посредством диаграмата 'натоварване-провисване' и абсорбция на енергия (*energy absorption*). До появата на първа пукнатина, съставите със стоманени влакна имат приблизително еднакви стойности и на енергията на разрушение ( $G_f$ ) и на абсорбцията на енергия, малко по-високи при използването на къси стоманени влакна. Докато съставът с дълги стоманени влакна има най-високи стойности на абсорбция на енергия до момента на пълно разрушаване на композита. Подобни са и резултатите от  $G_f$ ,  $I_{10}$  и  $R_{5,10}$  (виж гл. VI. т. 3.2.1). Хибридната армировка няма подобър ефект в сравнение със стоманената. Следователно избраните подходи, макар и използващи два различни типа натоварване – статично и динамично, се оказват еднакво приложими за изследване влиянието на влакнестата армировка върху енергията на разрушение.

**6. Устойчивост на износване**

При СВЯБ устойчивостта на износване по *Böhme* е реализирано посредством състави с вариране на размера и количеството стоманени и ПП влакна, описани подробно в гл. IV т. 5. В табл. VI. 26 са дадени получените резултати от загубата на маса ( $\Delta m$ ) и съответно загубата на обем ( $\Delta V$ ). Очаквано, високите якостни стойности на матрицата намират отражение и в износоустойчивостта  $\gamma$  – сравнително високите стойности на  $\Delta V$  от 4,21 я класифицират в клас А6. Най-често поставяните изисквания към устойчивостта на износване на подови настилки е постигане на клас А6 по *Böhme*. Дори без използване на влакнеста армировка супервисокоякоостната матрица покрива тези изисквания. След влагането на дисперсна армировка обаче се увеличава значително устойчивостта на износване, като при използване на по-големи количества може да постигне най-високия клас А1,5.

Използването на влакнеста армировка от стоманени влакна води до стойности на  $\Delta V$  от около  $2,35 \text{ cm}^3 \pm 15\%$ , при различните видове стоманени влакна (табл. VI. 22). В същия момент микроПП влакна показват малко по-високи стойности на изтриваемост от около  $3,00 \text{ cm}^3 \pm 30\%$ . По този начин микроПП влакна попадат в клас А3. Най-добри резултати отчита комбинираното използване на стоманени и ПП влакна, при което стойностите им от  $1,8 \text{ cm}^3$  ги приближават най-близко до клас А1,5. Това се дължи на по-голямото общо количество използвани влакна за  $1 \text{ m}^3$  бетонна смес (виж гл. III т. 3.8), а не на синергетичен ефект. Отчетливо се забелязва повишаване на устойчивостта на износване с намаляване на размера на влакната, независимо от вида им.

**табл. VI. 22: Влияние на вида на влакнестата армировка за определяне на устойчивост на износване на СВЯБ, според БДС EN 13892-3:2005**

Вид състав	$\Delta m, \text{ g}$	$\rho_R, \text{ g/cm}^3$	$\Delta V, \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$	Клас по <i>Böhme</i>
къси стом. вл.	5,55	2,23	2,07	3
дълги стом. вл.	6,40	2,33	2,74	3
къси+дълги стом. вл.	5,50	2,36	2,33	3
къси ПП вл.	5,25	2,28	2,30	3
дълги ПП вл.	8,90	2,22	4,01	6
къси+дълги ПП вл.	7,95	2,26	3,00	3
къси (стом.+ПП)вл.	4,45	2,38	1,77	3
(къси+дълги)(стом.+ПП)вл.	4,15	2,37	1,85	3
оптимален състав	9,60	2,28	4,21	6

## ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА, VI-ТА ГЛАВА

**AFGC/SETRA:** Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes. Recommendations. Documentes scientifiques et techniques. In Association Française de Génie Civil, SETRA, Bagnex Cedex, June **2013**, Pages: 1 :318;

**ASTM C 1018-97:** Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading);

**ASTM C 1609/C 1609M-10:** Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading);

**ASTM C109/C109M–13:** Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens);

**Ahlborn T., Misson D., Peuse E., Gilbertson C.:** Durability and strength Characterization of Ultra-High Performance concrete under Variable Curing Regimes, *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages: 197-204;

**American Concrete Institute (ACI),** *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)*, ACI, Farmington Hills, Michigan, **2005**;

**Bornemann R., Faber S.:** UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibers under static and cyclic loading, *Proceeding First International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 673-682;

**Cheyrezy M., Behloul M.:** Creep and Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete. *Creep, Shrinkage and Durability Mechanisms of concrete and other Quasi-Brittle Materials – Proceedings of the Sixth International Conference CONCREEP-6@MIT*, Cambridge, MA, SUA, August, **2001**. Ed. By Ulm, Bažant, Wittmann. Elsevier, Pages: 527-538;

**Dils J., Schutter G, Veerle B., Braem E. :** Influence fo vacuum mixing on the mechanical properties of UHPC, *Proceeding the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and*

*Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel, Germany, March, 07-09, **2012**, Pages: 241-247;

**Empelmann M.**, Teutsch M., Steven G.: Improvement of the Post Fracture Behavior of UHPC by Fibers, *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages: 177-184;

**Graybeal B.** Characterization of the behaviour of Ultra-high performance concrete, *dissertation*, University of Maryland, **2005**;

**Grünewald S.**, Laranjeira F., Walraven J., Aguado A., Molins C.: Improved Tensile Performance with Fiber Reinforced Self-compacting Concrete, *Proceeding High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6, RILEM*, **2012**, Pages: 51-58;

**Heikal M.**, **Morsy M.**, **Aiad I.**: Effect of polycarboxylate superplasticizer on hydration characteristics of cement pastes containing silica fume, *Ceramics-Silikaty*, v. 50, i.1, November **2005**, Pages: 5-14;

**Illston J.**, Momone P.: *Construction Materials: Their Nature and Behaviour* (4<sup>th</sup> Edition), Spon Press, London and New York, **2010**;

**ISO 1920-10-2010**: Determination of static modulus of elasticity in compression;

**Lee, N.P.**, **Chisholm D.H.**: *Reactive Powder Concrete*, Branz, **2006**.  
<http://www.branz.co.nz/branzltd/publications/pdfs/SR146.pdf> (последно посетено на 31.01.2014);

**Neville A.M.**, *Properties of Concrete*, UK, **2002**;

**Naaman A. E.**: Engineering Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v.1, i3, November **2003**, Pages: 241-251;

**Naaman A. E.**: High Performance Fiber Reinforced Cement Compositions: Classification and Applications. *Proceeding the CBM-CI International Workshop*, Karachi, Pakistan, **2007**, Pages: 389-401;

**Orgass M.**, Klug Y.: Fiber Reinforced Ultra-High Strength Concretes, *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages 637-647;

**Puertas F.**, Santos H., Palacios M., Martínez-Ramírez S. :Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes, *Advances in Cement*

*Research*, v.17, i.2, April **2005**, Pages: 77-89;

**Schachinger I.**, Schuber J., Mazanec O.: Effect of Mixing and Placing Methods on Fresh and Hardened High Performance Concrete (UHPC), *Proceeding the First International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 13-15, **2004**, Pages: 573-586;

**Singh S.**, Singh A, Bajaj V.: Strength and flexural toughness of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibers, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, v.11, i. 4, **2010**, Pages: 495-507;

**Soutsos M.**, Millar S., Karaikos K.: Mix Design, Mechanical Properties, and Impact Resistance of Reactive Powder Concrete (RPC). *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*, Honolulu, HI, May **2005**;

**Tafraoui A.**, Escadeillas G., Lebaili S., Vidal T.: Metakaolin in the formulation of UHPC. *Construction and Building Materials*, v. 23, i. 2, February **2009**, Pages 669-674;

**Vogel H.**, Davoudi S., Noël M., Svecova D. : Evaluation of Properties of High Strength Concrete for Prestressed Concrete Prisms, *Proceeding the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages:287-294;

**Xincheng**, Pu.: *Super-High-Strength High Performance Concrete*, CRC Press, **2013**;

**Yazini H.** Yardimci M. Y., Aydin S., Karabulut A. Ş.: Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials*, v. 23, i. 3, August **2008**, Pages 1223-1231;

**БДС EN 13892-3:2005**: Методи за изпитване на подови замазки. Част 3: Определяне на устойчивост на износване – Bohme;

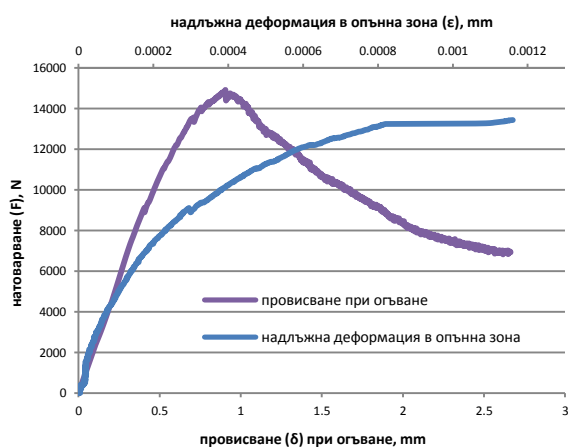
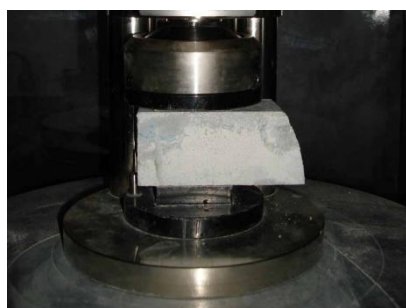
**Ростовски И.**, **Найденев В.**: Конструирание и оразмеряване на дисперсно амирани плочи на земна основа, *Международна юбилейна научно-приложна конференция УАСГ*, ноември, **2012**, том.2, стр: 23-28;

**Симеонов Й.**, Даракчиев Б., Николов И.: *Строителни материали*, София, Техника, **1991**;



## VII ГЛАВА

### ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА







## ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ДИСЕРТАЦИЯТА:

Анализът на получените резултати относно влиянието на рецептурни и технологични фактори върху механичните свойства на СВЯБ, позволяват да се направят следните основни изводи:

1. Създаването на СВЯБ с участието на високоякоостен едър добавъчен материал е възможно, но увеличаването на максималния диаметър на добавъчния материал от 0,5 mm на 8,0 mm води до понижение в якостта на натиск на матрицата с около 30%. Препоръчително е използването само на финозърнести пълнители, с което се постига и по-хомогенна структура, позволяваща използването на микровлакна като дисперсна армировка. Проектирането на състава на матрицата изисква да се оптимизира зърнометрията ѝ: установено е, че моделът на Modified Andreassen, дава по-висока степен на уплътняване на зърнестите компоненти.
2. Голяма част от цимента в състава на СВЯБ играе ролята на фин пълнител, тъй като, поради ниските водоциментни отношения, остава нехидратирало количество. Замяната на цимент с кварцово брашно води до влошена обработваемост на смесите (при изготвяне с класически технологии) и създава повече макро-дефекти. При използването, обаче, на автоклавна обработка, част от кварцовото брашно участва в хидратационните процеси на свързващото вещество и до повишение на якостите на СВЯБ.
3. Увеличаването на количеството на микросилициевия прах от 20 до 30% от масата на цимента, води до подобрена обработваемост на смесите и до повишаване на якостта на натиск на матрицата (с около 24% на 7-дневна и 10% на 28-дневна възраст) вследствие на уплътнената микроструктура, но използването на големи количества микросилициев прах е оправдано главно при съставите, които са подлагани на топло-влажностна обработка.
4. Якостта на опън при огъване на матрицата е по-чувствителен параметър за оценка на влиянието на водоциментното отношение – при увеличаването му от 0,20 до 0,24 тя се понижава с около 40%, докато якостта на натиск намалява само с 12%.
5. Силно развитата специфична повърхност на компонентите на матрицата на СВЯБ и ниските водоциментни отношения изискват използването на големи количества суперпласифицираща добавка, което има редица последици върху поведението на бетонната смес (подобрена обработваемост и по-дълго отворено време), високи якости на натиск, но и повишаване на крехкостта на матрицата (якостта ѝ на опън при огъване може да се намали с до 40%). При използването на поликарбоксилатна химическа добавка на етерна основа като оптимално се очертава количество от 1-1,2%, изразено като сухо вещество от масата на цимента.

6. Несъвършенствата в технологията на изготвяне на СВЯБ водят както до създаване на дефекти (въвлечен въздух) в плътната матрица, така и до висока продължителност на хомогенизирането и до по-нисък добивен коефициент. За да бъдат преодолени тези недостатъци е препоръчително използването на вакуумни високоскоростни миксери.
7. Кинетиката на якостта при СВЯБ се отличава съществено от тази при обикновените бетони: на 2-ри ден якостта на натиск е над 50% от якостта на 28-ми ден, а на 7-ми е вече 75%. Условието, при които става набирането на якост на СВЯБ, имат по-голямо влияние, отколкото това е установено при обикновения бетон: поради по-малката екзотермия на СВЯБ, отлежаването при понижена температура (+10 °C) води до системно по-ниски якости (с 42% до 16% между 2-ри и 28-ми ден); при температурата на околната среда до +30 °C се интензифицират процесите на хидратация и якостните характеристики се повишават значително (с до 22%). Когато отлежаването е реализирано под вода, ефектът на температурата е по-слабо изразен (в рамките на 23 % до 7% на между 2-ри и 28-ми ден).
8. Прилагането на топло-влажностна обработка чрез автоклавиране води до значително повишаване на якостта на натиск, както на матрицата на СВЯБ (с около 33%), така и на дисперсно-армирания композит (с около 75%), което се дължи на ускоряване на процесите на хидратация на цимента, на мобилизирането на микросилициевия прах и на формирането на допълнителни количества високоосновни калциеви хидросиликати, на уплътняването на контактните зони и на намаляването на общата порестост на материала. Положителният ефект на автоклавната обработка върху поведението при огъване се изразява основно в модифициране на работната диаграма – понижена деформативност в зоната на пропорционалност, нарастване на пластичните деформации в зоната на интензивно пукнатинообразуване и повишаване на фактора на остатъчна якост. Като цяло, в резултат на автоклавирането, се повишава енергията на разрушение с 15% до 20%. Влиянието на пропарването върху микроструктурата и механичното поведение на СВЯБ е сходно, но е по-малко и, с оглед на оптимизиране на времево-енергийни ресурси, този тип топовлажностна обработка се оказва неефективен.
9. Проведените изследвания върху микроструктурата показват редица особености на СВЯБ: установени са различия във вида и количеството на хидратационните продукти при СВЯБ, в сравнение с тези при обикновения бетон; автогенното съсъхване е по-изразено и води до микрпукнатинообразуване; общата порестост е изключително ниска, като при това поровото пространство се характеризира с липсата на макрокапилярни пори, а микрокапилярните пори съществуват само в ранна възраст. Основният дял на порите се пада на нанопорите в гела, което е причина и за изключителната дъготрайност на СВЯБ. Тепло-влажностната обработка води до трансформация на продуктите от хидратация (не се установява наличието на еtringит и портландит) и редуцира допълнително общата порестост, като по начин се постигат изменения не само в микроструктурата на матрицата, но се повишава и качеството на контактната зона „влакно-матрица“.

10. Установено е, че дисперсното армиране (2% по обем) със стоманени микровлакна води до съществени промени в якостните свойства на матрицата: якостта на натиск нараства с до 45%, якостта на опън при огъване - с до 100%, якостта на опън при разцепване – с над 80%, износоустойчивостта – с около 100%. Същевременно, деформационните характеристики са по-консервативни - модулът на еластичност се променя едва с 3,6%, който порядък се потвърждава и от теоретичните изчисления, а коефициентът на Поасон намалява от 0,21 до 0,20.
11. Изполваните микрополипропиленови влакна във вид на мрежа имат ограничено влияние върху механичните свойства на СВЯБ: те водят до нарастване на коефициента на Поасон (до 0,23) и леко повишена деформативност на композита; съдействат за дисипацията на енергия и имат известен положителен ефект върху издръжливостта на удар (30% при дългите и 60% при късите влакна, при еднакъв процент на армиране), но той е много по малък от този, постигнат със стоманените влакна (които повишават удароустойчивостта с до 800%) и подобряват износоустойчивостта;
12. Изчисляването на енергията на разрушението въз основа на работните диаграми при огъване дава възможност за диференцирана оценка както на ефекта от дисперсното армиране върху различни параметри на поведението на СВЯБ, така и на отношението „дължина/диаметър” на влакната: използването на относително къси стоманени микровлакна води до повишаване на пукнатинуостойчивостта на СВЯБ, а относително дългите стоманени микровлакна имат по-голям ефект върху деформационното уякчаване и дуктилното поведение на СВЯБ. Комбинацията от къси и дълги влакна има синергичен ефект – необходима е повече енергия както за възникване на първа пукнатина, така и за деформационното уякчаване и за последващото пластифициране в резултат на интензивно пукнатинуобразуване.
13. Установено е, че при изпитването на огъване е възможно да се постигне добра съпоставимост на резултатите, получени по метода с контролиране на скоростта на натоварването по сила (класически за определяне на якостните характеристики на циментови състави) и по деформации (препоръчителен при изпитване на влакнесто-армирани композити);
14. Едни и същи тенденции в поведението на материала са установени чрез двата различни подхода за характеризирание на енергията на разрушение на влакнестоармираните композити на СВЯБ – т.нар. fracture toughness (енергия на разрушение, определена като площта под диаграмата „натоварване-провисване” при огъване) и energy absorption (отношението на количеството енергия, необходимо за разрушаването при циклично ударно въздействие на единица обем на армирания композит към матрицата).



## ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА:

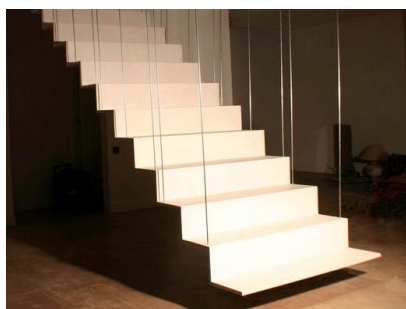
Основните приноси на дисертационния труд могат да бъдат определени като научно-приложни:

1. Комбинирани са два подхода при оптимизиране на матрицата на СВЯБ – избор на зърнометричен състав по референтна крива и математическа теория на планирания експеримент за анализиране на самостоятелното и/или съвместното влияние на водоциментното отношение, максималния размер на добавъчния материал и количеството на суперпласифициращата добавка.
2. Установено е как, посредством вариране на основни технологични фактори (скорост и продължителност на забъркване, условия на околната среда и топовлажностно третиране), може да бъде целенасочено модифицирана микроструктурата на СВЯБ, което рефлектира върху неговите физични и механични свойства.
3. За първи път методът на изотермичната калориметрия е приложен за изследване на особеностите в процеса на хидратация на СВЯБ - по-дълъг период на покой, значително по-ниска екзотермия, в сравнение с тези, при обикновените бетони, въпреки много по-високото съдържание на свързващо вещество в СВЯБ.
4. Определени са основните якостни и деформационни характеристики, необходими за проектиране на конструктивни елементи от СВЯБ, като същевременно е констатирано, че някои зависимости, установени за обикновените, а дори за високоякоостните, бетони, имат ограничена валидност при СВЯБ.
5. Идентифициран е подходящ метод за изчисляване на енергията на разрушение, който дава възможност да се диференцира приносът на различни видове влакнеста армировка върху специфичните аспекти на поведението при огъване на влакнестоармирани композити на високоякоостна матрица – продължителна зона на пропорционалност; зона на деформационно уякчаване, зона на пластифициране посредством интензивно микропукнатинообразуване и плавна загуба на носимоспособност.



## VIII ГЛАВА

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И НАСОКИ ЗА БЪДЕЩО РАЗВИТИЕ







Супервисокоякоостният бетон (СВЯБ) е нов вид конструктивен материал, както в България, така и в световен мащаб. Той се отличава от останалите бетони с високи механични характеристики, по своята изключителна дълготрайност и възможността да се прилага в земетръсни райони, където се изисква дуктилно поведение на конструкциите. Със своите значително подобрени якостно-деформационни характеристики, възможност за над два пъти редуциране на напречното сечение на елиментите и елеминиране на основната носеща армировка, СВЯБ се превръща в конкурентен конструктивен материал на стоманата.

Основната цел на проведеното изследване е да се създаде СВЯБ в България, с местни материали и да бъдат определени основните му структурни и механични характеристики, при използване на различни рецептурни състави, с вариране на отделни технологични параметри.

Последователно са извършени изследвания, с цел да бъдат избрани най-подходящите изходни материали, за направата на СВЯБ. В следствие е определена суперпластифициращата химическа добавка, с оглед постигане на максимално пластична смес от една страна и най-високи якостни характеристики на натиск и опън при огъване от друга. Извършен е планиран експеримент, чрез който е определен оптимален състав. На базата на него са изследвани редици рецептурни и технологични параметри, който оказват влияние както върху поведението на прясната бетонна смес, така и върху свойствата на втвърдения бетон. Отделни състави са изследвани на микроструктурно ниво, с цел да бъдат дефинирани вида и разположението на различните хидратационни продукти, както в матрицата на СВЯБ, така и в чувствителната преходна зона с добавъчния материал и дисперсната армировка, както и количеството на разпределението по размери на порите в бетона. Чрез метода на изотермичната калориметрия е проследено отделеното количество топлина от бетона във времето.

Отделни изследвания са извършени, с цел да се анализира ефектът върху якостно-деформационното поведение и увеличаване на дуктилността на СВЯБ, при използването на различни по размер стоманени и полипропиленови влакна, както и при хибридно им влагане. Очертани са зоните на чисто еластично поведение; пластично деформиране; зона на уякчаване и зона на остатъчно натоварване. Ефектът от влакнестата армировка е изследван и чрез динамично натоварване на ударна жилавост, което показва сходимост на резултатите с изпитването на якостта на опън при огъване.

Развитието на бетонната индустрия и в частност на СВЯБ, в последния половин век, се дължи основно на използването на различни отпадни продукти от индустрията, влагани като активни минерални добавки и добавъчни материали. От друга страна усъвършенстването на химическата индустрия спомага за модифициране на отделни свойства на прясната бетонна смес и на втвърдения бетон, без това да доведе до редуциране на механичните характеристики на материала. Въпреки това, фундаменталният въпрос, за действието на суперпластификаторите върху циментовите частици и микросилициевия прах, както и върху СВЯБ като цяло, все още не е изяснен. Суперпластификаторите продължават да се развиват, а увеличаването на ефективността им би довело до значително намаляване на влагането

количество, което да осигури необходимото ниво на обработваемост и/или якост на натиск и/или дълготрайност. Това би довело до допълнително намаляване на цената на СВЯБ. Съвместното действие на суперпластификаторите, заедно със специално подбраната зърнометрия, трябва да модифицира свойствата на прясната бетонната смес при СВЯБ, до тази на самоуплътняващия се бетон.

Като съвсем нов конструкционен материал за България, СВЯБ налага да се продължи изследването на отделни рецептурни и технологични параметри, с цел постоянното му извършване и използването му в различни области на строителството. Някои от тях са:

- Комбиниране на суперпластификатора с:
  - ускоряващи добавки (равномерно и бързо достигане на начална и крайна якост);
  - въздуховъвличащи добавки (подобряване на мразоустойчивостта);
  - разширяващи (увеличават обема, за да се компенсира съсъхването).
- Редуциране на количеството цимент и микросилициев прах и тяхното отражение върху механичните характеристики на бетона след прилагане на топло-влажностна обработка.
- Замяна на пясъка със стоманена пудра.
- Използване на високоскоростни миксери.

След извършените експерименти, могат да се направят следните насоки за бъдещи изследвания в областта на прясната бетонна смес и втвърдения бетон:

- Изследване на разположението на влакнестата армировка в целия обем на пробното тяло.
- Проследяване на сцеплението между дисперсната армировка и матрицата в преходната ITZ зона, с цел анализиране структурата на новообразуванията в нея;
- Изследване на основните реологични параметри на СВЯБ.
- Определяне на устойчивостта на високи температури и огнеустойчивостта.
- Определяне на привидна енергията за активация и анализиране на степента на хидратация;
- Изследванията на основните аспекти на дълготрайността на СВЯБ, съсредоточени в следните направления:
  - устойчивост при различни температуро-влажностни въздействия (променливо изсушаване и навлажняване, циклично замръзване-размръзване и др.п.)
  - устойчивост на химична агресия (различни агресивни среди, с оглед промяната на неговите структура и свойства с течение на времето)
  - корозионна устойчивост на стоманената армировка в СВЯБ, сред която: определяне на алкалността на средата на СВЯБ; определяне дълбочината на неутрализация на различни разстояния на армировката в бетона; определяне скоростта на карбонизация, с което да се даде оценка за големината на бетонното покритие при стоманобетонните конструкции от СВЯБ; изследвания за наличие на корозия на предварително-напрегнатата стоманена армировка в СВЯБ.

Големият прогрес в изучаването на СВЯБ и на бетона като цяло, се дължи на по-доброто познаване на материала на микроструктурно ново. Постоянното усъвършенстване на бетона предопределя следващата стъпка в развитието му, която ще се дължи на познаването му на нанониво. Това може да се види и в последната научна конференцията в областта на СВЯБ, проведена в *Kassel*, Германия, 2012, със заглавие – „*Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction*”. Колкото нови изследвания и открития да се появят, те ще бъдат в резултат на усилията между науката и технологията, защото въпреки неговата комплексност, бетонът е материал, който все още се подчинява на законите на физиката и химията.

В последно време все повече се обръща внимание на необходимостта от това да не се създават сгради и съоръжения, който има много малък експлоатационен период, защото това би довело до увеличаване на разходите и до все по-честа нужда от реконструкции. В отговор на това, в последните години е извършено комплексно изследване върху конструкциите от СВЯБ, с оглед на тяхното устойчиво развитие, по специална програма на немската фондация за научни изследвания, с работно заглавие “*Sustainable Construction with Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)*”.

От провеждането на първите целенасочени лабораторни изследвания върху СВЯБ, са минали повече от 30 години. От построяването на първата в света конструкция от СВЯБ (*Sherbrooke*, 1997г.), до сега са реализирани множество пътни и пешеходни мостове, покривни конструкции, козирки и балони, панели и плочи, пилоти и колини, усилване на греди, колини, стени и много други. До 2013 година, когато в *Marseille* бе открит музеят на Европейските и Средиземноморски цивилизации (виж пр. 1), който е първата в света сграда с преобладаващи конструктивни елементи изпълнени от СВЯБ. При откриването ѝ, *Rudy Ricciotti*, архитект на сградата и човек с дългогодишен опит с материала, изказва мнението: ‘Ние не знаем до къде ще ни отведе този материал, но той ще ни помогне да създадем света наново’.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

# РЕАЛИЗИРАНИ ОБЕКТИ В ПОСЛЕДНИТЕ ПЕТНАДЕСЕТ ГОДИНИ

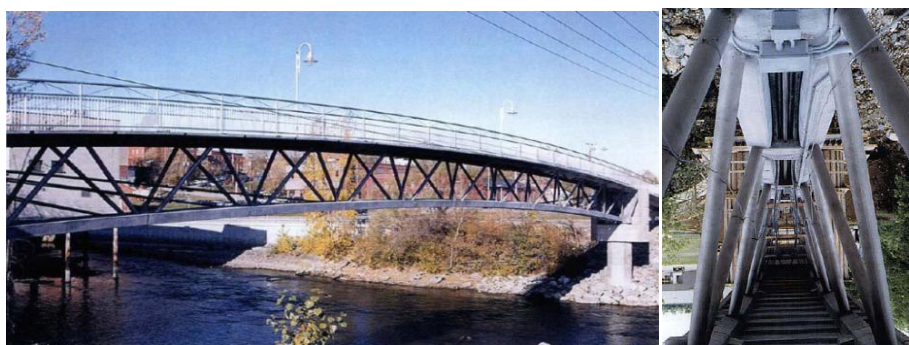
### 1. Мостови конструкции

#### 1.1 Пешеходни мостове

##### 1.1.1 *Sherbrooke Pedestrian Bridge*

Първата изпълнена конструкция в света със СВЯБ е реализирана чрез продукта *Ductal*®, който е създаден от три френски компании: *Bouygues*, *Lafarge* и *Rhodia* (Brown 2006) през 1990 година. Тя представлява пешеходен мост за хора и велосипедисти над реката *Magog* в *Sherbrooke*, Канада. Реализиран през 1997 година, това е една от най-леките конструкции изпълнени с бетон до тогава.

Мостът има подпорно разстояние от 60 m, като конструкцията се състои от пост-напрегната бетонна ферма, с път горе, като всеки един от прътите представлява антикорозионна стоманена тръба. Тръбите са напълнени със СВЯБ, като е било приложено налягане (от 50 MPa) по време на свързването, с което допълнително са повишени механичните показатели. Горното строене на моста е решено с плоча, която играе роля на горен пояс на фермата, а долния пояс е реализиран чрез двойна греда. Плочата е с дебелина само 3 cm и е широка 3,3 m.



пр. 1 сн. 1: Предварително напрегнат пешеходен мост: *Sherbrooke Pedestrian Bridge* (1997), Канада [Voort, 2008]

##### 1.1.2 *Peace of Seoul*

През 2002 СВЯБ е използван за направата на дъгов мост в *Seoul*, Южна Корея. Мостът привлича вниманието със своята елегантна форма и голямо подпорно разстояние (120 m). За сечение на моста е избрана *pi* греда, като плочата на моста е широка 4,3 m и е с дебелина само 3 cm. Използваният продукт е готовата бетонна смес на *Lafarge*®.



пр. 1 сн. 2: Пешеходен мост: *Peace of Seoul* (2002), Южна Корея [www.planete-tp.com]

### 1.1.3 *Papatoetoe footbridge*

Мостът *Papatoetoe* е изграден с цел да премества железопътна гара, намираща се под него. Съставен е от множество греди с  $\pi$  напречно сечение и всяка с дължина от 20 m. Между всеки отвор са разположени пост-напрегнати сегменти от СВЯБ. Реализираната конструкция, има силно намалено собствено тегло, което рефлектира на намалени сеизмични сили на въздействие, по-бърз монтаж и редуциран товар към събконструкцията.



пр. 1 сн. 3: Пешеходен мост: *Papatoetoe footbridge* и *Penrose light-rail transit station* (2006), Нова Зеландия [Voort, 2008, 1] & [www.wikipedia.org]

### 1.1.4 *Sakata Mirai footbridge*

Първото приложение на СВЯБ в Япония е реализирано през 2002 година с построяването на пешеходния мост *Sakata Mirai*. Използван е материалът *Ductal*®, на *Lafarge*®. За направата му е приложено външно налягане, като общото тегло на моста се равнява на една пета от теглото на еквивалентен мост, изпълнен от бетон с нормална якост. Мостът е проектиран в Япония, като размерите му са 35 m в дължина и 95 cm височина на основната греда. Съоръжението целогодишно е подложено на изключително големи температурни амплитуди, заради специфика на региона в който се намира.



пр. 1 сн. 4: Пешеходен мост: *Sakata Mirai footbridge* (2002), Япония [[www.ductal-lafarge.com](http://www.ductal-lafarge.com)]

## 1.2 Пътни мостове

### 1.2.1 *Shepherds Creek Road Bridge*

Мостът *Shepherds Creek* се намира на 150 km от *Sidney*, Австралия, като е част от втората по големина пътна артерия в Австралия. На негово място е имало стар дървен мост, с изчерпан експлоатационен период. Новият мост е първият в света пътен мост изработен от СВЯБ, който е подложен на интензивен товарен трафик от автомобили. Мостът е едноотворен с дължина на гредите от 15 m и височина от 60 cm. Горното строене на моста представлява тънка 17 cm стоманобетонна плоча, излята на място върху предварително изготвени кофражни панели с дебелина от 2,5 cm, поставени между гредите. Като цяло теглото на моста е намалено с повече от два пъти, в сравнение с мост изграден от конвенционален бетон.



пр. 1 сн. 5: Четири лентов мост: *Shepherds Creek Road Bridge* (2006), Австралия [Voort, 2008, 1] & [[www.ductal-lafarge.com](http://www.ductal-lafarge.com)]

### 1.2.2 *Saint Pierre la Cour Bridge*

Мостът е построен над железопътната линия *Saint-Pierre-la-Cour*, Франция. Размерите на моста са дължина 19 m и широчина 12,6 m, като на 7,6 m е разположено пътното платно, а останалото пространство е заето от тротоари и велоалея. Проектът е реализиран със значително редуциране на бюджета (много по-икономически изгодно в сравнение с конвенционален бетон), благодарение на използвания материал *Ductal*®. Изработени са 10 предварително напрегнати в долния пояс тънки греди, без допълнителна армировка или стремени и тънкостенната конструкция за горното строене. Изпълнението на проекта е отнело само един ден за монтаж на конструктивните елементи и още един ден за осъществяване на връзката между отделните конструктивни плочи.





пр. 1 сн. 6: Четири лентов мост: *Saint Pierre la Cour Bridge* (2005), Франция [[www.ductal-lafarge.com](http://www.ductal-lafarge.com)]

## 2. Черупкови конструкции

### 2.1 Покривни конструкции

#### 2.1.1 *Shawnessy Train Station*

Канадското архитектурното и инженерно бюро *Stantec, Ltd.* създава атрактивни навеси над пероните на гарата *Shawnessy light rail transit station* в *Calgary*, Канада. Покривните конструкции са изготвени от материала *Ductal©* с органични фибри, като е постигната дебелина на елемента само от 2 см и широчина от 5 м. Всяка една черупка е подпряна на единична колана с помощта и на три подкоса.



пр. 1 сн. 7: Железопътна гара: *Shawnessy Train Station* (2006), Канада [[www.ductal-lafarge.com](http://www.ductal-lafarge.com)]

### 2.2 Козирки

#### 2.2.1 *Navarra House*

Френският изкуствовед *Enrico Navarra* поръчва на архитекта *Rudy Ricciotti* съвместно с инженерната компания *LD Ingénierie* да му проектират частна галерия на изкуството. Материалът, на който се спират за изграждането на покривната конструкция, е *Ductal©*, армиран със стоманени фибри. Последователно са изготвени седемнадесет панела, всеки от които е с тегло 3 тона и размери от 9,25 m на 2,35 m. Козирката, която е като естествено продължение на покривните панели е с дължина от 7,8 m, като поради тънкото си сечение създава усещането на свобода и простор.



пр. 1 сн. 8: Покривна конструкция: *Navarra House* (2008), Франция [[www.ductal-lafarge.com](http://www.ductal-lafarge.com)]

### 2.2.2 *Millau toll-gate*

Покривната конструкция, на един от пропусквателните пунктове на магистралата А75, е решена от немския архитект *Michael Herbert*. Материалът, който е вложен е супервисокоякоостен бетон, дисперсно армиран с къси стоманени фибри. Широчината на козирката е 28 m, а дължината е 98 m. Козрашните работи са на френската компания *Peri*®. Колоните, върху които е подпряна чепунковата конструкция, са стоманени.



пр. 1 сн. 9: Покривна конструкция: *Millau toll-gate* (2004), Франция [[www.en.structures.de](http://www.en.structures.de)]

## 3. Плочи и панели

### 3.1 Самолетни писти

*Helada Airport* е четвъртото най-голямо летище в света по отношение на човекопоток (данни от края на 2010 година), което е наложило своевременното му увеличаване. Поради високата степен на урбанизация разширяването му е реализирано за сметка на изкуствена земя в морето. Общата му площ е 520 000 m<sup>2</sup> над вода, като устоите са направени от стоманени греди, а самолетните писти от бетон с площ от 192 000 m<sup>2</sup>. Изборът на материала *Ductal*® е направен въз основа на отличната му устойчивост срещу соли (около 100 пъти по-добра от обикновения бетон) и голям коефициент на водонепропускливост. Стойността на обекта е значително намалена, заради влагането на леки плочи от СВЯБ (два пъти по-леки от конвенционалните) с изключителна дълготрайност.



пр. 1 сн. 10: Самолетна писта на летището в Токио: *Haneda Airport* (2004), Япония [www.ductal-lafarge.com]

### 3.2 Пласти за атомни централи

Друго приложение на СВЯБ е за направата на предварително изготвени, предварително напрегнати греди и пласти на охладителните кули на атомната електроцентрала в *Cattenom*, Франция, през 1999 година, с конкурентен на *Ductal*® продукт - *CeraCem*®. Те са създадени с цел да заменят старите стоманобетонни елементи с по-леки и дълготрайни, като в същото време намалят натоварването върху основите на съоръжението. Новите елементи са изчислявани да издържат на множество цикли замръзване-размръзване в съчетание със силно агресивна среда. Силно агресивната среда вътре в охладителните кули и нейното остро корозионно въздействие е сравнено в последствие между бетоните и стоманените елементи в един и същи участък на съоръжението. Разликата е значителна, като носещата способност на бетонната част надвишава значително тази на стоманената.



пр. 1 сн. 11: Греди и пласти на атомна централа: *Cattenom nuclear power station* (1999), Франция [Voort, 2008]

### 3.3 Пласти за силози

Първата покривна конструкция, с големи върхни панели, изградена изцяло с *Ductal*®, е на циментовите силозите в *Illinois*, САЩ. Едновременно с тяхната подмяна е извършен ремонт и на съседните два силози, които са репарирани със стоманена конструкция, с цел да бъде направен натурен сравнителен анализ по време на експлоатацията. Изградени са 24 предварително изготвени покривни елемента от СВЯБ, изцяло без носеща армировка, с размери от 18 m в диаметър и забележителна дебелина от 18 mm. При този тип съоръжения, с влагането на СВЯБ са значително по-лесно изпълнени изискванията свързани с водоплътност и обезвъздушаване на пространството.



пр. 1 сн. 12: Покривни панели и греди на клинкерен силос: *Clinker Silo Joppa* (2011), САЩ [[www.ductal-lafarge.com](http://www.ductal-lafarge.com)]

#### 3.4 Панели за тунелни съоръжения

Конструкцията е представена от двойни панели от СВЯБ, с вложена армировка от стоманени фибри и стоманени мрежи. Материалът, който е използван е *CeraCem BFM Millau*®. Външната черупка е с изисквания за водонепропускливост, а вътрешната е реализирана чрез излят на място бетон.



пр. 1 сн. 13: Панели за тунелни съоръжения (2010), Австрия [Randl, 2012]

#### 3.5 Панели за покривни конструкции на стадиони

Стадионът *Jean Bouin* е построен през 1925, с капацитет от 5 000 до 20 000 зрители. Проектантът *Rudy Ricciotti* има за задача да покрие трибунната част, като той избира материалът *Ductal*®, като утвърдена световна марка за изграждане на леки конструкции в последните години в съчетание с отличните му експлоатационни качества. Покривът се състои от 3600 триъгълни елементи, с дължина варираща от 8-9 m, ширина 2,5 m и дебелина само от 4,5 cm. Общата квадратура на покрива е 23 000m<sup>2</sup>. Проектът е още в процес на реализация (данни от ноември 2012).



пр. 1 сн. 14: Покривни панели на стадиона: *Stade Jean Bouin (2013)*, Франция [www.ductal-lafarge.com]

### 3.6 Фасадни панели

За изграждането на фасадата на магазина на *Louis Vuitton* са използвани панели със среден размер от 2/1,7 m и с дебелина от 25 mm, произведени в две различни шарки, олицетворяващи марката. Общата площ на фасада е 18000 ft<sup>2</sup>. Изпълнени са изискванията за изключително лека, тънка и дълготрайна фасада, с цел да издържи на суровите ураганни ветрове в Miami, Флорида.



пр. 1 сн. 15: Фасадни панели на магазина "*Maison*" на *Louis Vitton (2013)*, САЩ [www.ductal-lafarge.com]

### 3.7 Конзолни плочи на балкони

Датската практика за използване на СВЯБ е успешно приложена в Нидерландия, по проект за инсталиране на допълнителни 159 балконски плочи на жилищна сграда. Дебелита им е само 65 mm, а останалите размери са 600/180 mm. Те са произведени и транспортирани от Дания и са поставени върху изготвени на място конзолни елементи върху които да стъпват.



пр. 1 сн. 16: Ултра тънки балконски плочи (2012), Нидерландия [Nalta, 2012]

### 3.8 Стълбищни клетки

Предварителноизготвената ефирна конструкция на стълбищна клетка е с дебелина от 29 mm и размери - 4 m в дължина и 2 m височина. За направата и са използвани 1% стоманени фибри с цел увеличаване не само на носещата способност, но и дуктилността, удароустойчивостта и износоустойчивостта на конструкцията.

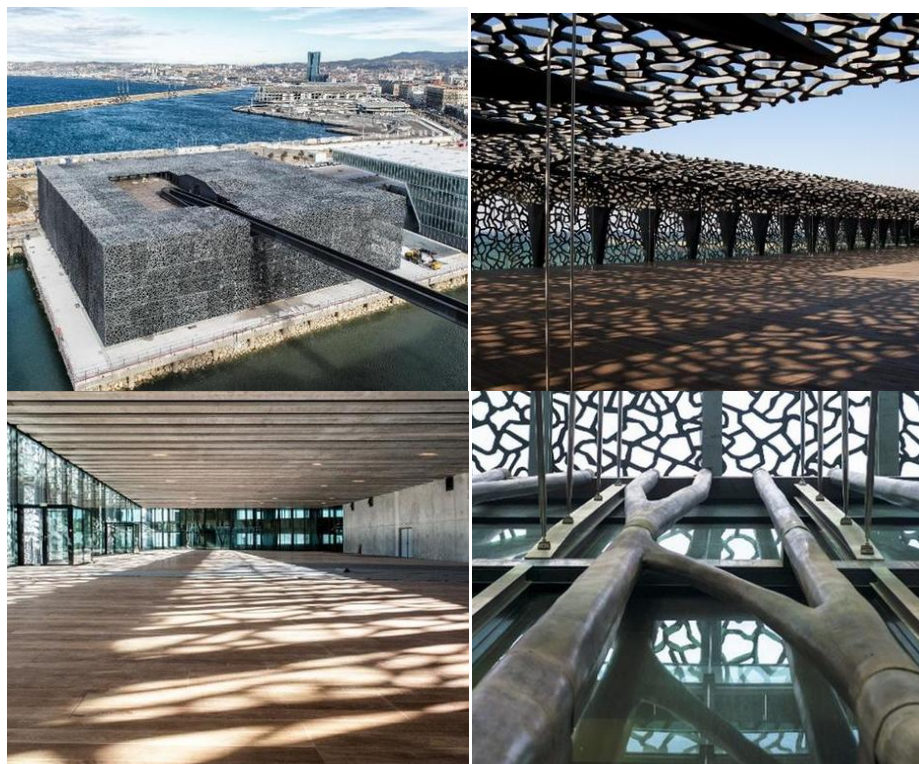


пр. 1 сн. 17: Стълбищна клетка, 2011, Германия [Drössler , 2012]

## 4. Първата в света сграда

След повече от десет годишен труд музеят на Европейските и Средиземноморски цивилизации в *Marseille* е открит от френския президент *Hollande* през 2013г. Музеят е разположен върху „Старото Пристанище” на града, с цел да покаже различията между двата континента и Средиземно море, което ги обединява. Проектът е дело на архитекта *Rudy Ricciotti*, който има дългогодишен опит с материала *Ductal*®. Негови са думите на откриването: *‘Нищо в тази конструкция не е чисто декоративно. Всеки елемент е носещ, като скелета на риба... Ние не знаем до къде ще ни отведе този материал, но той ще ни помогне да създадем света наново’*.

Това е първата в света уникална конструкция, изградена от предварително напрегнати колони от СВЯБ. Последователността на строителство е в обратен ред – първо са изградени междуетажните плочи, подпрени върху кофража и после са свързани към колоните. В резултат е реализирано огромно пространство без подпори. Един от подходите към музея, който и символично свързва морето със сушата, е чрез пътека с дължина 115 m на широчина 1,80 m, най-тънкостенната конструкция в света. Две от фасадите и покривът са съставени от 384 панела от материала *Ductal*®. Общото количество използван бетон за строителството е 15688 m<sup>3</sup>, като 711 m<sup>3</sup> от тях са СВЯБ. 308 е броят на колоните в сградата.

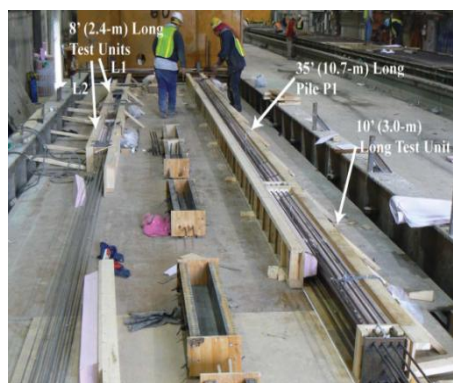


пр. 1 сн. 18: Музей на Европейските и Средиземноморски цивилизации (*MuCEM*), (2013), Франция [[www.ductal-lafarge.com](http://www.ductal-lafarge.com)]

## 5. Пилоти, тръби, колони, основи на съоръжения и глави на пробивни машини

### 5.1 Пилоти

През 2007 година започва мащабен проект за реализирането на пилоти, с различни напречни сечения и дължина, с цел прилагането им в строителството. Недостатъците на конвенционалните стоманобетонни и стоманени пилоти по отношение на корозионна и ударна устойчивост, отварят поле за внедряването на СВЯБ в тази сфера. Така са направени лабораторни образци от 2,4 метрови елементи, които последователно са изпробвани в натурни условия и са приложени в строителството.



пр. 1 сн. 19: Изливни пилоти (2007), САЩ [Voort, 2008]

## 5.2 Тръби

### 5.2.1 Тръби за отпадни води

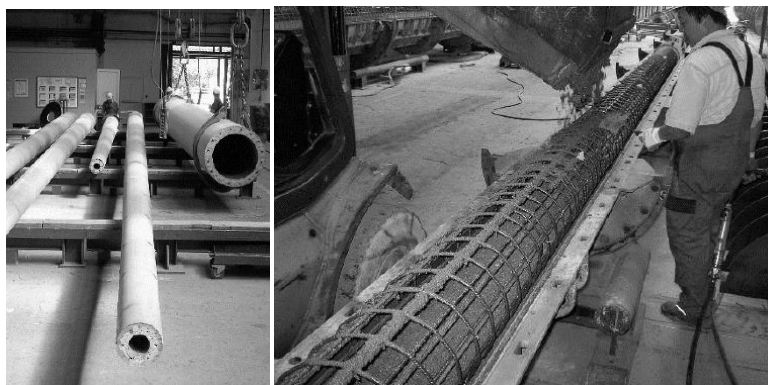
Едно от перспективните направления за внедряване на СВЯБ е в тръби за отпадни води. На снимката по-долу е показано редуцирано сечение на тръба, чиито размери са намалени повече от два пъти. Този пример нагледно илюстрира предимства на този материал по отношение на размерите на готовите продукти, което води до намаляване на цената, а в същото време увеличаване на дълготрайността.



пр. 1 сн. 20: Тръби за отпадни води [Voort, 2008]

### 5.2.2 Тръби за телекомуникационни нужди

Най-дългите изготвени на място тръби с дължина от 26 m и с редуцирана дебелина на елемента.



пр. 1 сн. 21: Тръби за телекомуникационни нужди: (2009), Германия [Adam, 2012]

## 5.3 Високи колони

Един от най-мощните проекти, свързан с изливането на място на СВЯБ, с марка *Ductal*®, изпълнен с цел разширяване на съществуваща конструкция чрез допълнителна поддържаща система. Излятите колони са с височина 16 m и диаметър само 32 cm.





пр. 1 сн. 22: 16 метрови високи колони: *Queen Sofia Museum* (2010), Испания [www.ductal-lafarge.com]

#### 5.4 Основи на турбини за производство на електроенергия чрез вятър намиращи се под вода

Производството на електроенергия чрез вятърни турбини разположени във вода дава над 30% по-висока скорост на задвижване на съоръжението, сравнено с тези разположени на сушата. Това обуславя нуждата от изграждане на фундаменти подложени на агресивното въздействие от солената вода. Използваният материал е на датската фирма *Densit*®, с търговско наименование *Ducorit*®. За реализирането на проекта са усвоени повече от 6 000 m<sup>3</sup> СВЯБ.



пр. 1 сн. 23: Основи на турбини за производство на електроенергия чрез вятър намиращи се под вода (2006), Дания [Moeller, 2008]

#### 5.5 Глави на пробивни машини

Най-често използваните пробивни машини за изготвяне на сондажи са от стомана. Едно ново предложение намира своето място в използването на СВЯБ за върхове на такъв вид техника, поради високите механични характеристики (с особен интерес якостта на натиск и срязване) и отличната си дълготрайност. Влагането на стоманени влакна му позволява дуктилно поведение и намалено пукнатинообразуване, с което се реализира обратност на върховата част.



пр. 1 сн. 24: Глави на пробивни машини: (2010), Германия [Ibuk, 2012]

## 6. Анкерни елементи

### 6.1 Анкерни плоскости

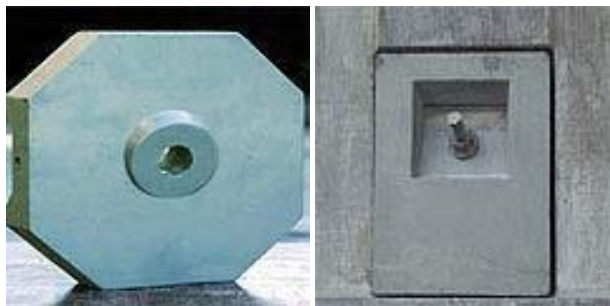
За укрепване на морския бряг на островите *Reunion* в Индийския океан са използвани 6300 анкерни плоскости. След технико-икономическата оценка на вложения материал е установено, че са намалени разходите с 18%. В същото време проучването е показало, че те не се нуждаят от поддръжка, сравнени с тези от стомана, с оглед на тяхното дълготрайно внедряване.



пр. 1 сн. 25: Анкерни плоскости за укрепителни стени: *Reunion islands* (2007), Френска колония [[www.ductal-lafarge.com](http://www.ductal-lafarge.com)]

### 6.2 Анкерни плочи

Едни от най-ранните приложения на СВЯБ е свързан с идеята за създаване на такъв материал, който да може да издържа на приложени големи вътрешни и външни напрежения на закотвящи устройства, като алтернатива на тези изготвени от стомана. Първите такива реализирани системи са на френската фирма *Reda*© през 1999 година. В последствие представителството на *Lafarge*© за Северна Америка предлагат своя продукт през 2007 и ги внедряват в по-отговорни съоръжения. В *Calgary*, Канада ги използват за пост-напрегнати, предварително изготвени системи за стени, които имат анкерни пилоти при устоите на мостови конструкции.



пр. 1 сн. 26: Анкерни плочи [Voort, 2008]

## 7. Усилващи репарационни слоеве

### 7.1 Усилване на колони

Възстановяване са стоманените колони на покрития басейн в *Amiens*, Франция, 2009 година, чрез обвиването им с бетонни кожуси от СВЯБ, армирани със стоманени фибри. Изборът на този нов вид материал е наложен от силно развитата корозия на стоманата, причинена от хлора, който се изпарява от басейна. Предварително направените опити показват, че дифузията на хлоридни йони в материала *Ductal*® е повече от 100 пъти по-малка.



пр. 1 сн. 27: Възстановяване на стоманени колони подложени на химическа корозия (2009), Франция [www.ductal-lafarge.com]

### 7.2 Усилване на устои на мостове

Извършено е усилване на стоманобетонните устои на моста *Valabres*, Франция, чрез поставяне на допълнителни 10 cm от материала *BSI-CeraCem*®. По този начин е подобрена носимоспособността, износостойчивостта и ударната якост.



пр. 1 сн. 28: Усилване на устои на мостове, *Valabres* (2003), Франция [SETRA, 2013]

Бетоновите работи са извършени „*in situ*“, без допълнителна топло-влажностна обработка. Изчисленията са на база на препоръките [SETRA, 2002].

### 7.3 Усилване на съществуващи греди на мост

Усилването е реализирано върху четири греди на моста *Le Mans*, Франция. Осъществено е допълнително налягане на стеблото на главните греди чрез СВЯБ със стоманени влакна. Последващото налягане е от вида 4Т15S и 7Т15S. Общият обем на усилената част е  $40\text{m}^3$ . Постигнатият модул на еластичност е над два пъти по-голям от този на обикновения бетон. Бетонирането е извършено „*in situ*“, без допълнителна топло-влажностна обработка. Уплътняването на бетона е реализирано без вибриране. Изчисленията са на база на препоръките [SETRA, 2002, 12].



пр. 1 сн. 29: Усилване на съществуващи греди на мост, *Le Mans* (2005), Франция [SETRA, 2013]

### 7.4 Усилване на язовирни стени

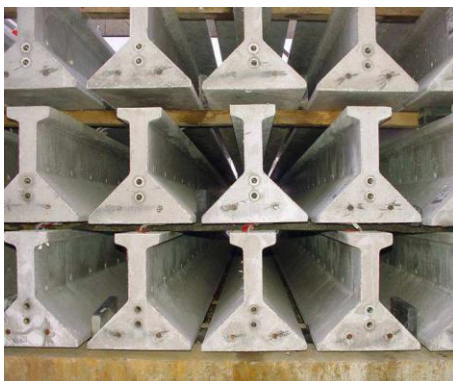
Дванадесет години след направения ремонт на язовира *Caderousse* във Франция, през 2009 е извършена повторна репарация, поради образували се пукнатини с обща дължина от 176 m. Повърхностният слой е силно компрометиран, поради силно абразивното въздействие на което е подложен, с намалено напречно сечение от 2 до 30 cm на отделни места и силно оголена армировка. Направени са натурни изпитвания с речен пясък, чакъл и отпадни продукти, които се носят от реката *Rhône*, за изпитване на абразивното действие, причинено от изтриваемост и износоустойчивост от вложения материал *Ductal*©.



пр. 1 сн. 30: Възстановяване на язовирни стени подложени на абразивни въздействия: *Caderousse* (2009), Франция [www.ductal-lafarge.com]

### 7.5 Усилване на земни откоси

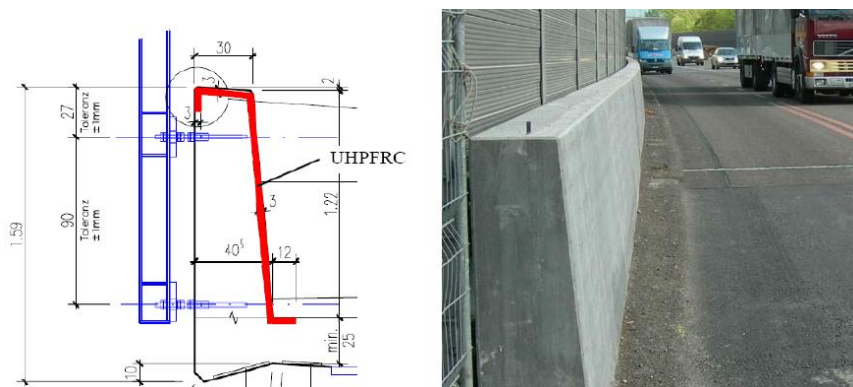
За реализирането на 10 метрова укрепителна стена са направени 105 предварително изготвени колони, с предварително напрегната армировка в тях. Общият обем на влакнесто армирания СВЯБ с  $20 \text{ m}^3$ , като е използван готовия продукт BSI-CeraCem®. Осъществена е повече от пет пъти редукция на напречното сечение на елементите, както и значително са намалени земните работи, свързани с изкопаване и уплътняване. Изчисленията са на база на препоръките [SETRA, 2002, 12].



пр. 1 сн. 31: Предварително напрегнати колони за усилване на земни склонове на жп път (2005), Франция [SETRA, 2013]

### 7.6 Рехабилитация на защитни огради покрай скоростни пътища

Целта е да бъдат заздравени онези зони от конструкцията, които са изложени на сурови външни въздействия, в следствие комбинираното действие на атмосферните условия, химично и механично въздействия от движението по тежко натоварените пътища.



пр. 1 сн. 32: Рехабилитирани огради покрай скоростни пътища (2007), Швейцария [Brühwiler, 2008]

### 7.7 Запълване на фуги на мостови конструкции

Мостовата конструкция се състои от предварително изготвени панели със запълване на фугите между тях от СВЯБ. Пет години по-късно, през 2011 г., при направеният оглед не са открити никакви следи от разрушение по материала или отваряне на фугите, въпреки много суровия климат по тези географски ширини. След този успешен проект, СВЯБ е използван за изпълнение на още няколко различни мостови конструкции в зоната на връзката между панелите им.



пр. 1 сн. 33: Запълване на фуги на мостови конструкции: *Overhead Bridge* (2006), Канада [Young, 2012]

## 8. Архитектурни елементи

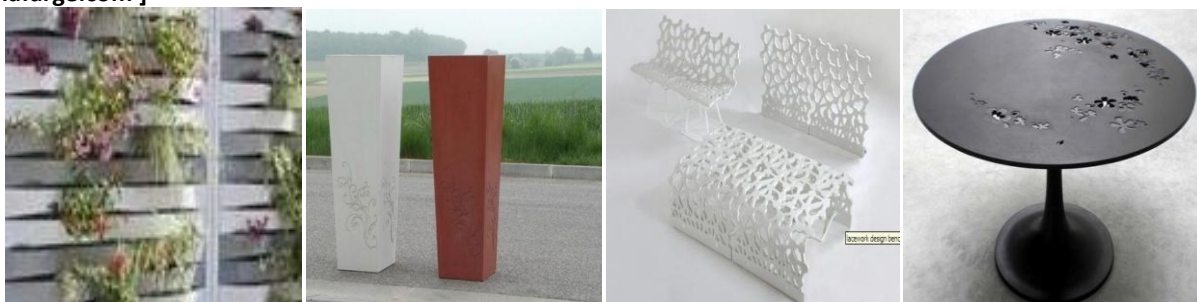
СВЯБ, като нов материал в строителството, провокира голям интерес сред иновативните архитектурни решения, по отношение на дизайн и функционалност. Следващите илюстрации показват размаха на човешкото въображение.



пр. 1 сн. 34: Фасадни панели, фасади на сгради, слънце защитни сенници, архитектурни паметници [www.ductal-lafarge.com]



пр. 1 сн. 35: Стълбища, настилки, вътрешни облицовъчни панели, интериорни камини [www.ductal-lafarge.com]



пр. 1 сн. 36: Екстериорни стенни пана, саксии за цветя, пейки и столове, маси и др. [www.ductal-lafarge.com]

Други реализирани приложения на СВЯБ са свързани с изграждането на конструкции устойчиви на земетръсно въздействие, чрез предварителна напрегнати сферични куполи с последващо напрегнати дъгови греди; бункери с гореща вода за съхраняване на соларна енергия; тежко натоварени писти; крайбрежни съоръжения за укрепване на брегове и др. Едни от перспективните направления за реализиране на СВЯБ са в минната и военна индустрия, тунелното дело, звукоизолационни стени, контейнери и тръби за съхранение на радиоактивни отпадъци и материали, газови цистерни, защитни стени на бункери, тежко натоварени индустриални подове и транспортни пътища, бариери срещу наводнения, рехабилитация на сгради и др.

## ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА:

**Voort.** Th. L., Suleiman M. T., Sritharan S.: Design and Performance Verification of Ultra-High Performance Concrete for Deep Foundations, *Final Report*, November **2008**;

<http://www.planete-tp.com/en/peace-bridge-in-seoul-a892.html> (последно посетено на 03.01.2014)

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:New-Papatoetoe-Ralway-Stati.png> (последно посетено на 03.01.2014)

<http://www.ductal-lafarge.com/> (последно посетено на 03.01.2014)

<http://en.structurae.de/structures/data/photos.cfm?id=s0012224&min=0> (последно посетено на 03.01.2014)

**Randl** N., Pichler A., Schneider W., Juhart J.: Study on the Application of UHPC for Precast Tunnel Segments, *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 07-09, **2012**, Pages 981-988;

**Nalta** R. F., Hansen T B: Ultra thin Hi-Con Balconies – First Application in Holland, *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 07-09, **2012**, Pages 1005-1010;

**Drössler** T.: Architectural Concrete with UHPC for façades and interior design-recent application in Germany, *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 07-09, **2012**, Pages 989-996;

**Adam T., Ma J.:** Development of an Ultra-High Performance concrete for precast spun concrete columns, *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 07-09, **2012**, Pages 841-848;

**Moeller A:** Use of UHPC in offshore wind turbine foundations, *Proceeding of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages 863-869;

**Ibuk H., Beckhaus K.:** Ultra High Performance Concrete for Drill Bits in Special Foundation Engineering, *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 07-09, **2012**, Pages: 807-811;

**AFGC/SETRA:** Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes. Recommendations. Documentes scientifiques et techniques, *In Association Française de Génie Civil, SETRA, Bagneux Cedex*, June **2013**, Pages: 1-318;

**AFGC/SETRA:** Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes. Recommendations. Documentes scientifiques et techniques, *In Association Française de Génie Civil, SETRA, Bagneux Cedex*, **2002**;

**Brühwiler E., Denarié E.:** Rehabilitation of concrete structures using Ultra-High Performance Fiber Reinforced concrete, *Proceeding of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 05-07, **2008**, Pages: 895-902;

**Young W., Boparai J., Perry V., Archibard B., Salib S.:** Whiteman Creek Bridge – a Synthesis of Ultra High Performance Concrete and Fiber Reinforced Polymers for Accelerated Bridge Construction, *Proceeding of the Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March, 07-09, **2012**, Pages: 849-856;





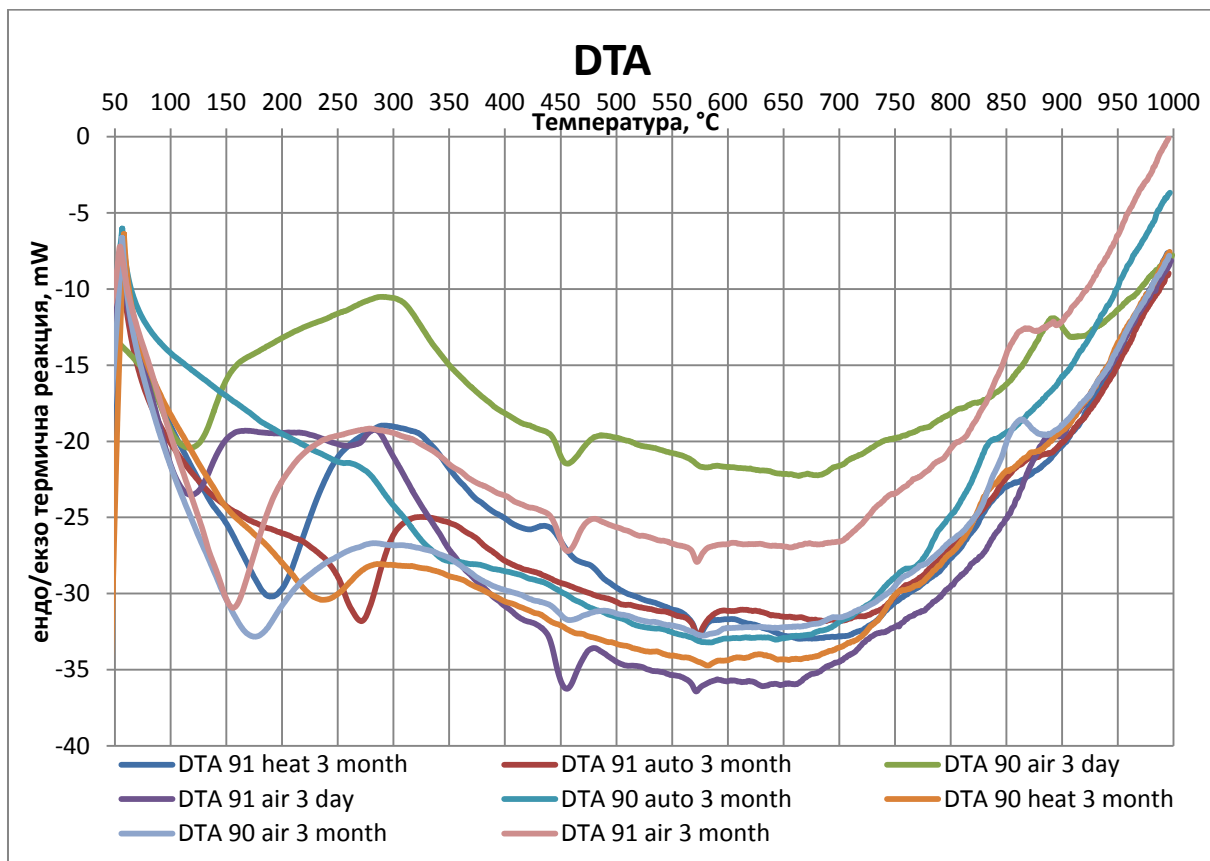
## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### РЕЗУЛТАТИ ОТ ДТА/ТГ/ДТГ, ЖИВАЧНА ПОРЪОЗИМЕТРИЯ И СЕМ

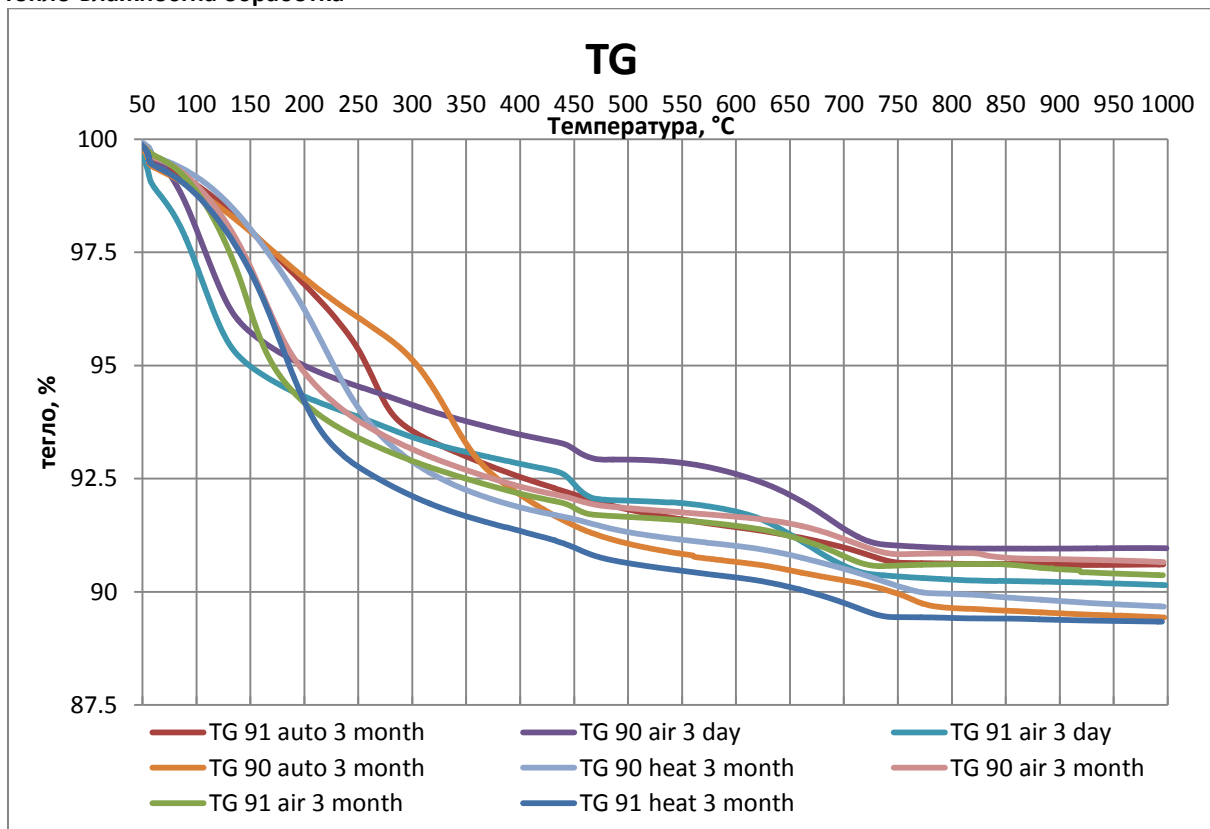
#### 1. ДТА

Използвани състави:

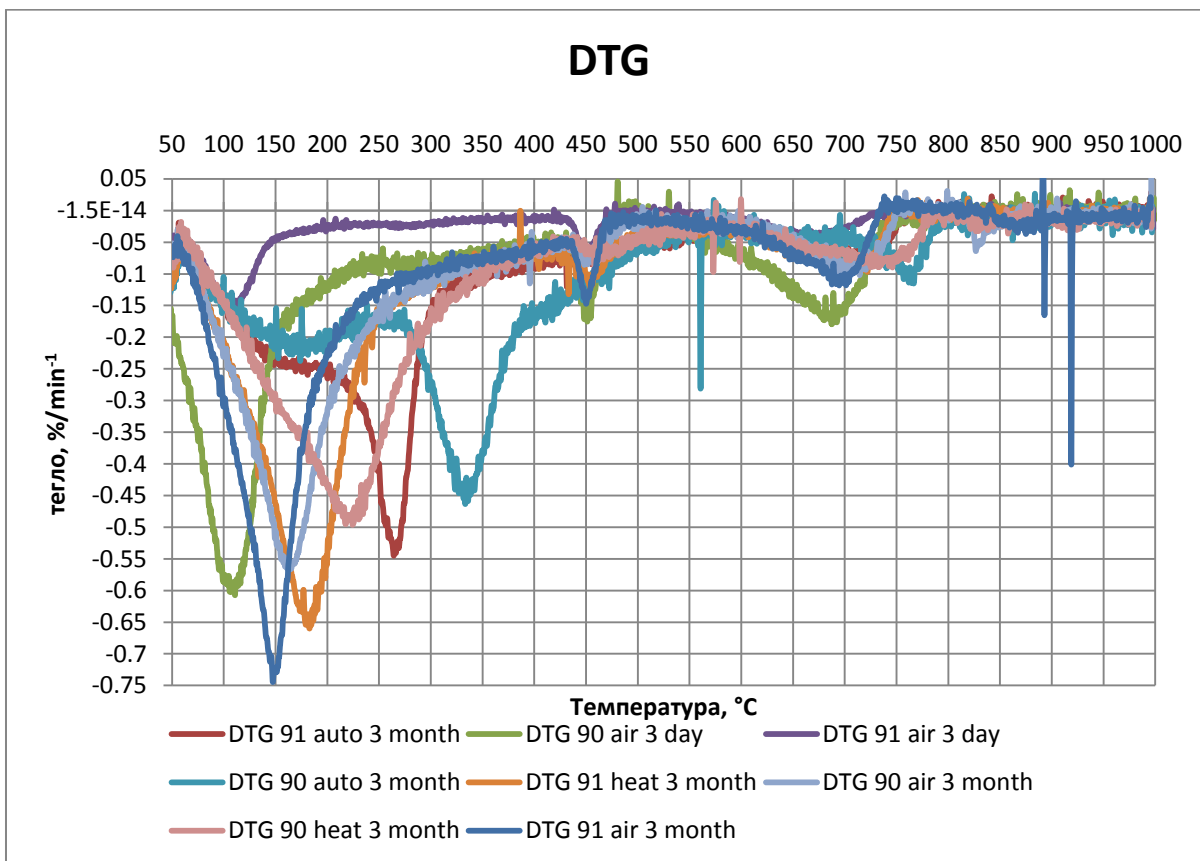
Състав	Работни обозначения на изпитаните пробни тела			
	възраст	въздух	пара	автоклав
<u>90 състав</u> <i>(оптимален):</i> Ц=930 kg МСП=279kg П=3x200 kg Брашно=370 kg Вода=186 l СП=37,2 ml	3 ден	90 air 3 day	-	-
	3 месец	90 air 3 month	90 heat 3 month	90 auto 3 month
<u>91 състав (моделен):</u> Ц=840 kg МСП=168 kg П=1180 kg Вода=184,8 l СП=21 ml	3 ден	91 air 3 day	-	-
	3 месец	91 air 3 month	91 heat 3 month	91 auto 3 month



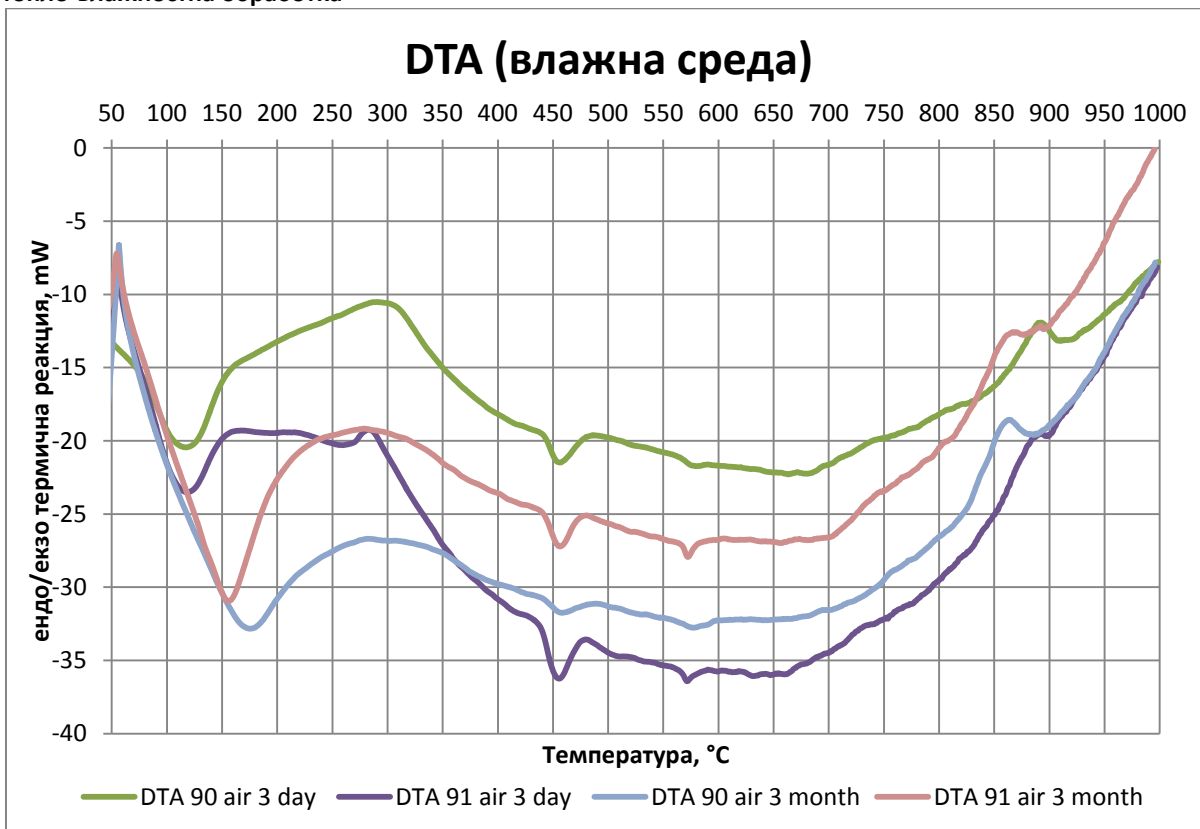
пр. 2 фиг. 1: ДТА анализ на оптимален и моделен състав на различна възраст и след различна топло-влажностна обработка



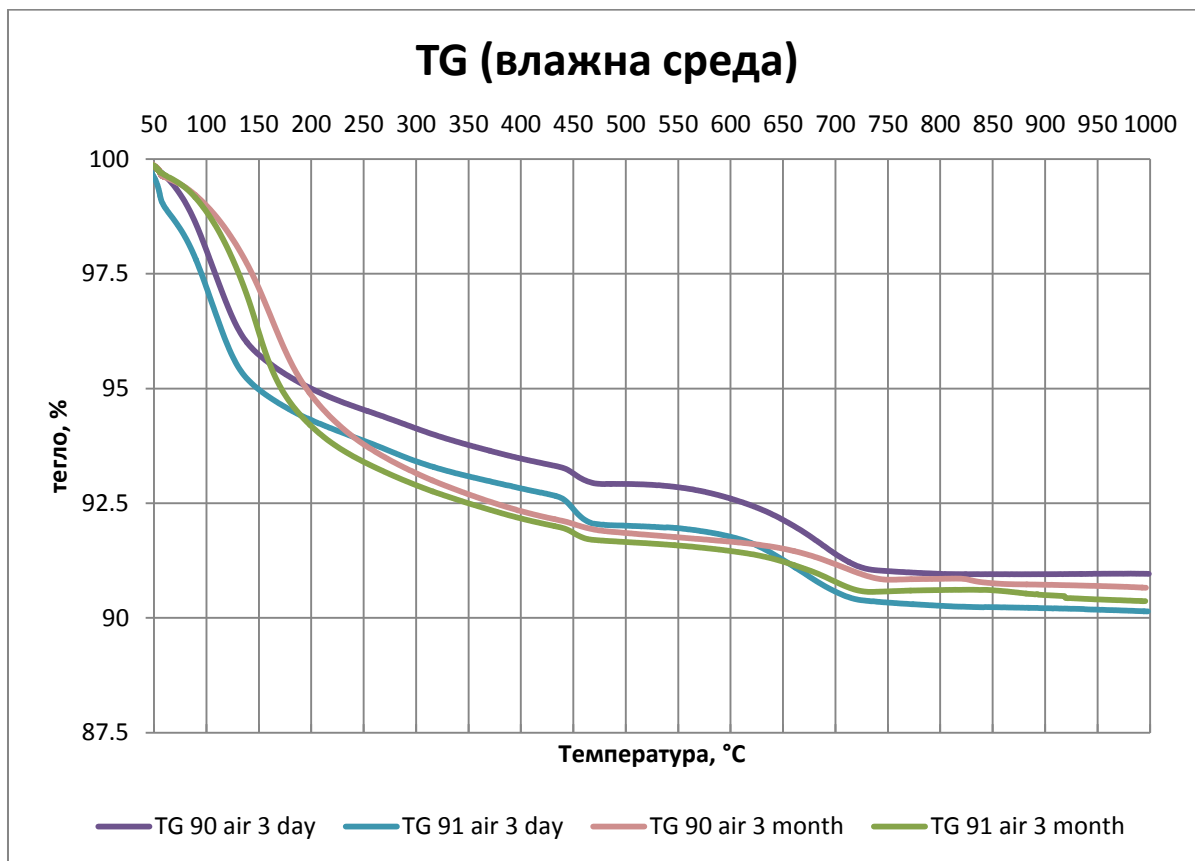
пр. 2 фиг. 2: ТГА анализ на оптимален и моделен състав на различна възраст и след различна топло-влажностна обработка



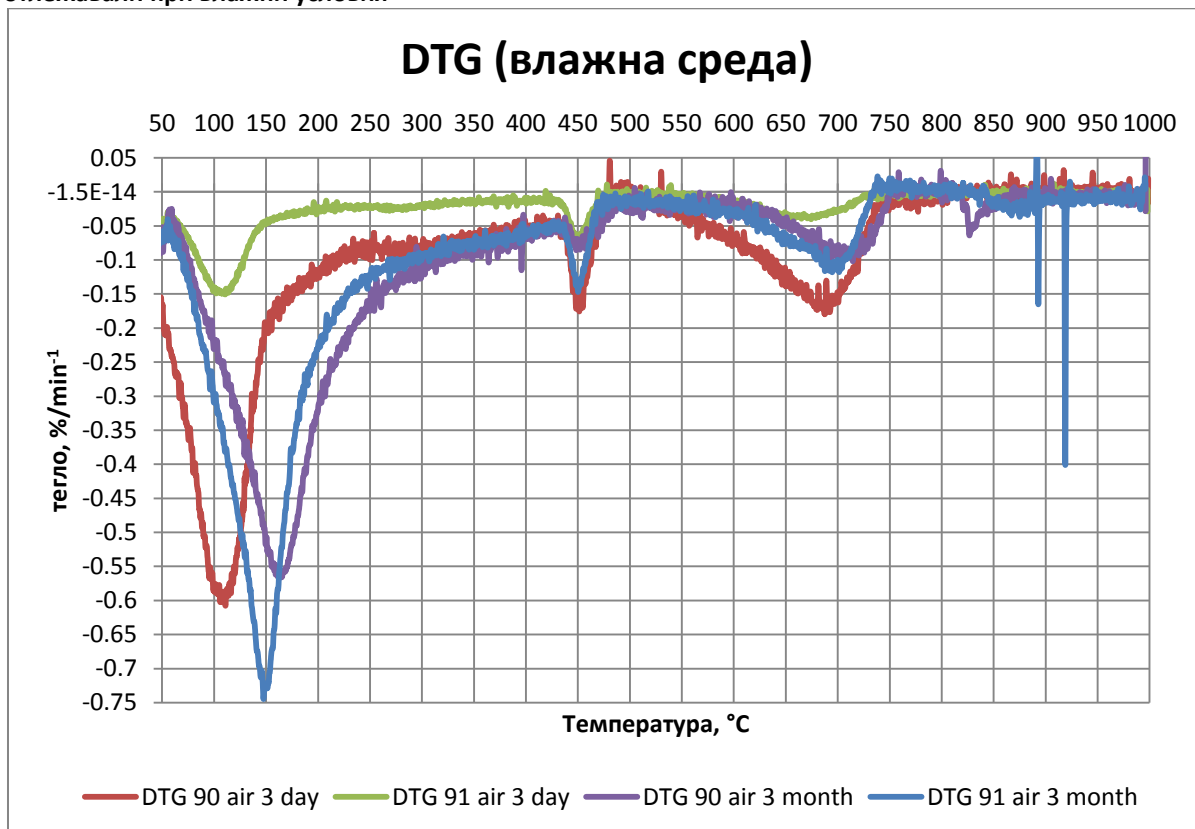
пр. 2 фиг. 3: ДТГА анализ на оптимален и моделен състав на различна възраст и след различна топло-влажностна обработка



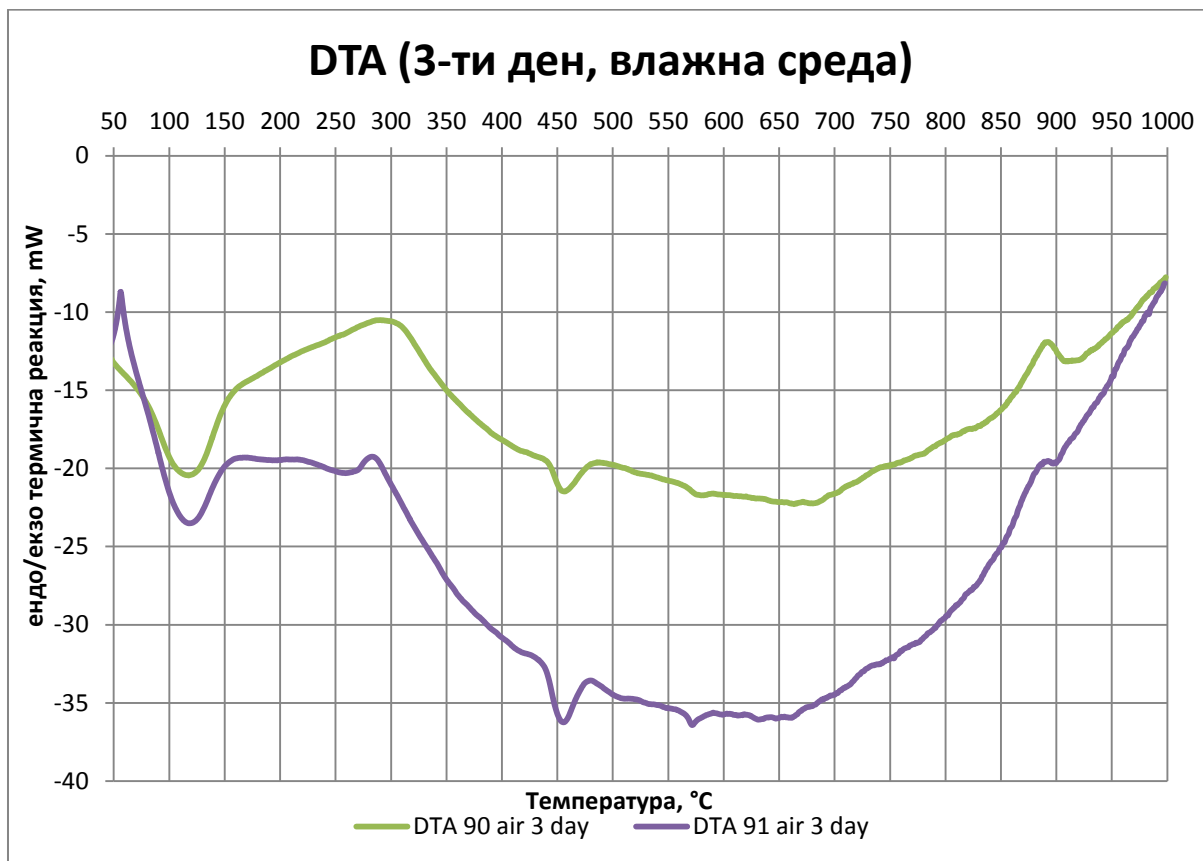
пр. 2 фиг. 4: ДТА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на различна възраст и отлежавали при влажни условия



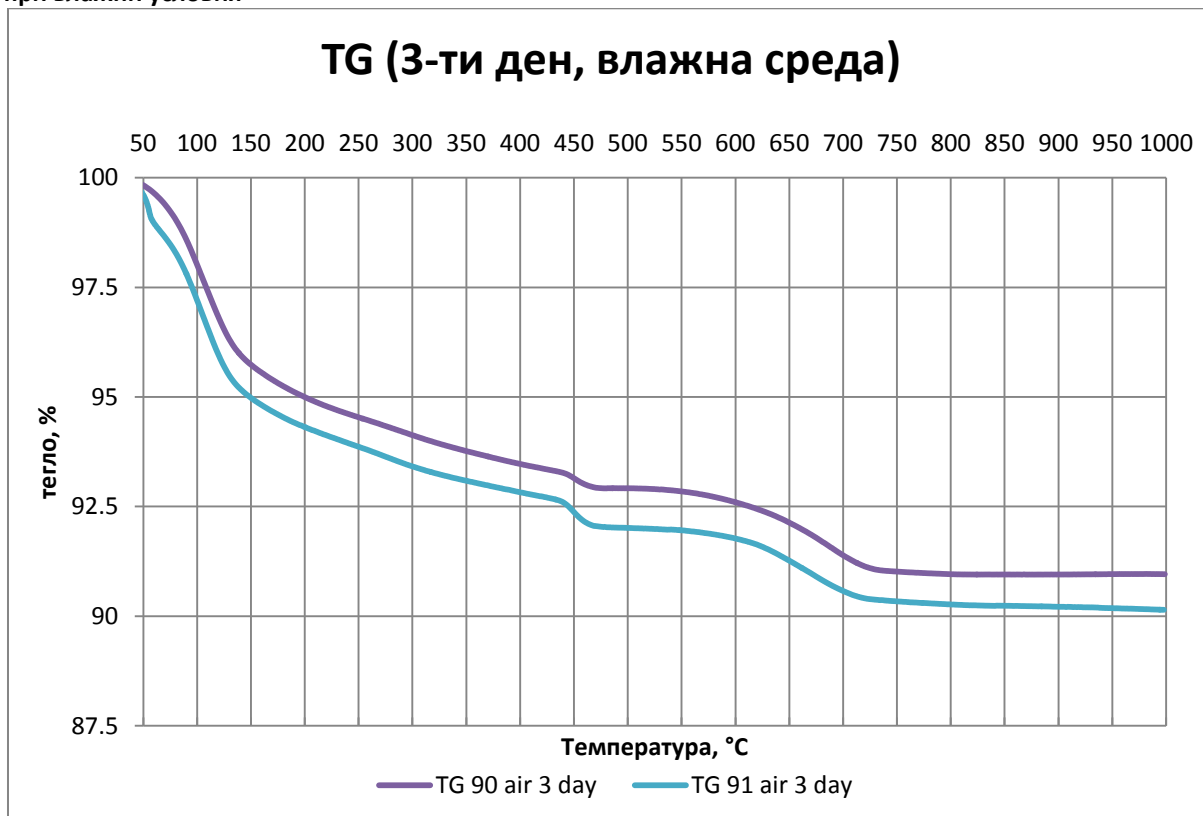
пр. 2 фиг. 5: ТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на различна възраст и отлежавали при влажни условия



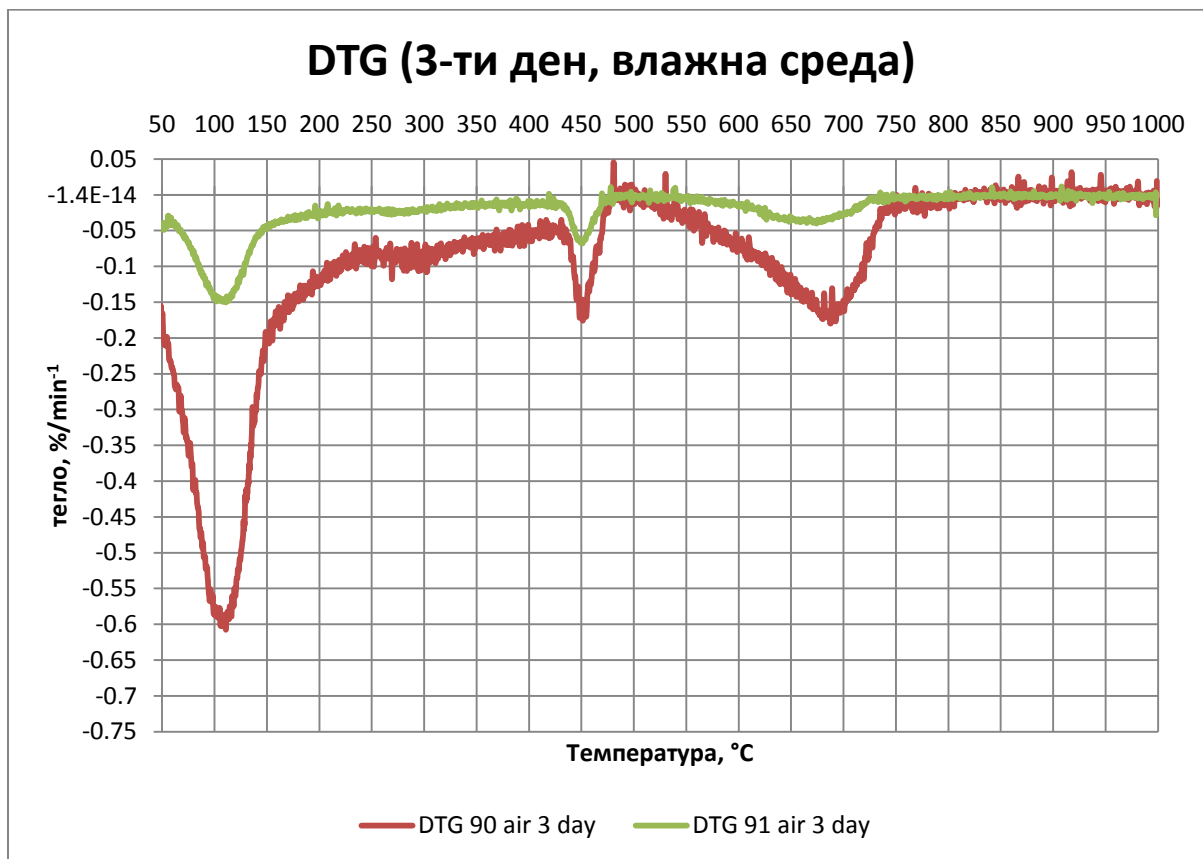
пр. 2 фиг. 6: ДТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на различна възраст и отлежавали при влажни условия



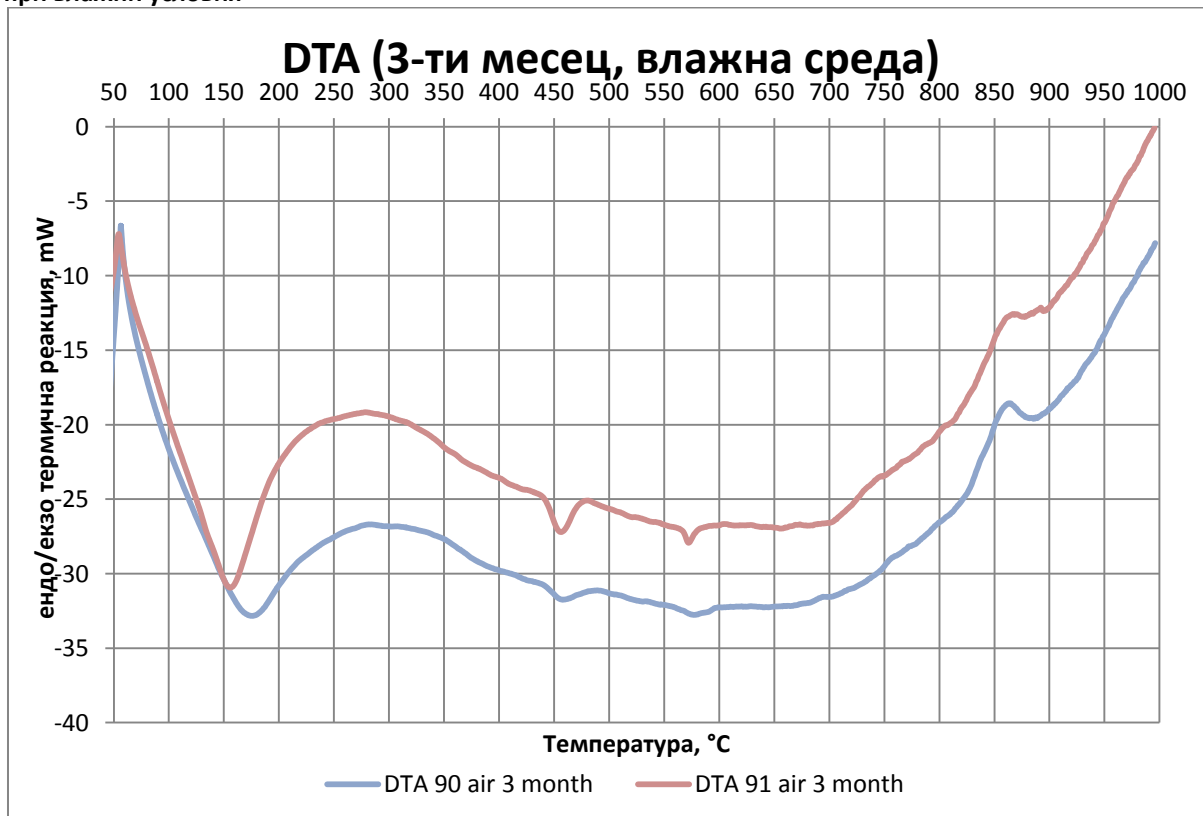
пр. 2 фиг. 7: ДТА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден, отлежавали при влажни условия



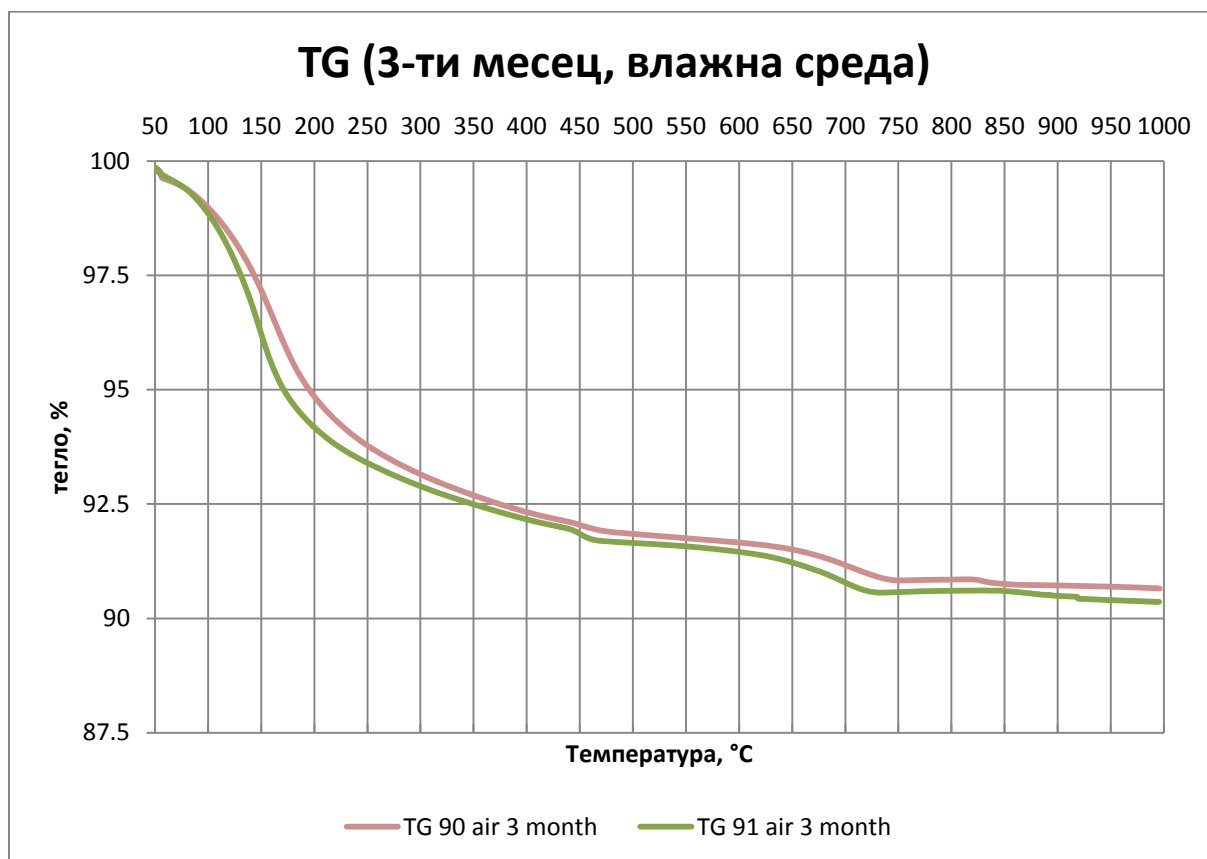
пр. 2 фиг. 8: ТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден, отлежавали при влажни условия



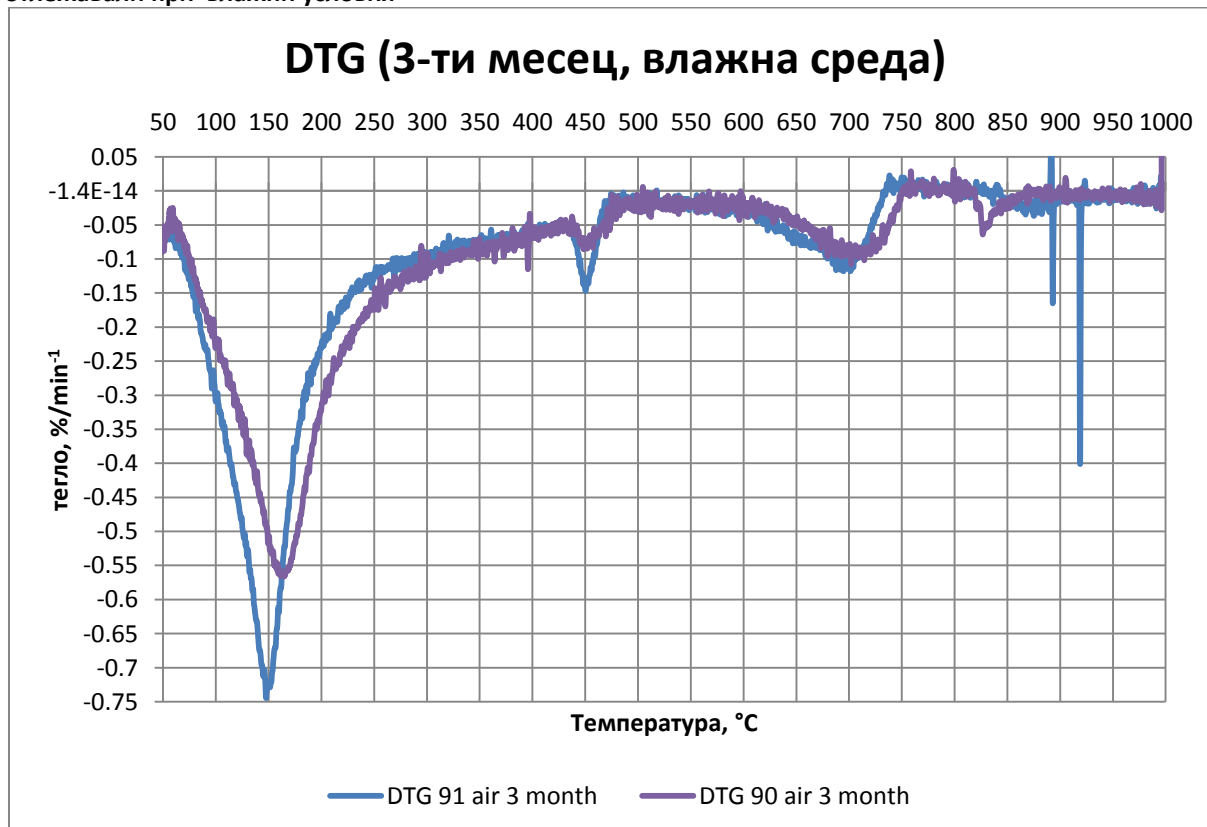
пр. 2 фиг. 9: ДТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден, отлежавали при влажни условия



пр. 2 фиг. 10: ДТА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти месец, отлежавали при влажни условия

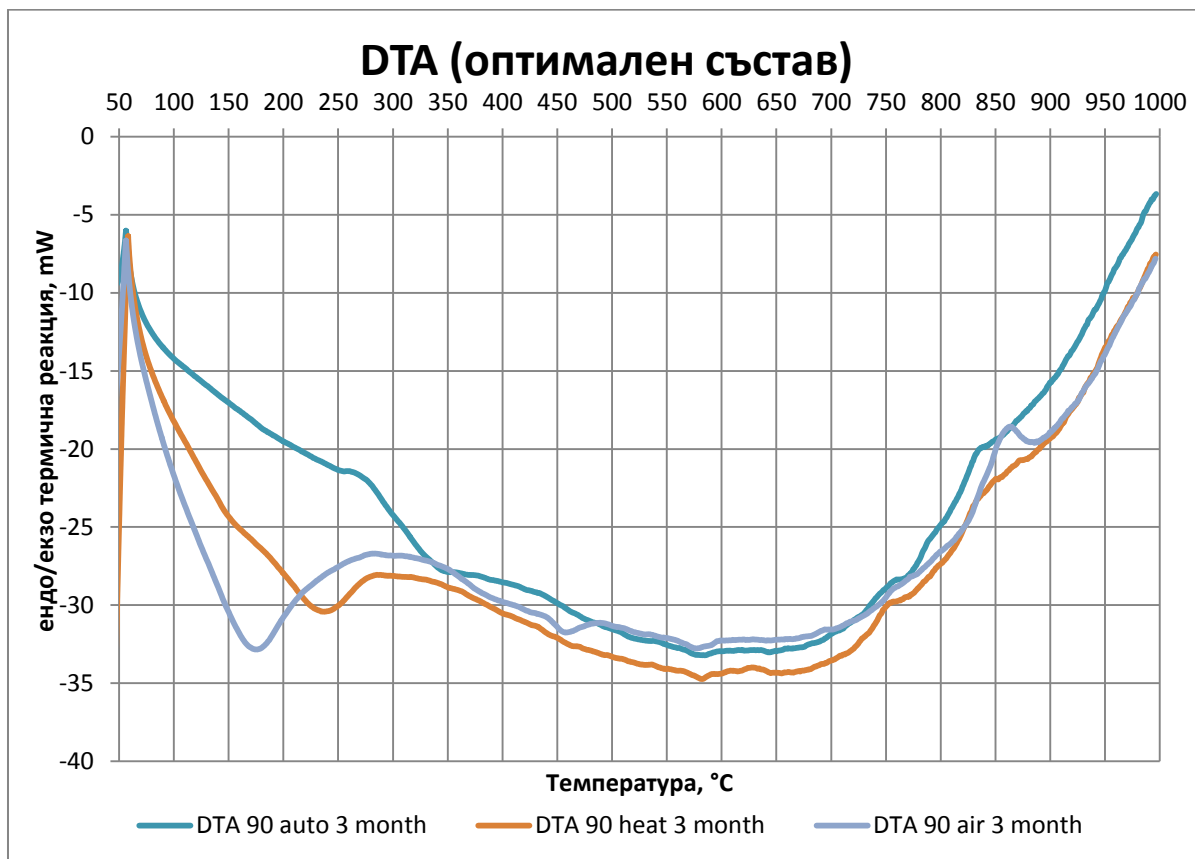


пр. 2 фиг. 11: ТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти месец, отлежавали при влажни условия

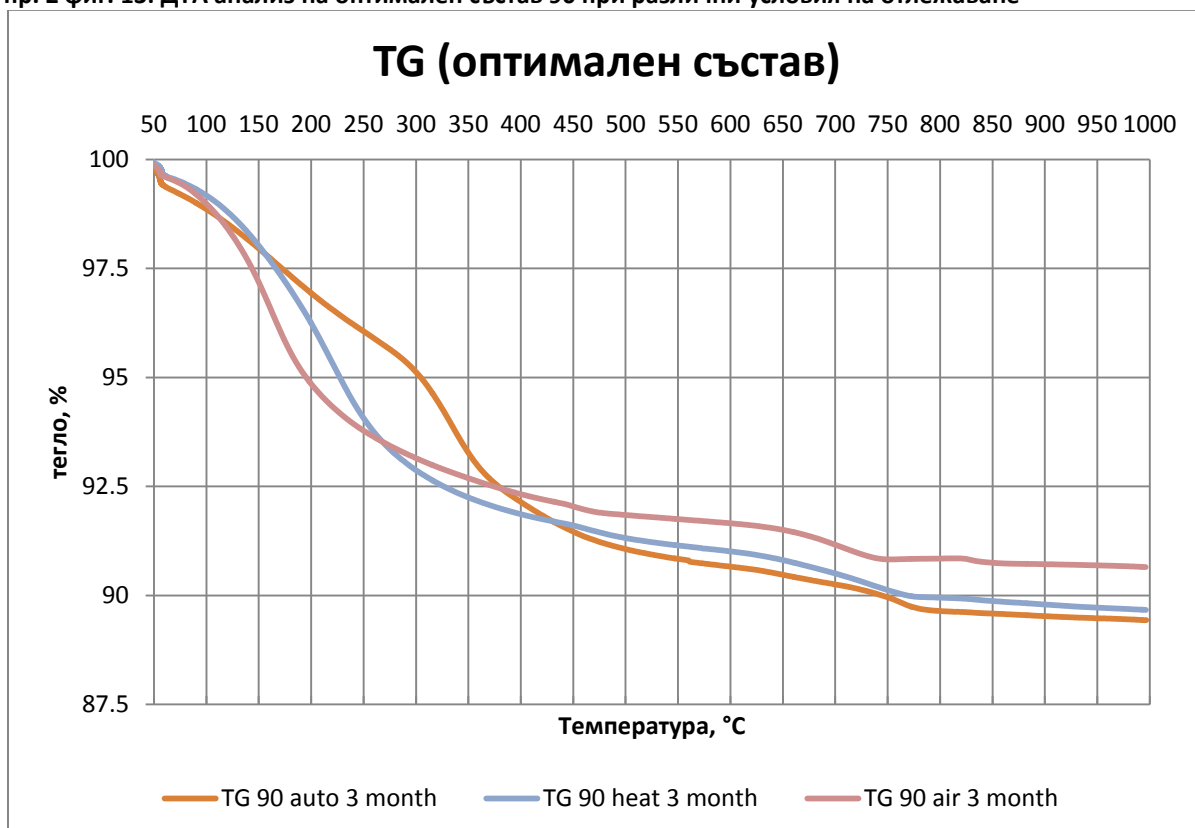


пр. 2 фиг. 12: ДТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти месец, отлежавали при влажни условия

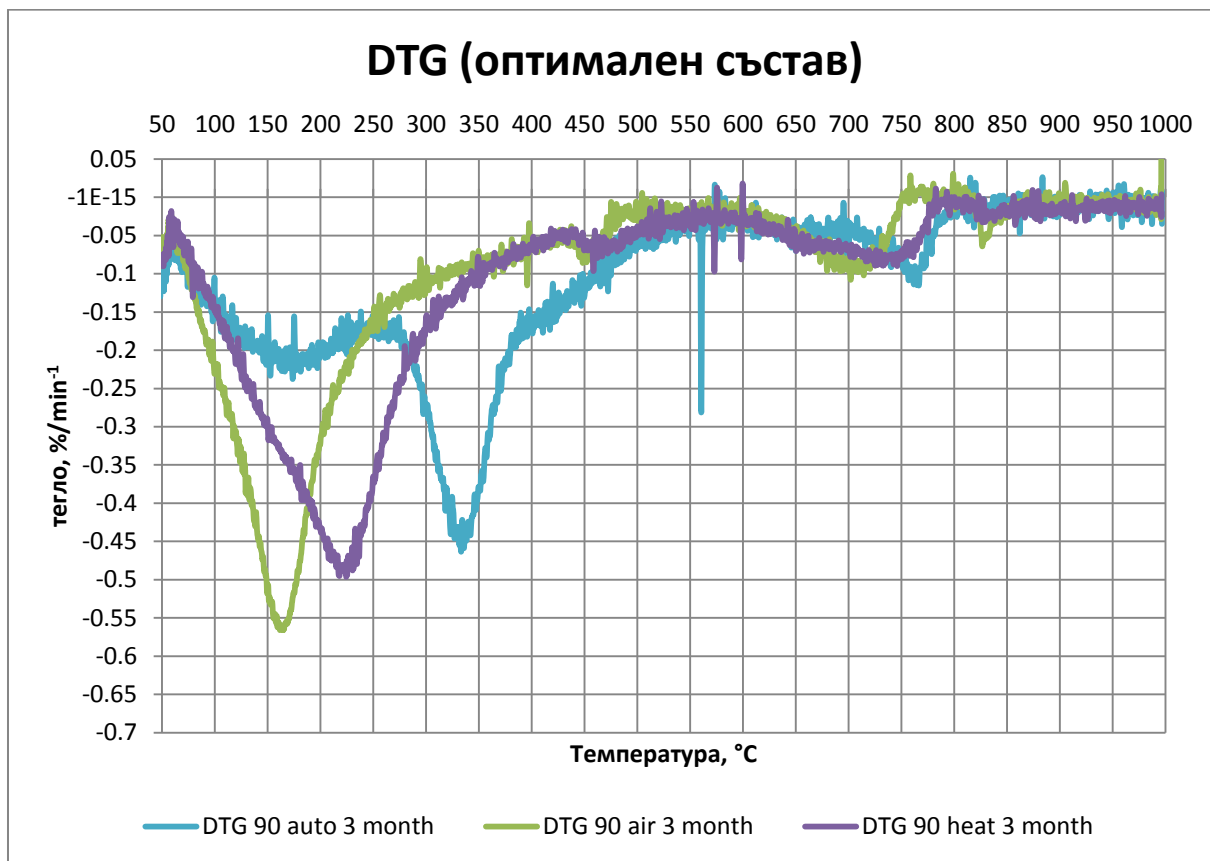




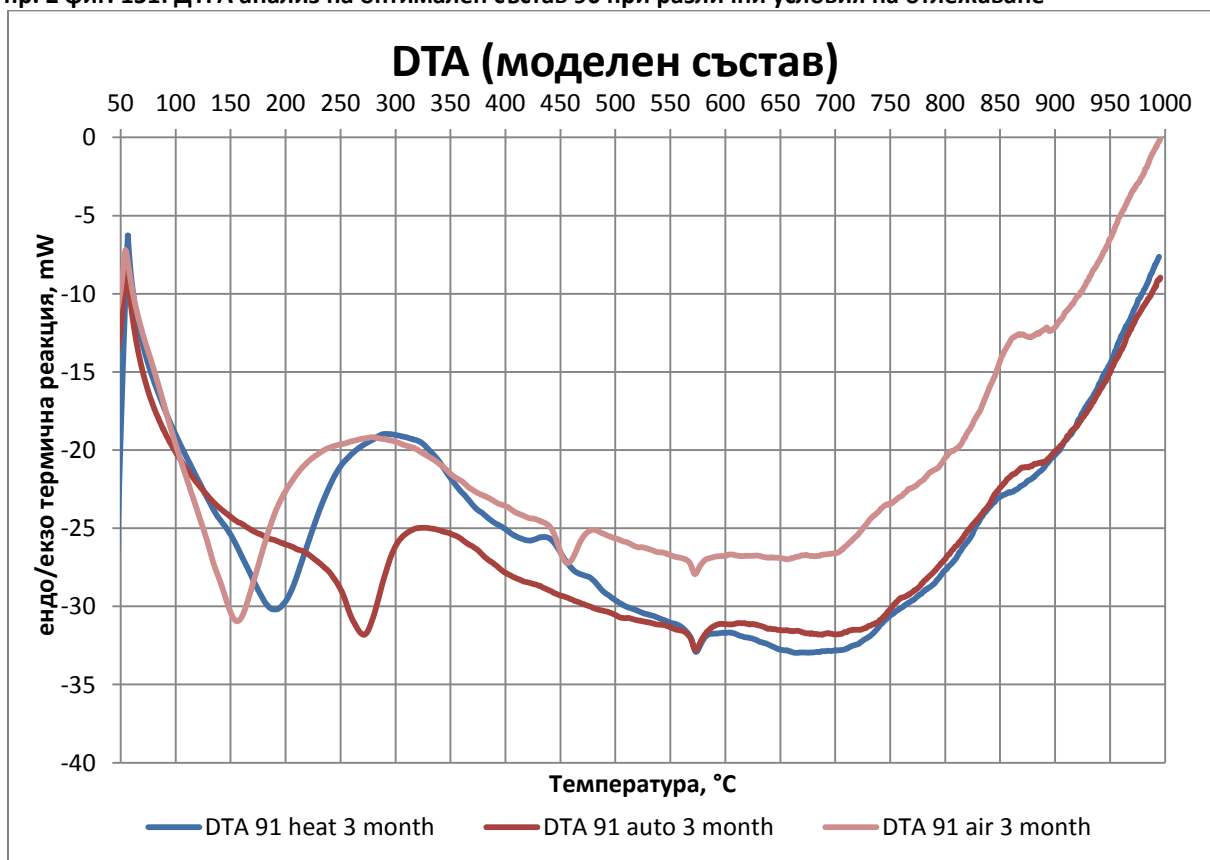
пр. 2 фиг. 13: ДТА анализ на оптимален състав 90 при различни условия на отлежаване



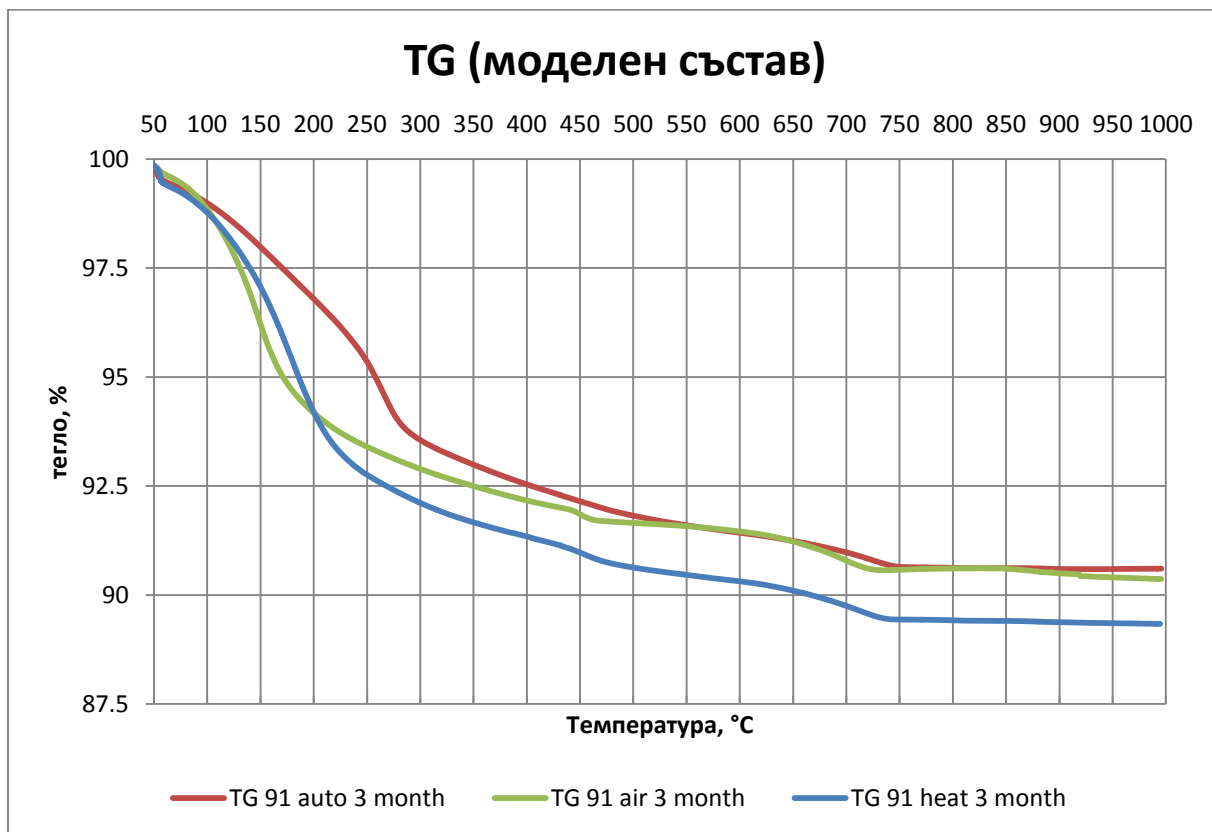
пр. 2 фиг. 14: ТГА анализ на оптимален състав 90 при различни условия на отлежаване



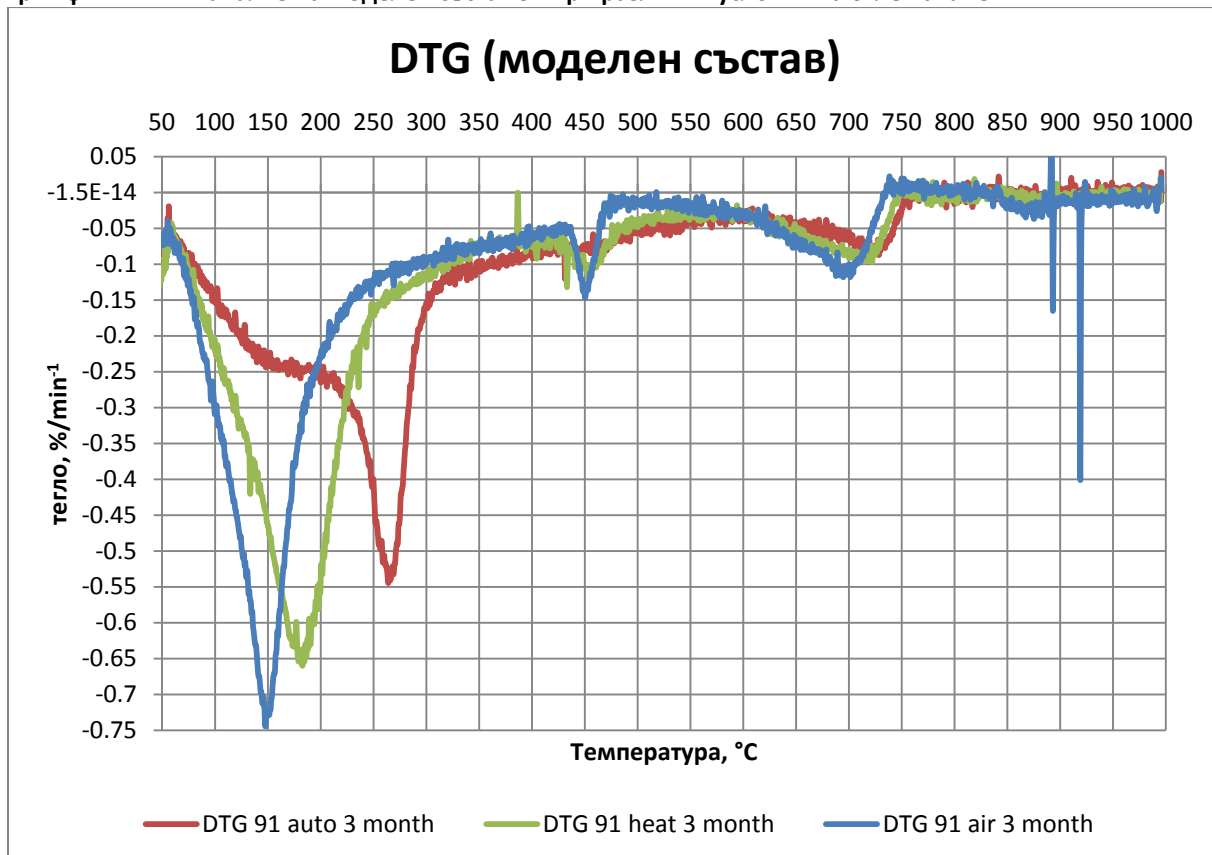
пр. 2 фиг. 151: ДТГА анализ на оптимален състав 90 при различни условия на отлежаване



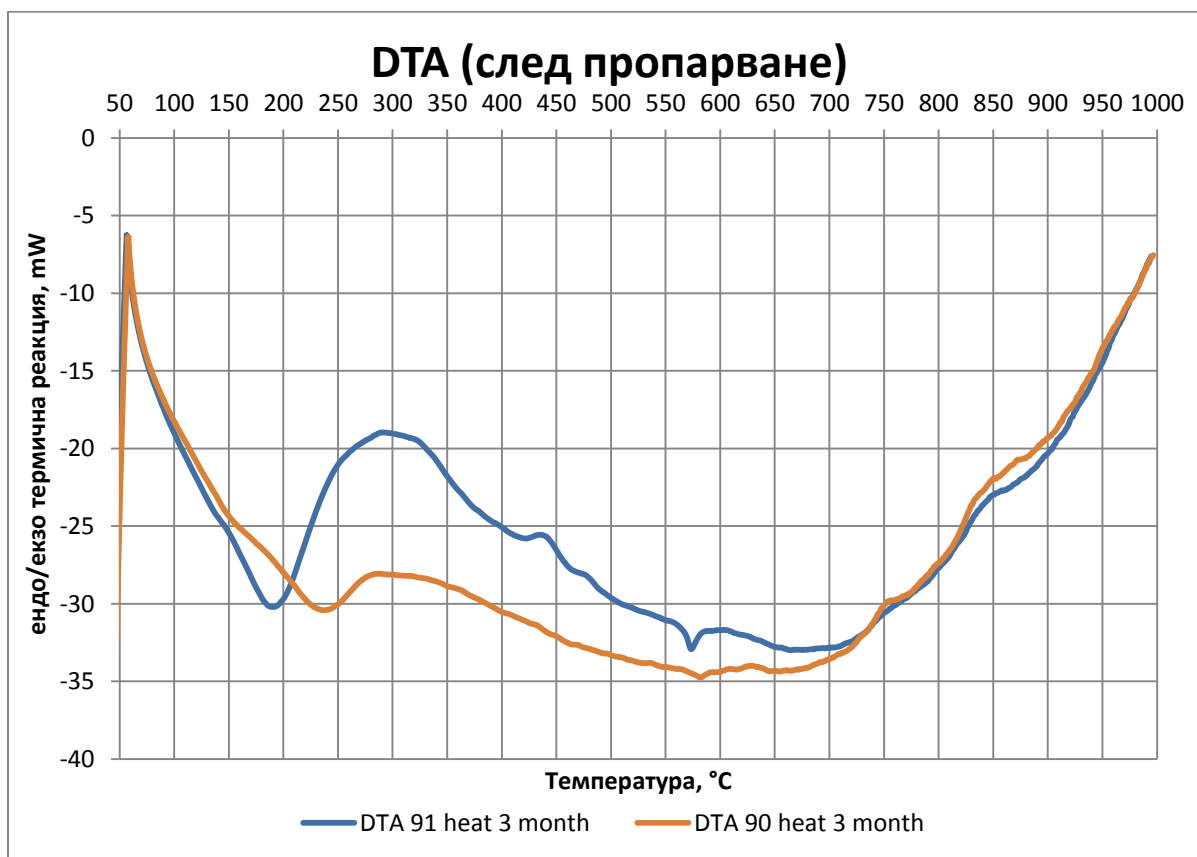
пр. 2 фиг. 16: ДТА анализ на моделен състав 91 при различни условия на отлежаване



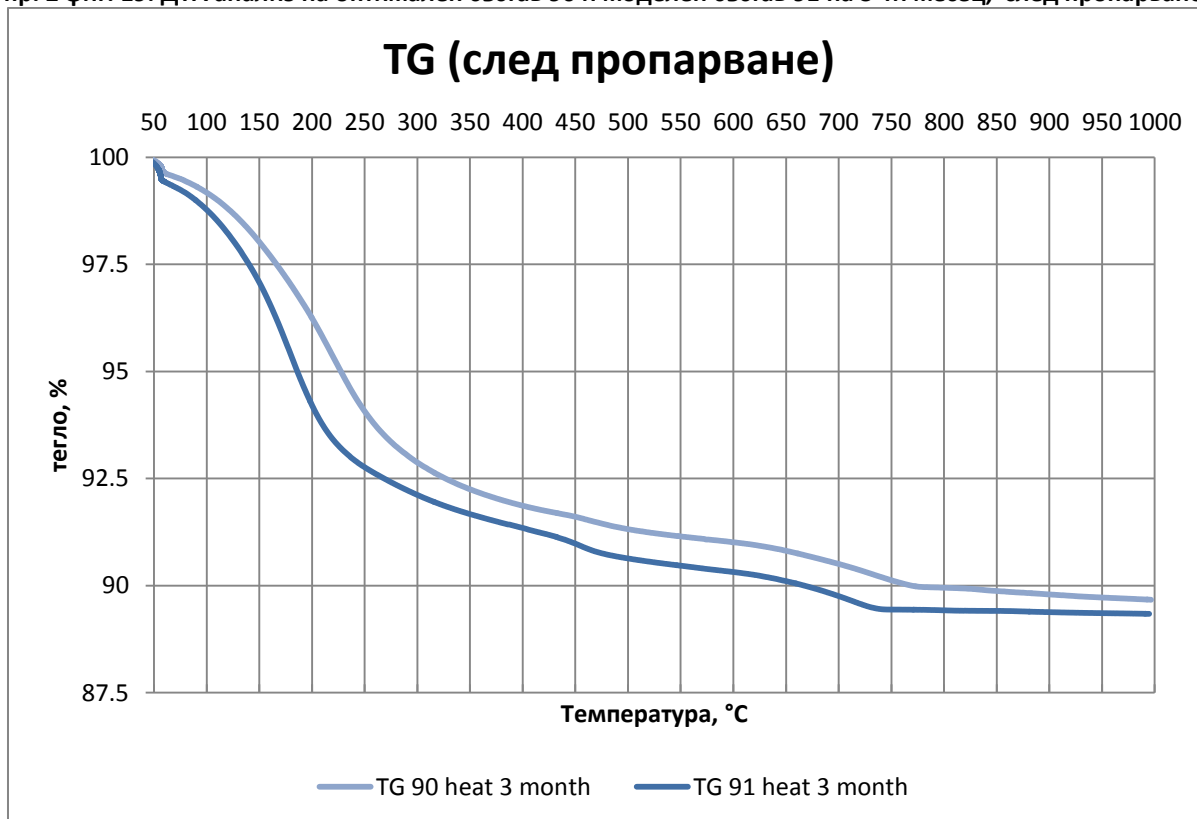
пр. 2 фиг. 17: ТГА анализ на моделен състав 91 при различни условия на отлежаване



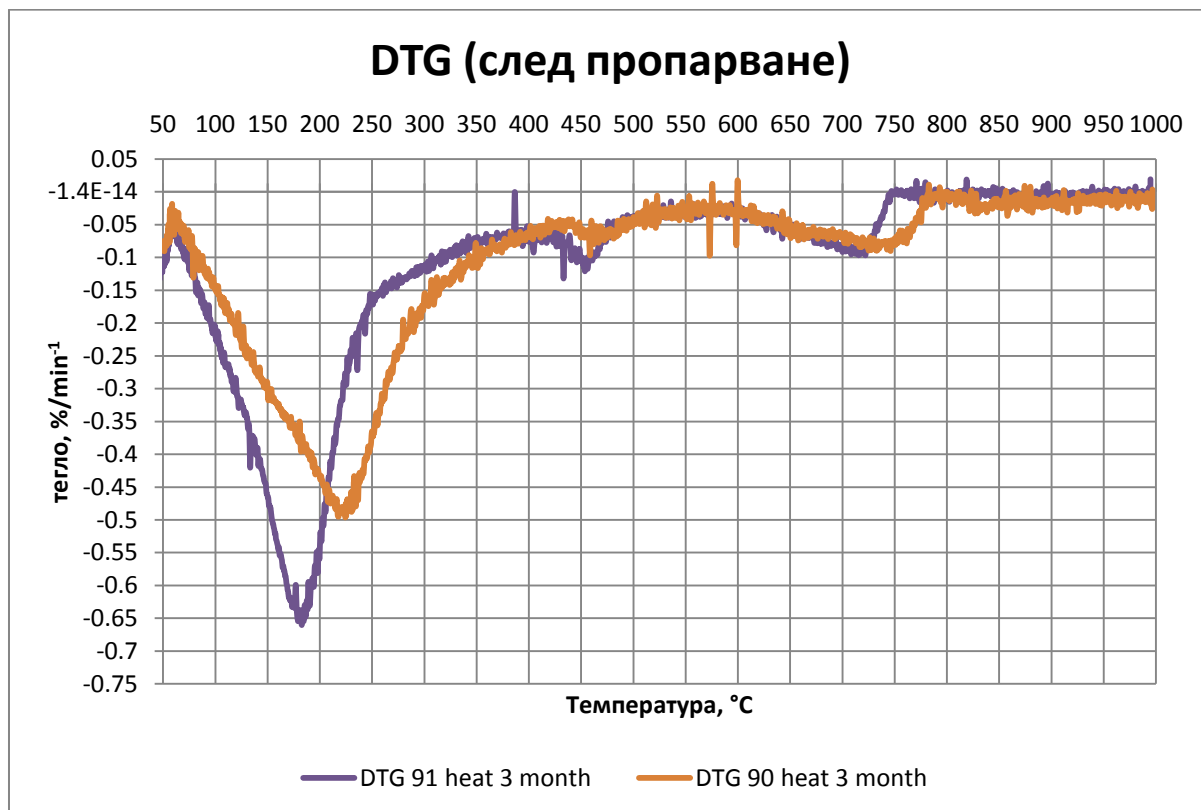
пр. 2 фиг. 18: ДТГА анализ на моделен състав 91 при различни условия на отлежаване



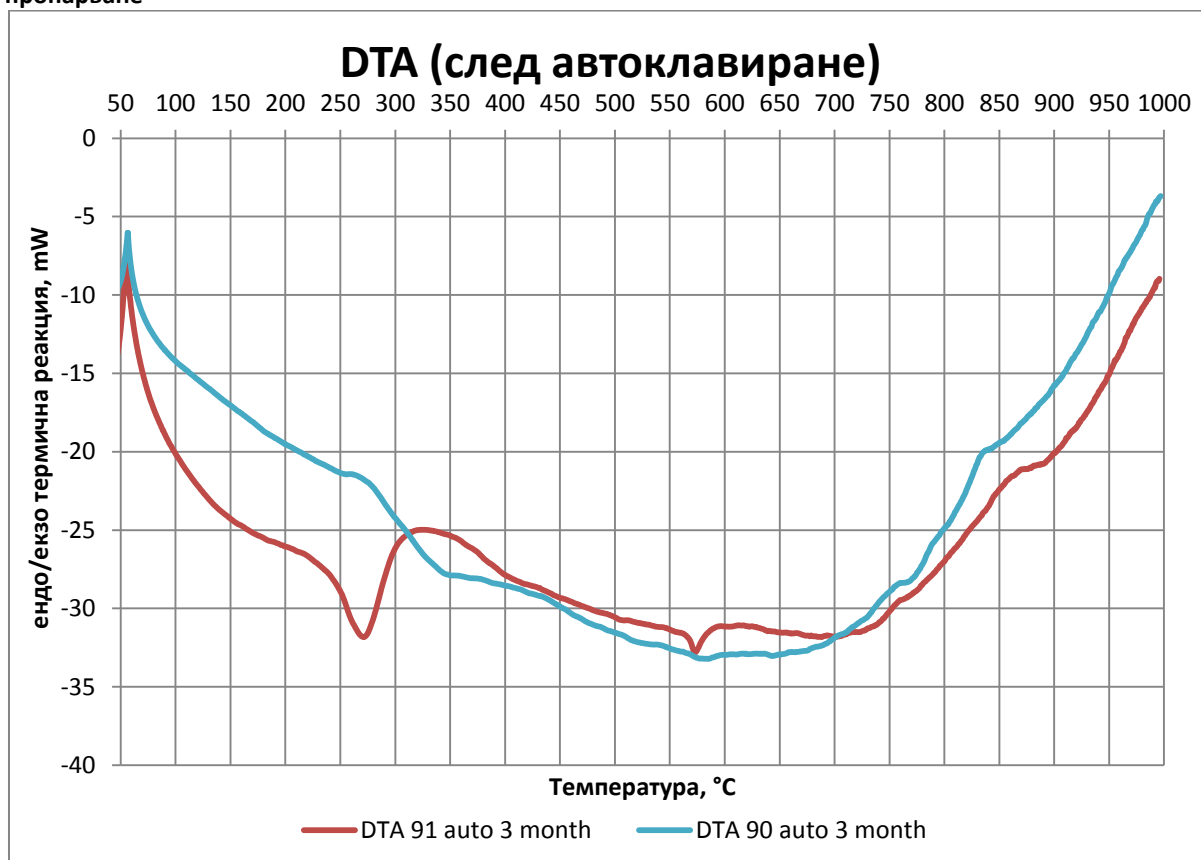
пр. 2 фиг. 19: ДТА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти месец, след пропарване



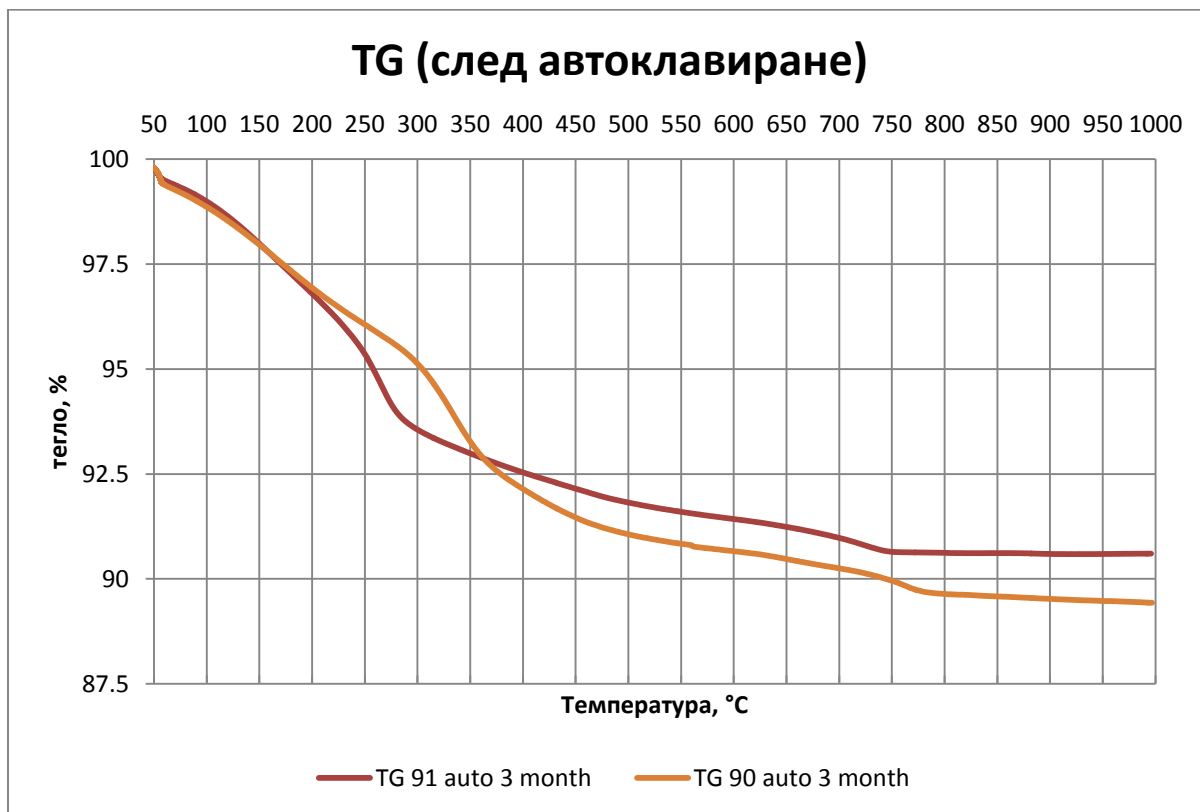
пр. 2 фиг. 20: фигура 1: ТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти месец, след пропарване



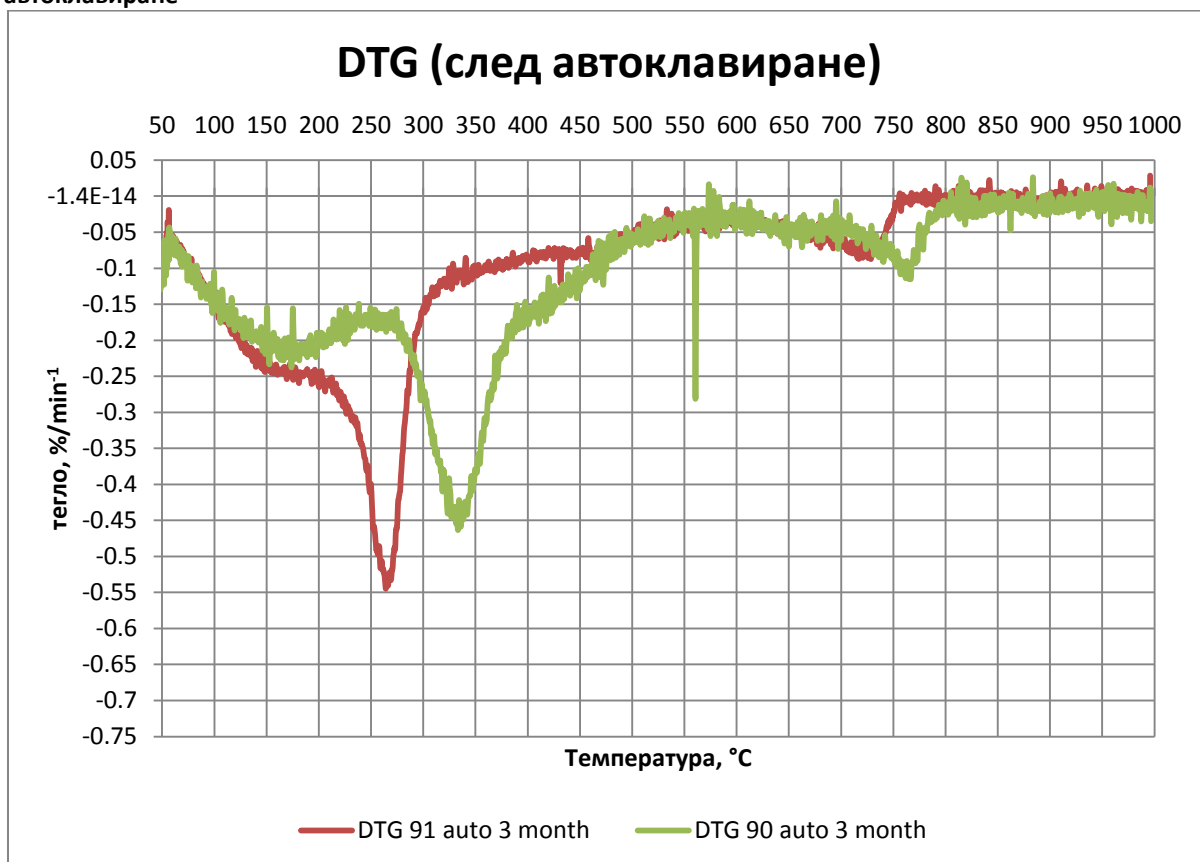
пр. 2 фиг. 21: ДТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти месец, след пропарване



пр. 2 фиг. 22: ДТА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти месец, след автоклавиране



пр. 2 фиг. 23: ТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти месец, след автоклавиране

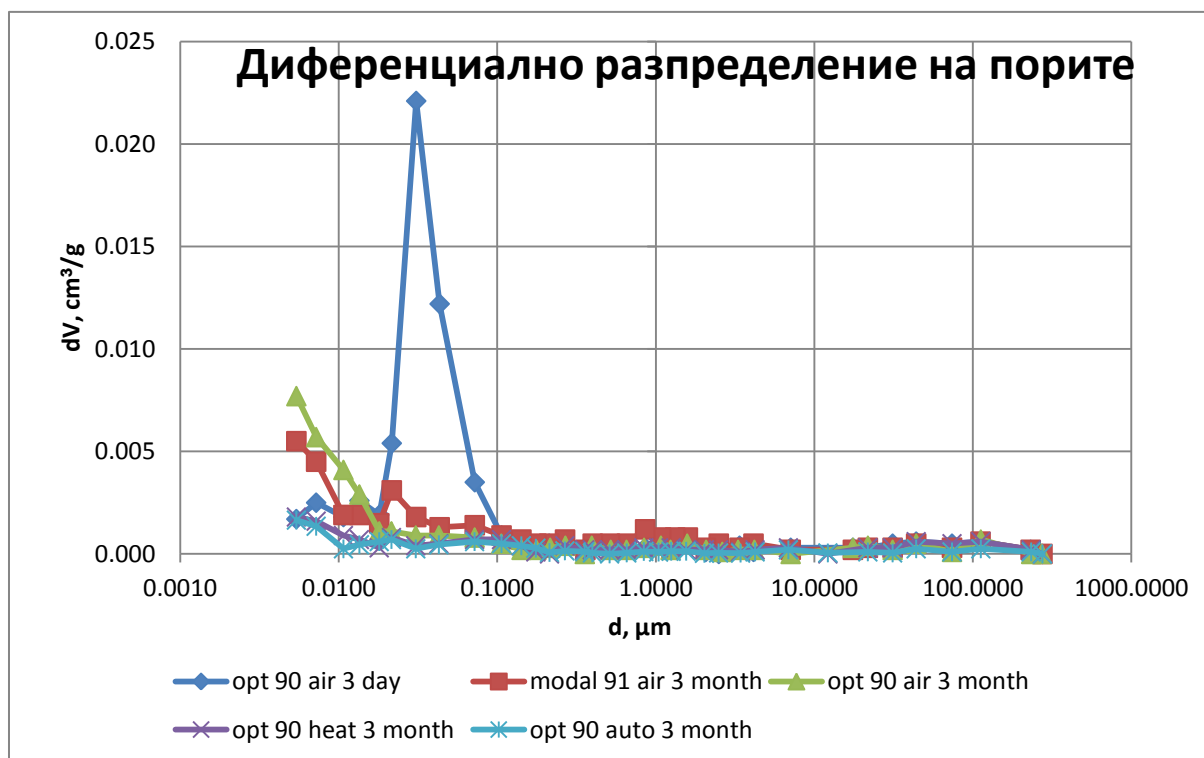


пр. 2 фиг. 24: ДТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти месец, след автоклавиране

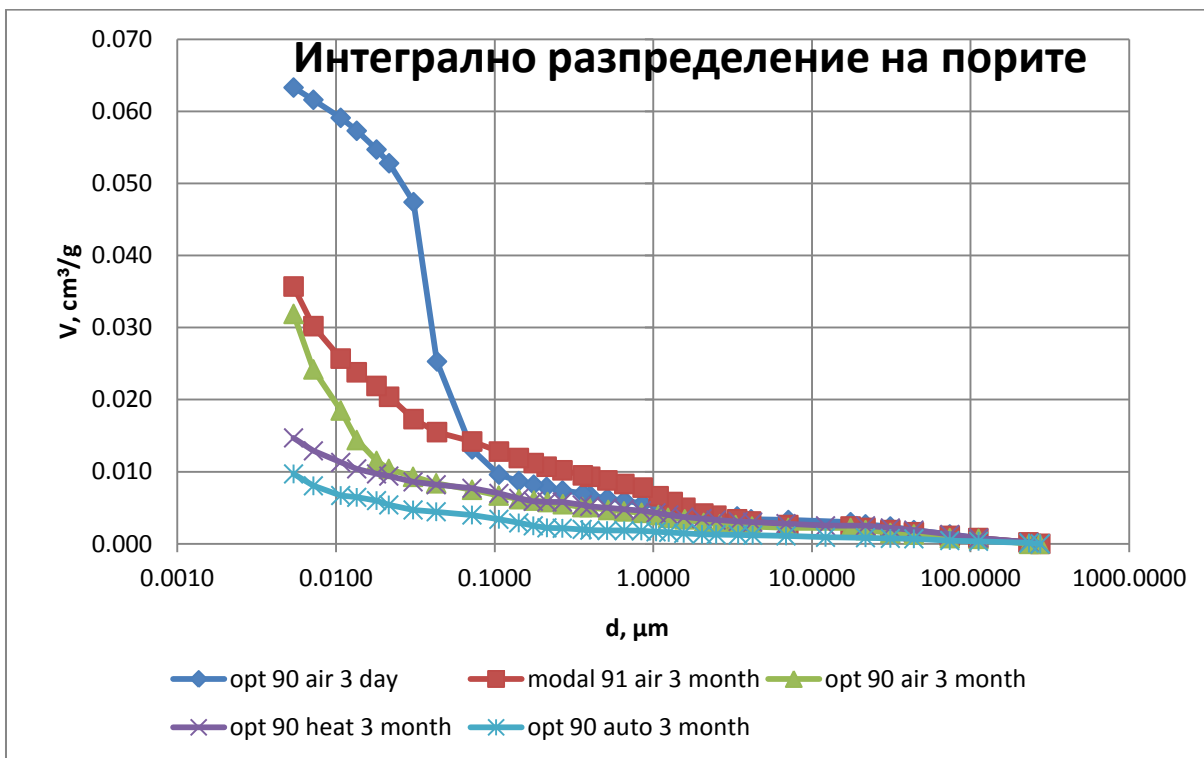
## 2. Порьозиметрия

Използвани състави:

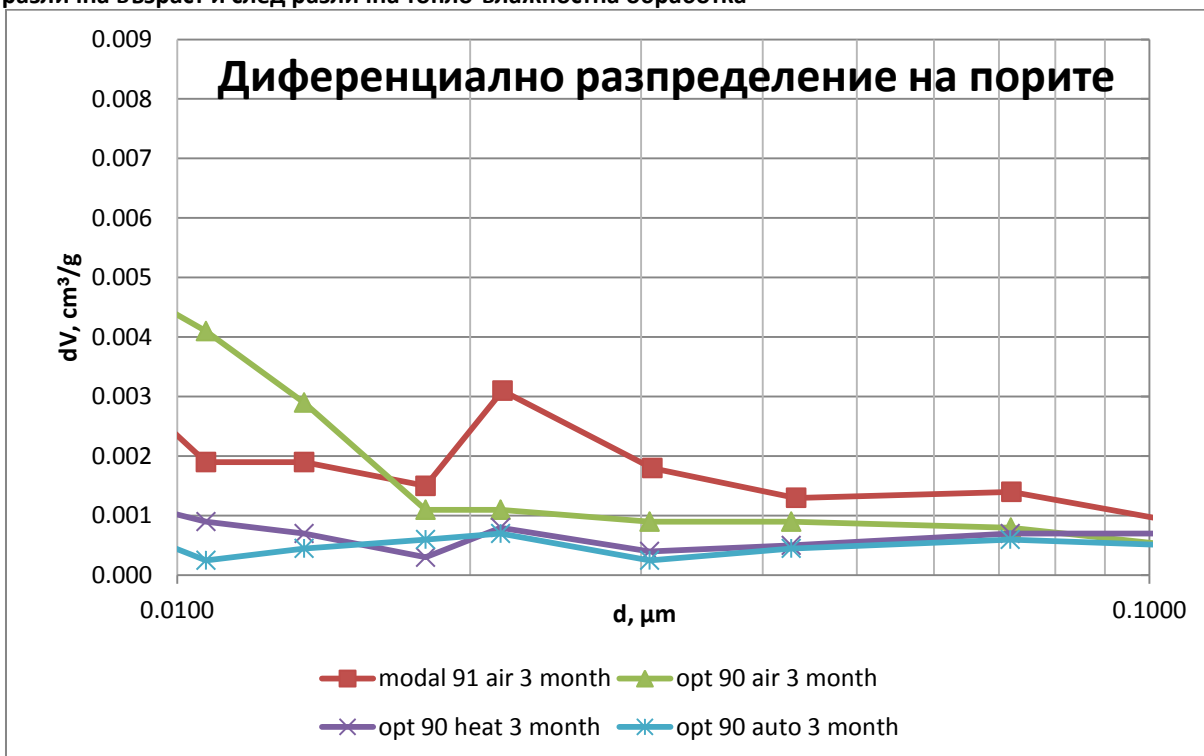
Състав	Работни обозначения на изпитаните пробни тела			
	възраст	въздух	пара	автоклав
<u>90 състав (оптимален):</u> Ц=930 kg МСП=279kg П=3x200 kg Брашно=370 kg Вода=186 l СП=37,2 ml	3 ден	90 air 3 day	-	-
	3 месец	90 air 3 month	90 heat 3 month	90 auto 3 month
<u>91 състав (моделен):</u> Ц=840 kg МСП=168 kg П=1180 kg Вода=184,8 l СП=21 ml	3 месец	91 air 3 month	-	-



пр. 2 фиг. 25: Диференциално разпределение на порите на 2 вида пробни образци на различна възраст и след различна топло-влажностна обработка

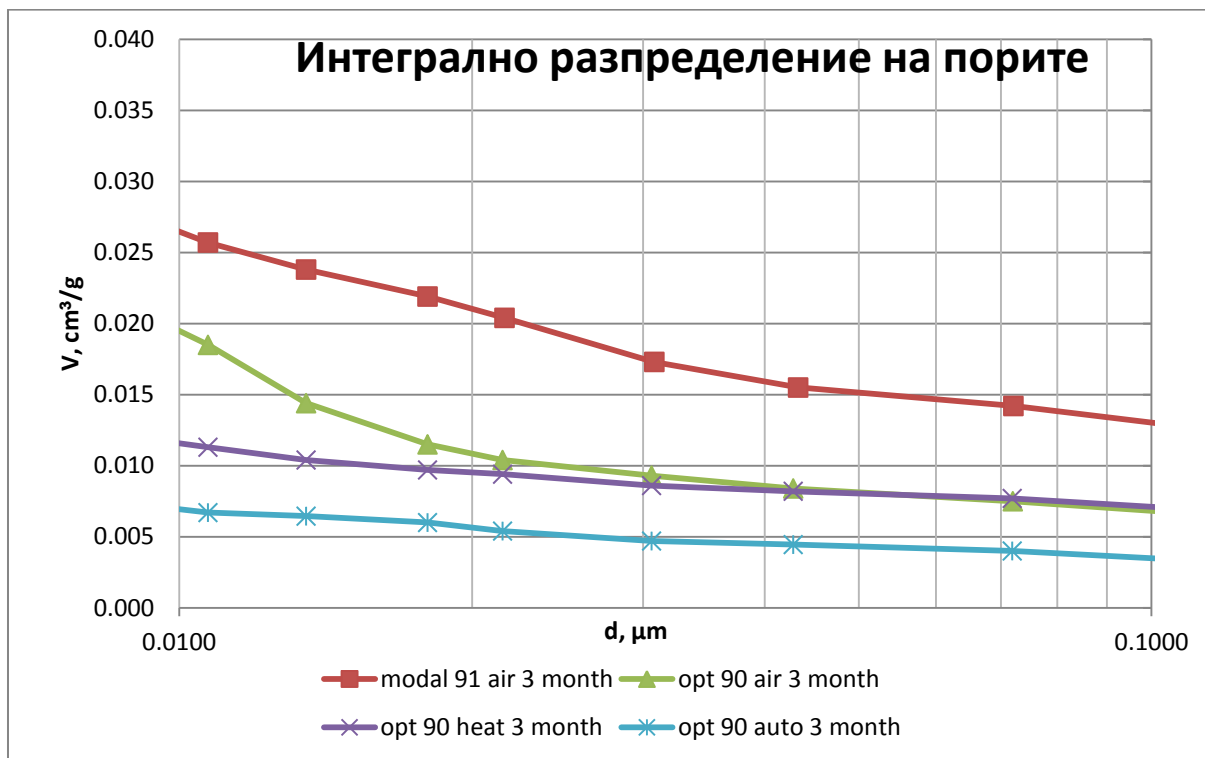


пр. 2 фиг. 26: фигура 2: Интегрално разпределение на порите на 2 вида пробни образци на различна възраст и след различна топло-влажностна обработка

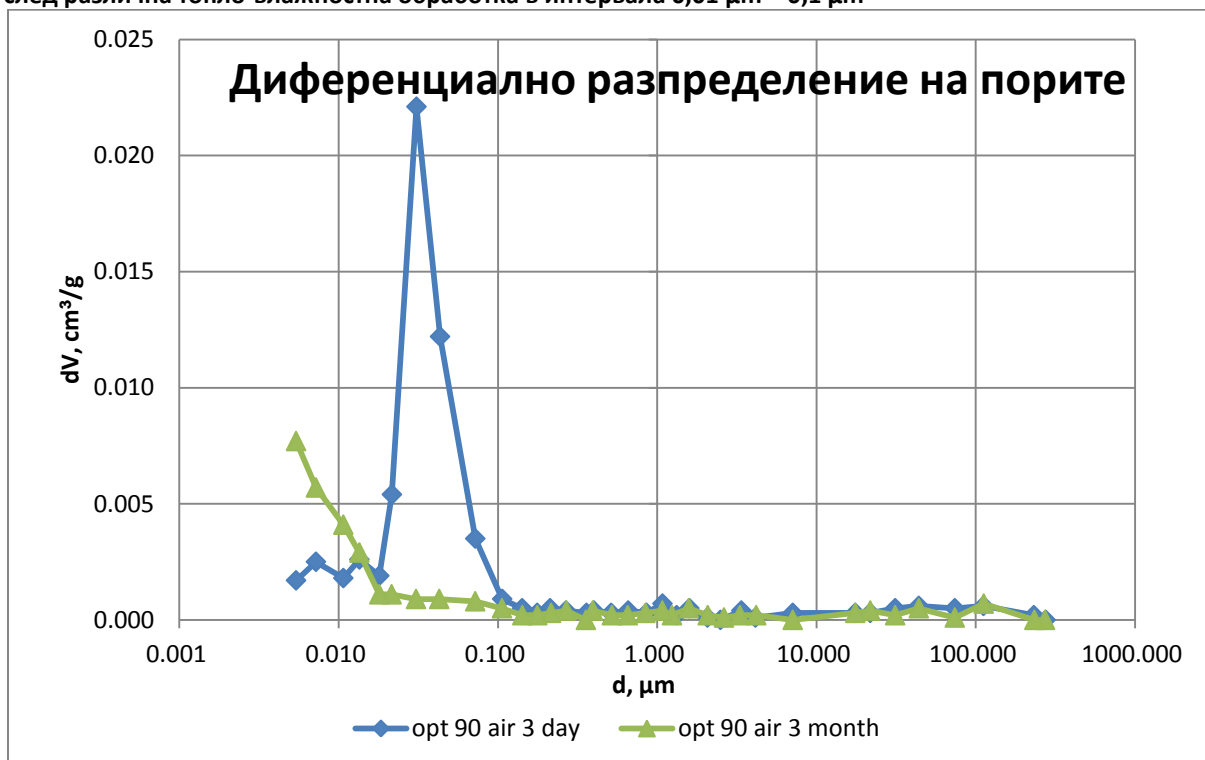


пр. 2 фиг. 27: Диференциално разпределение на порите на 2 вида пробни образци на 3-ти месец след различна топло-влажностна обработка в интервала 0,01 µm – 0,1 µm

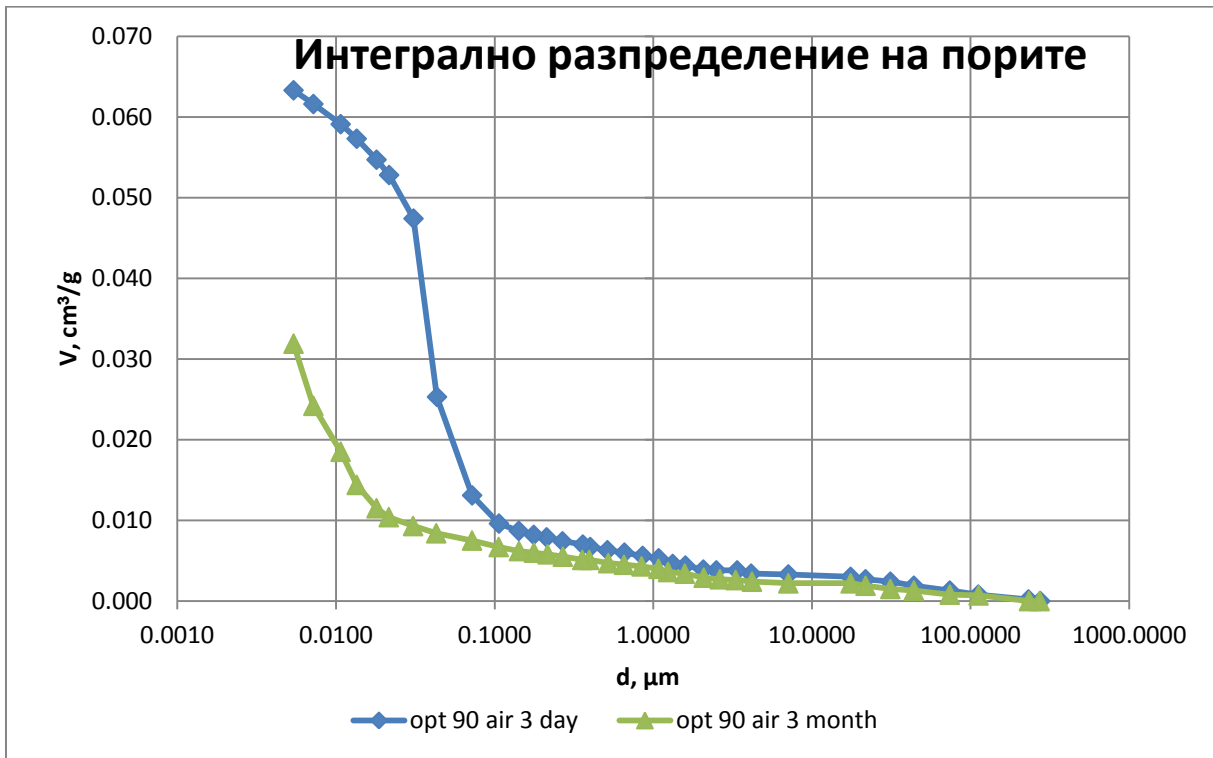




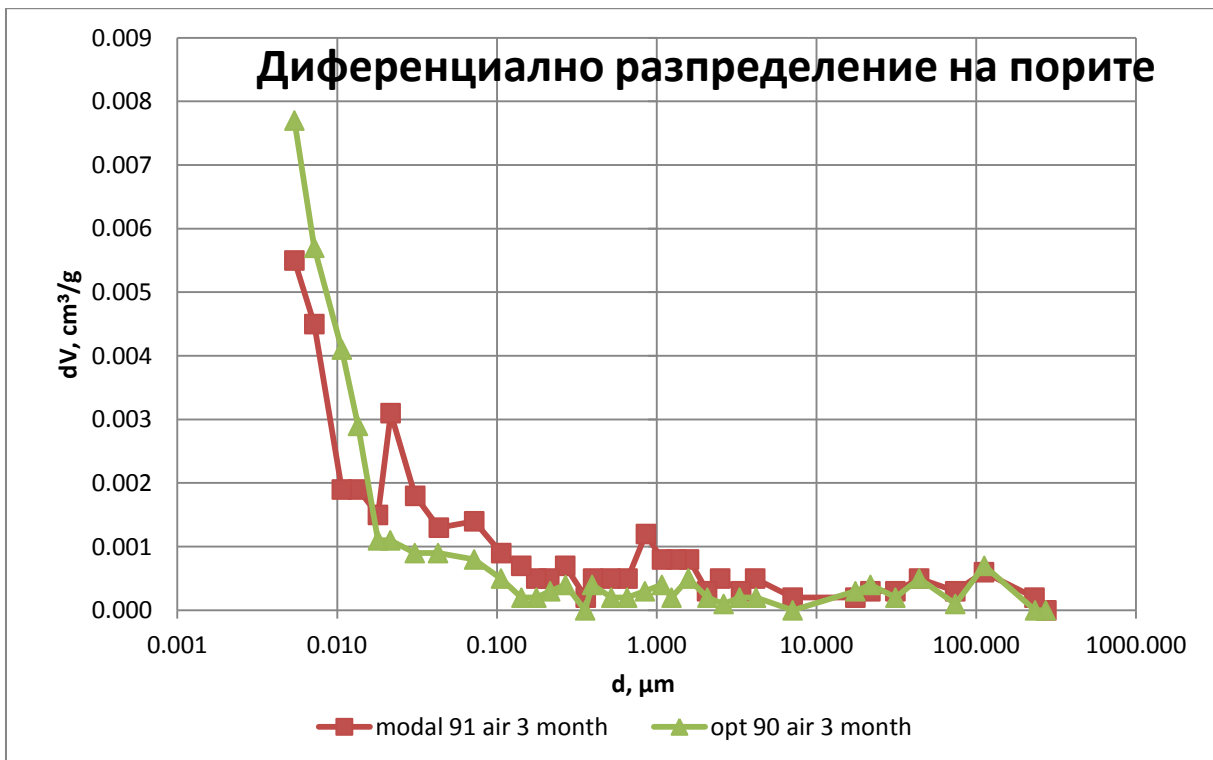
пр. 2 фиг. 28: Интегрално разпределение на порите на 2 вида пробни образци на 3-ти месец след различна топло-влажностна обработка в интервала 0,01  $\mu\text{m}$  – 0,1  $\mu\text{m}$



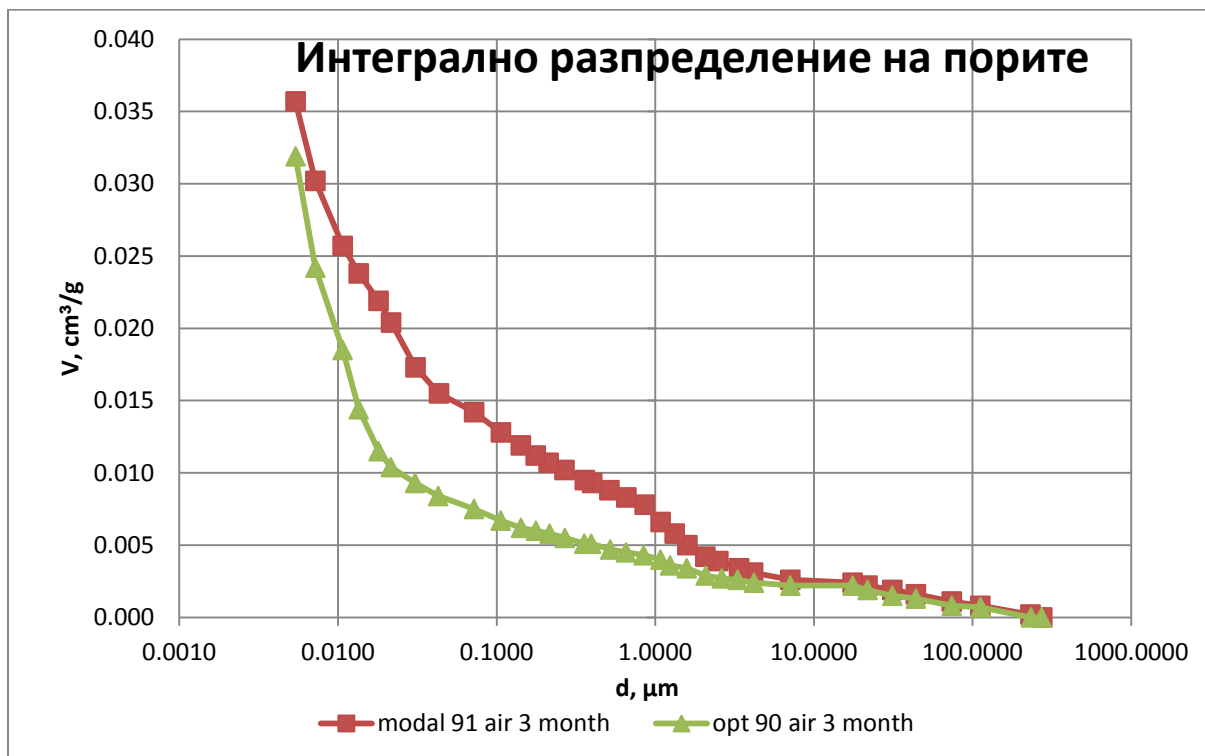
пр. 2 фиг. 29: Диференциално разпределение на порите във времето, на оптимален състав, отлежавал под вода



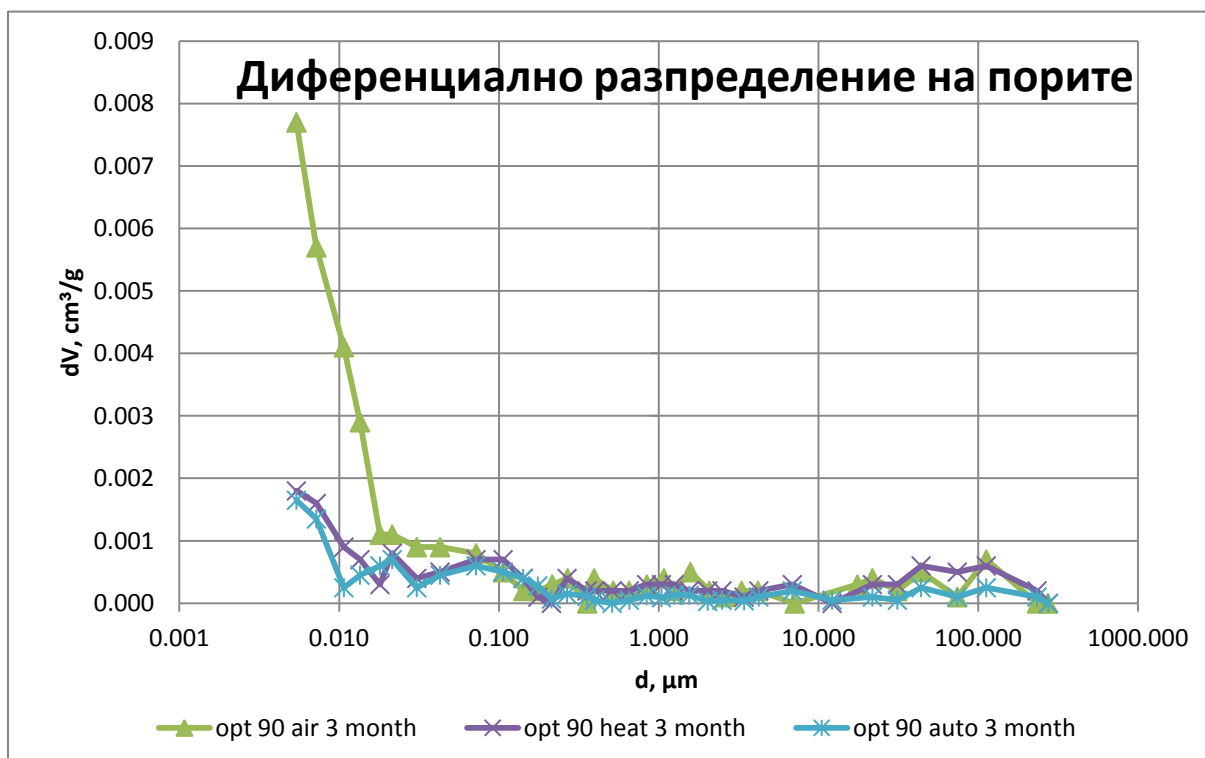
пр. 2 фиг. 30: Интегрално разпределение на порите във времето, на оптимален състав, отлежавал под вода



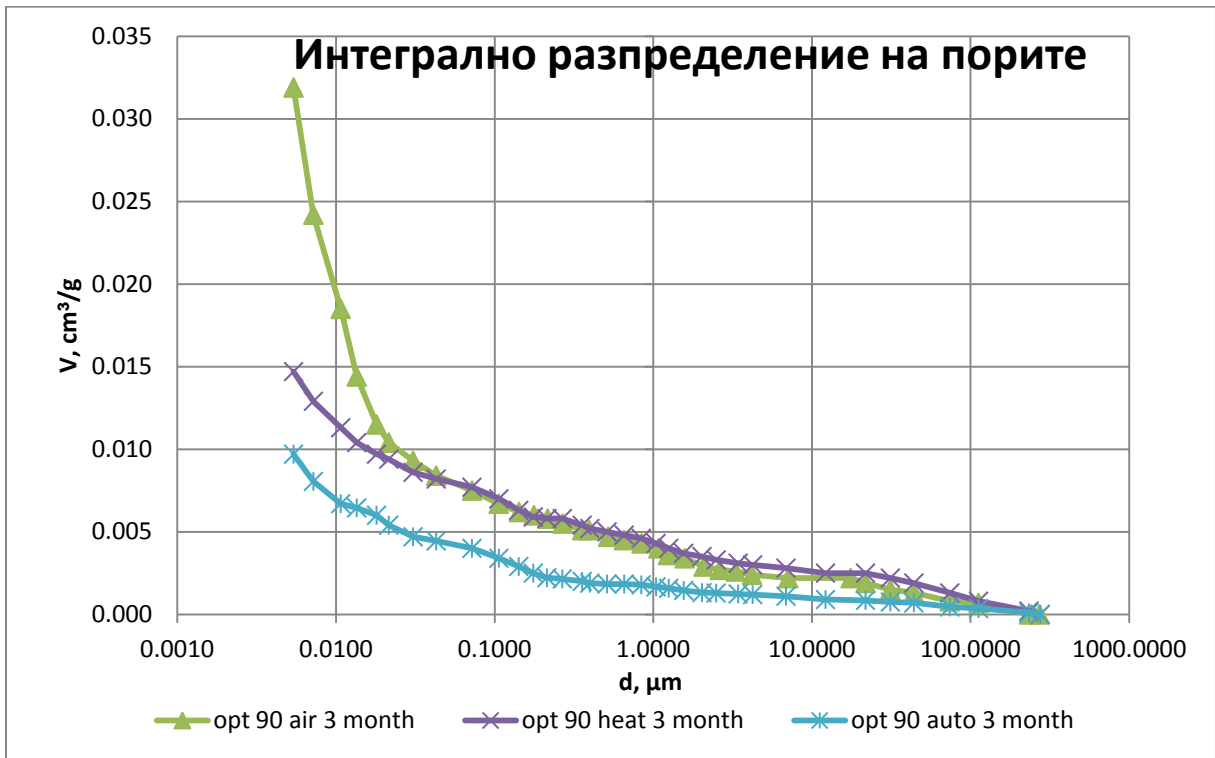
пр. 2 фиг. 31: Диференциално разпределение на порите на 3-ти месец, на оптимален състав 90 и моделен 91, отлежавали под вода



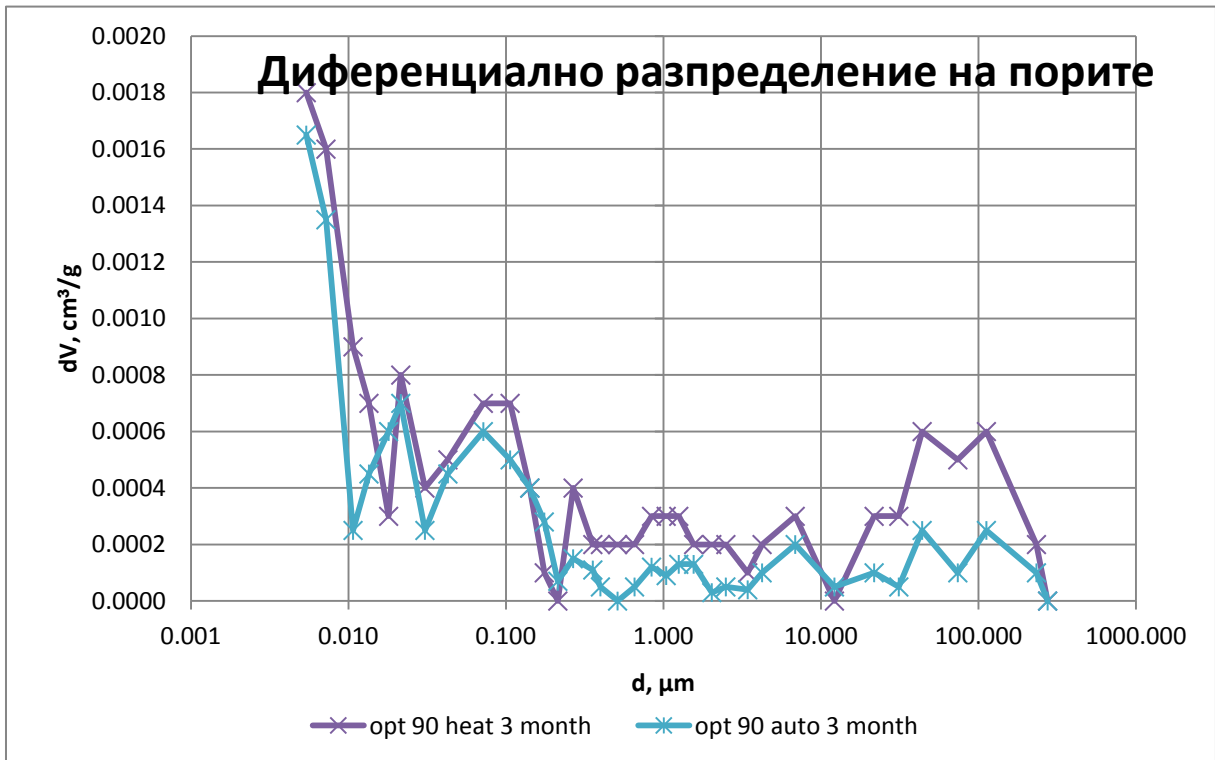
пр. 2 фиг. 32: Интегрално разпределение на порите на 3-ти месец, на оптимален състав 90 и моделен 91, отлежавали под вода



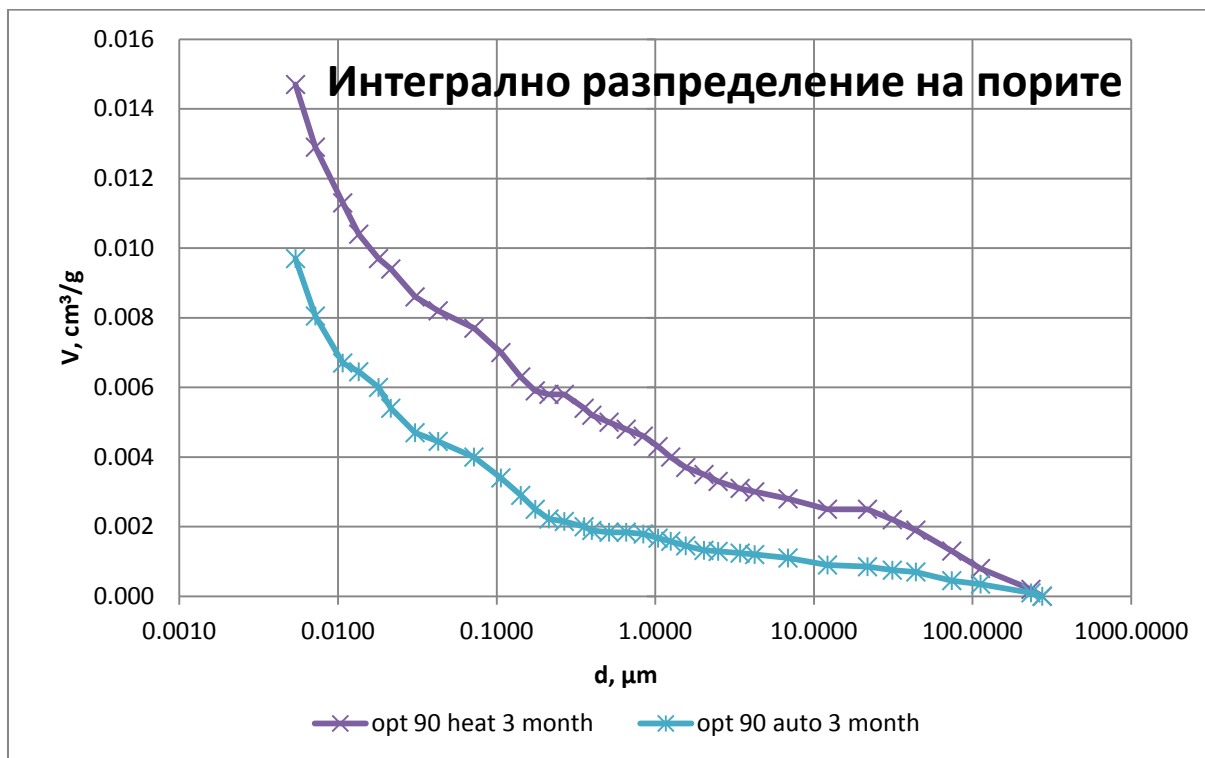
пр. 2 фиг. 33: Диференциално разпределение на порите, на оптимален състав 90, при различни топло-влажностни обработки



пр. 2 фиг. 34: фигура 3: Интегрално разпределение на порите, на оптимален състав 90, при различни топло-влажностни обработки

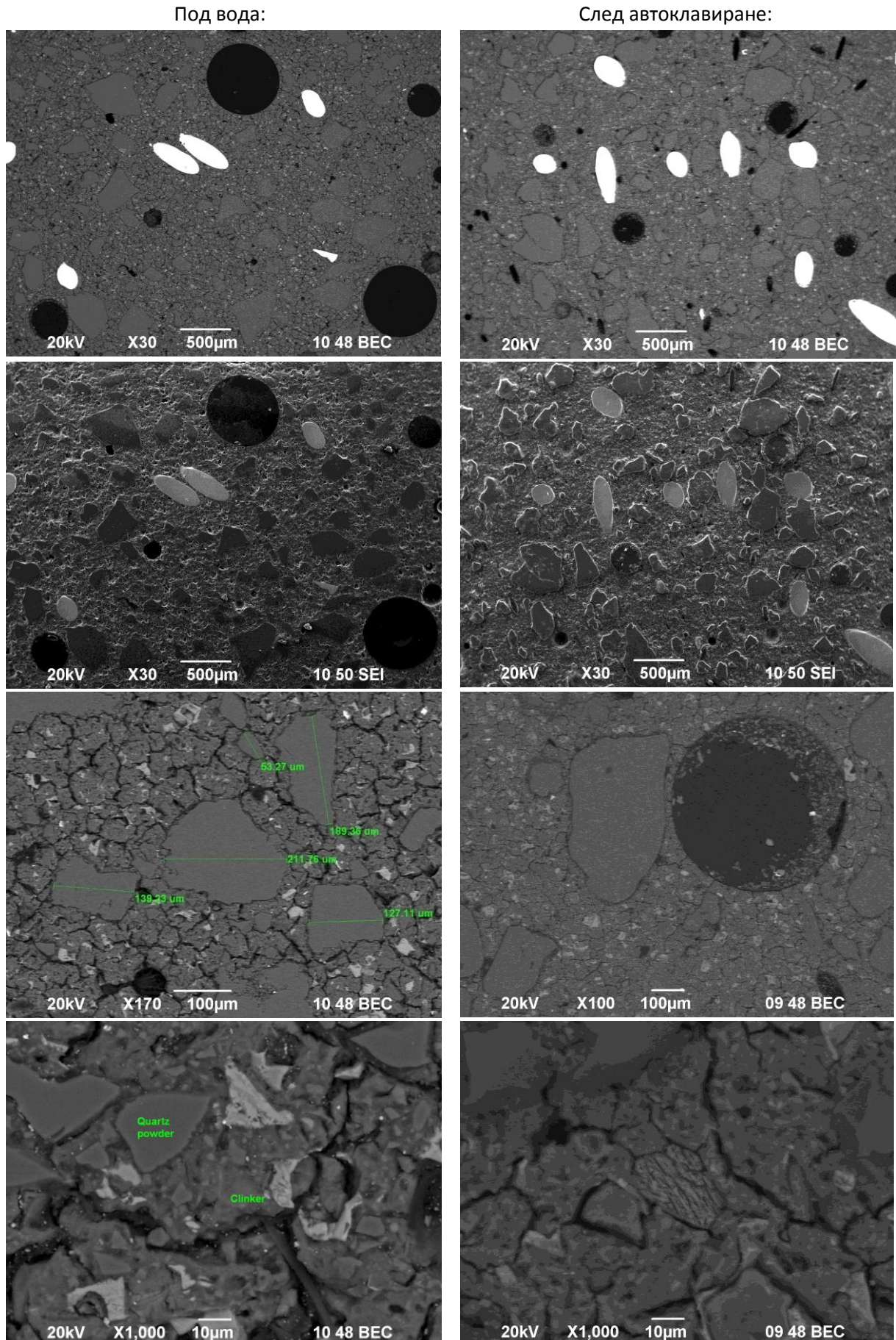


пр. 2 фиг. 35: фигура 4: Диференциално разпределение на порите, на оптимален състав 90, след пропарване и автоклавиране

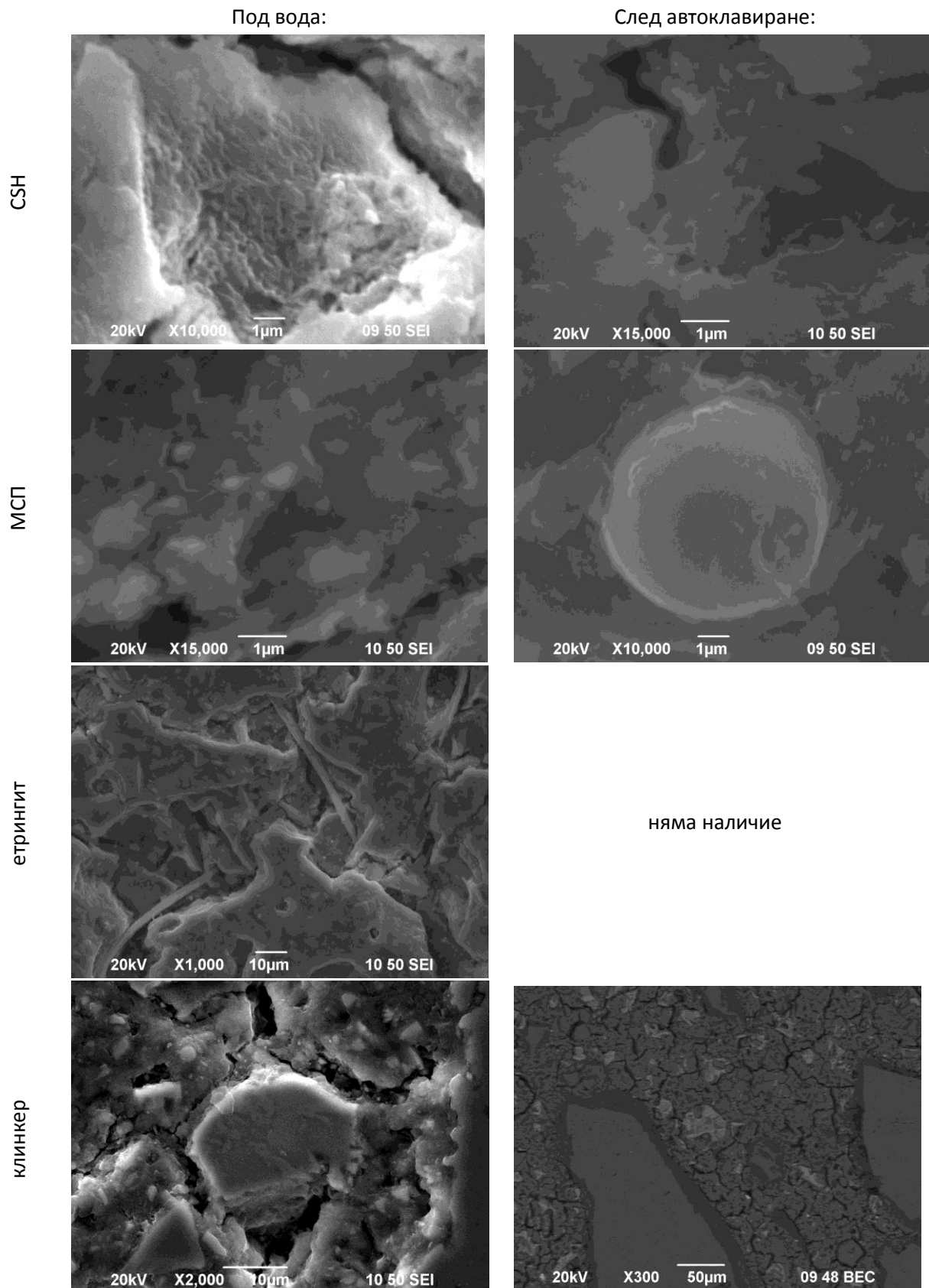


пр. 2 фиг. 36: фигура 5: Интегрално разпределение на порите, на оптимален състав 90, след пропарване и автоклавиране

### 3. Сканираща Електронна Микроскопия (СЕМ)

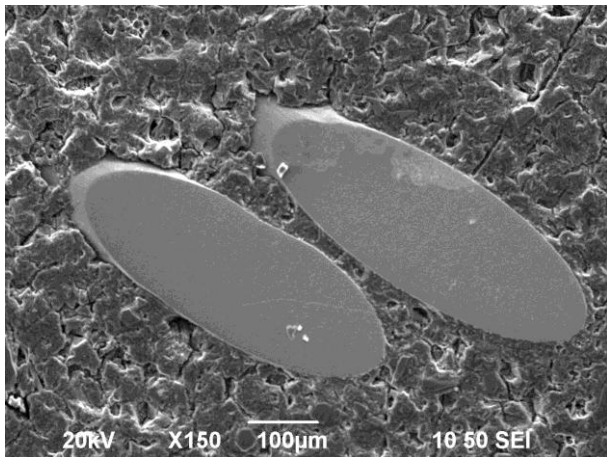


пр. 2 фиг. 37: Изглед на оптимален състав отлежавал под вода (ляво) и след автоклавиране (дясно)

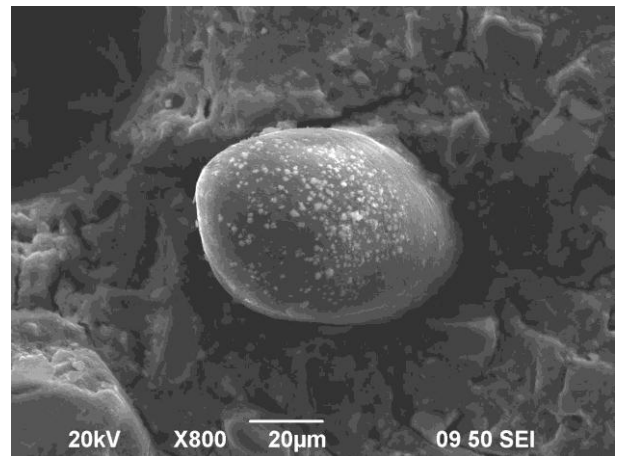
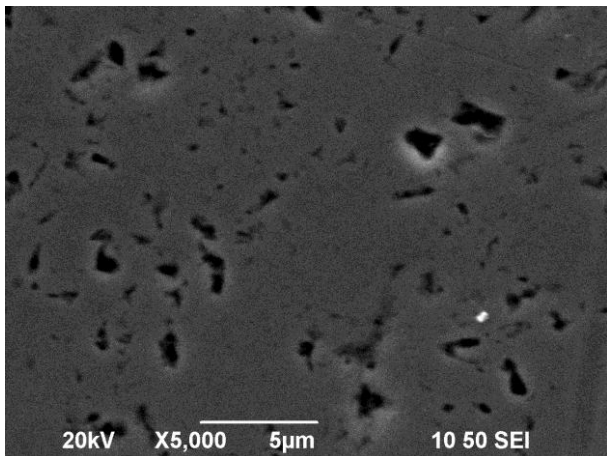
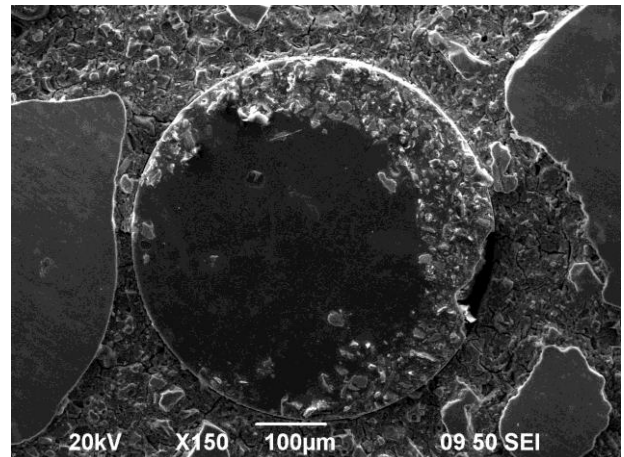


пр. 2 фиг. 38: Компоненти на оптималния състав, отлежавал под вода (ляво) и след автоклавиране (дясно)

Под вода: /Стоманени влакна/

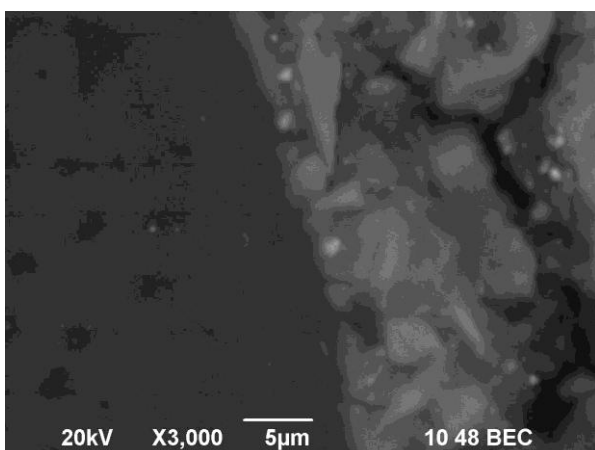


След автоклавиране: /ПП влакна/

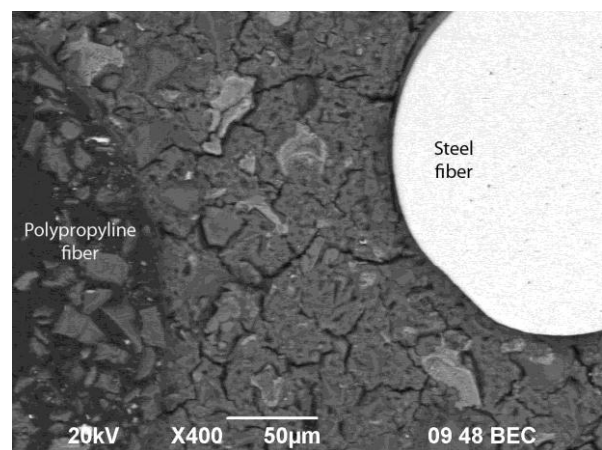


пр. 2 фиг. 39: Оптимален състав: с наличие на стоманени влакна, отлежавал под вода (ляво), и с наличие на полипропиленови влакна, след автоклавиране (дясно)

Под вода:

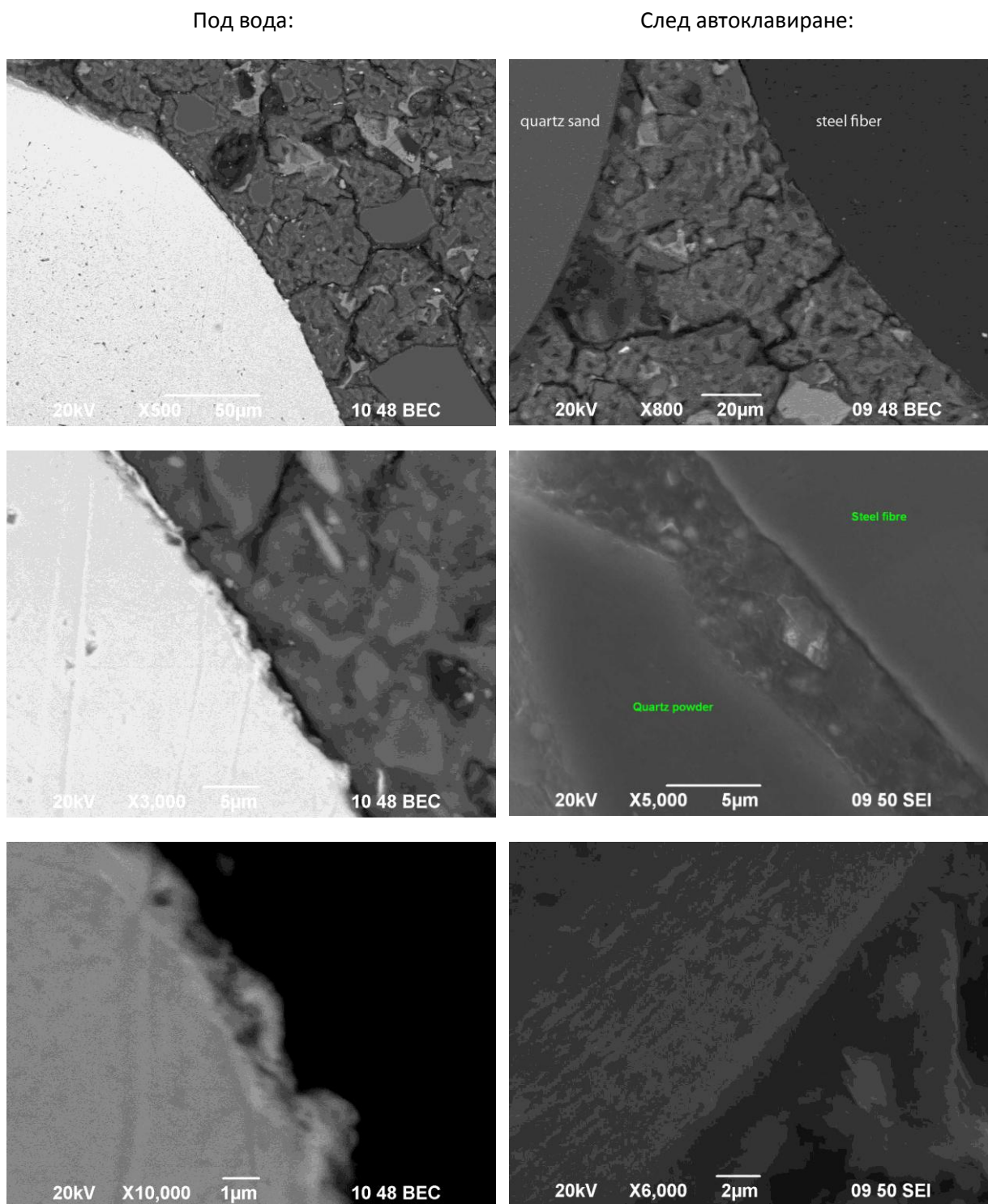


След автоклавиране:





пр. 2 фиг. 40: Преходна зона на полипропиленови влакна и матрица от СВЯБ, отлежавали под вода (дясно) и след автоклавиране (ляво)



пр. 2 фиг. 41: Преходна зона на стоманени влакна и матрица от СВЯБ, отлежавали под вода (дясно) и след автоклавиране (ляво)

## ИЗПОЛЗВАНИ ФИГУРИ

фиг. I. 1: Обобщена класификация на високотехнологичните бетони на циментова матрица....	19
фиг. I. 2: Развитие на бетона на база високи експлоатационни характеристики .....	22
фиг. I. 3: Поемане на натоварването при: а) обикновен бетон б) СВЯБ [Walraven, 2002] ....	27
фиг. I. 4: Механизъм на действие на СП молекули [Frommenwiler, 1998].....	28
фиг. I. 5: Действие на поликарбоксилатните молекули [Frommenwiler, 1998] .....	28
фиг. I. 6: Влияние на дисперсната армировка върху процесите на пукнатинообразуване: .....	30
фиг. I. 7: Фибри тип Тогех: а) напречно сечение б) триизмерен модел [Naaman, 2003].....	31
фиг. I. 8: а) Якост на натиск, отнесена към В/Ц отношение [*], б) относителна плътност към В/Св отношение [**].....	33
фиг. I. 9: Схеми на „Аполоново уплътнение“ (а) и „Пространствено уплътняване“ (б) [Boyd, 1973] .....	35
фиг. I. 10: Зърнометрични криви според теориите на Fuller, Andreassen, Funk и Modified Andreassen .....	36
фиг. I. 11: Схематично представяне на пътя на разрушение на СВЯБ при използване на ЕДМ [Xincheng, 2013].....	40
фиг. I. 12: Различни класификации на порите по размери .....	42
фиг. I. 13: Интегрална крива на разпределението на порите по размери при СВЯБ, в %, при нетретирани и третирани образци след топло-влажностно обработени [127 Cheyreyzu, Marat & Frouin, 1995] .....	43
фиг. I. 14: Диференциална крива на разпределението на порите по размери в СВЯБ, при бетон с различни якостни показатели – при 35 МПа; 100 МПа; 200 МПа и при 500 МПа [Schmidt & Fehling, 2005].....	44
фиг. I. 15: Структура на хидросиликатите [Neville, 2002].....	44
фиг. I. 16: Измерване на степента на хидратация спрямо ефективната възраст [Jonasson, 1994]	48
фиг. I. 17: Максимална степен на хидратация на бетона, спрямо В/Ц отношение [van Breugel, 2004].....	49
фиг. I. 18: Отделено количество топлина от циментова паста с времето, при В/Ц=0,4 [Neville, 2002].....	50
фиг. I. 19: Развитие на относителната влажност и автогенното съсъхване във времето [Loukili, 1999].....	52
фиг. I. 20: Влияние на топло-влажностната обработка върху деформациите от съсъхване на СВЯБ [Loukili, 1999] .....	53
фиг. I. 21: Сравнение между якостта на натиск и чист опън, по отношение на развитието им във времето, отнесено към крайната им стойности, при нетретирани пробни тела [Habel, 2006]....	55
фиг. I. 22: Работна диаграма напрежение-деформации при статично натоварване: а) общ случай; б) идеален еласто-пластичен материал [Динев, 2006].....	56
фиг. I. 23: Диаграма „напрежение-деформация“, при натоварване на чист опън, при: а) „деформационно облекчено“ поведение и б) „деформационно уякено“ поведение [Naaman, 2003; Naaman, 2007] .....	57

фиг. I. 24: Диаграма напрежения-деформации на призматично пробно тяло 4/4/16, подложено на триточково натоварване, при изпитване на якост на опън при огъване [Acker & Behloul, 2004]	59
фиг. I. 25: Схема на натоварването на пробни тела, подложени на ударна якост	60
фиг. I. 26: Начин на деформиране на пробни тела, подложени на ударна якост [Farnam, 2008]	60
фиг. I. 27: Опростен дву-фазов модел на бетона [Illston, 2010]	62
фиг. I. 28: Диаграма 'напрежения-деформации' при обикновен бетон, високоякоостен и СВЯБ .	63
фиг. I. 29: Диаграма напрежения деформации при влакнесто армирани композити, според ASTM 1609, с развитие на първа пукнатина при товар $P_1$ и максимален товар $P_2$ , при деформации съответно $\delta_1$ и $\delta_2$ и остатъчни деформации съответно реализирани при L/600 и L/150 [ASTMC 1609/C 1609M-10]	66
фиг. I. 30: Общ вид на диаграмата 'натоварване-провисване', с дефиниране на основните зони в диаграмата по стандарт ASTM C 1018-97 [ASTM C 1018-97]	66
фиг. I. 31: Подрязано пробно тяло, подложено на натоварване с една концентрирана сила, при измерване на <i>CMOD</i> [Abdalla&Kalihaloo, 2003]	68
фиг. I. 32: Диаграма ' $F-\delta$ ', получена при точково натоварване на огъване на пробни тела от СВЯБ, сравнен с обикновен дисперсно армиран бетон и обикновен разтвор [Güvensoy, 2004].	69
фиг. I. 33: Фиксирани стойности на остатъчно натоварване в диаграмата " $F-\delta$ "	70
фиг. I. 34: Параболично-праволинейна диаграма на бетон, подложен на натиск [Thienel, 2008]	71
фиг. I. 35: Диаграма $\sigma-\epsilon$ , при натоварване на опън при огъване при СВЯБ и според EuroCode 2.	71
фиг. I. 36: Примерна работна диаграма (натоварване-провисване) на СВЯБ и на идеално еласто-пластичен материал	73
фиг. I. 37: Определяне на необходимата енергия за пукнатинообразуване, според Коор [Kopp, 1998]	76
фиг. I. 38: Работна диаграма 'натоварване-надлъжна деформация в опънна зона', получена при изпитване на три-точково огъване при циклично натоварване [Germano, 2012]	76
фиг. III. 1: Системен подход при създаването и модифициране състава на СВЯБ	103
<b>фиг. III. 2а и 2б: Принципна схема на използвания калориметър [Wirquin, 2008]</b>	122
фиг. III. 3: Принципна схема на използвания уред [www.pysicalchemistryresources.com]	126
фиг. III. 4: Загуба на маса при нагряване, представена чрез диаграмите на ТГА и ДТГА	127
фиг. III. 5: Собствени деформации на натоварващата преса, при 50 $\mu\text{m}/\text{min}$	146
фиг. III. 6: Крива натоварване-провисване, според ASTM C1018-97, с извършване на корекция на линейния участък	146
фиг. III. 7: Работни диаграми „ $F-\delta$ ” и „ $F-\epsilon$ ”	149
фиг. III. 8: Основни характеристики на работната диаграма „ $F-\delta$ ” при СВЯБ	150
фиг. III. 10: Максимални стойности на провисване в работната диаграма „ $F-\delta$ ” при СВЯБ, за изчисляване на енергията на разрушение	151
фиг. III. 11: Графично отчитане на стойностите на провисването в диаграмата ' $F-\delta$ ' при различни проценти остатъчна носимоспособност	152
фиг. IV. 1: Изменение на якостта на огъване на 7 ден на моделен състав в зависимост от В/Ц отношение (съдържание на цимент 850 $\text{kg}/\text{m}^3$ и 2,5% суперпластифицираща добавка РС 280)	163
фиг. IV. 2: Изменение на якостта на натиск на 7 ден на моделен състав в зависимост от В/Ц отношение (съдържание на цимент 850 $\text{kg}/\text{m}^3$ и 2,5% суперпластифицираща добавка РС 280)	163

фиг. IV. 3: Сравнение в якостта на опън при огъване на 7 ден при моделен състав и състав, изготвен по модела на пространственото уплътняване .....	166
фиг. IV. 4: Сравнение в якостта на натиск при състав, изготвен по модела на пространственото уплътняване (състав 1) и моделен състав (състав 2) .....	167
фиг. IV. 5: Влияние на топло-влажностната обработката върху якостта на опън при огъване върху състав 1 (метода на пространствено уплътняване) и състав 2 (моделен състав) .....	167
фиг. IV. 6: Сравнение в якостта на натиск при моделен състав и състав, изготвен по модела на пространственото уплътняване при различни условия на отлежаване .....	168
фиг. IV. 7: Зърнометрични криви по модела на <i>Modified Andreassen</i> : а) използвани материали по фракции б) сумарна крива от всички използвани материали – теоретична и експериментална за $D_{max}=7\text{ mm}$ .....	169
фиг. IV. 8: Влияние на различни методи за уплътняване скелета на бетона върху якостта на опън при огъване на 7-ми ден при В/Ц отношение 0,2, при моделен състав и състав по метода на <i>Modified Andreassen</i> .....	170
фиг. IV. 9: Влияние на различни методи за уплътняване скелета на бетона върху якостта на натиск на 7-ми и 28-ми ден и 3-ти месец, при В/Ц отношение 0,2, при моделен състав и състав по метода на <i>Modified Andreassen</i> .....	170
фиг. IV. 10: Представя якостта на натиск на 28 ден за точките от плана на експеримента .....	172
фиг. IV. 11: Изменение на якостта на натиск в зависимост от максималния размер на добавъчния материал, при различни водо-циментни отношения и 4% суперпластификатор..	173
фиг. IV. 12: Изменение на якостта на натиск на микробетоните ( $D_{max}=0,5\text{mm}$ ) в зависимост от количеството на суперпластификатора, при различни водо-циментни отношения.....	173
фиг. IV. 13: Изменение на якостта на натиск в зависимост от водо-циментните отношения на състави с различна зърнометрия: .....	175
фиг. IV. 14: Изменение на якостта на натиск при състави с различно количество стоманени влакна .....	178
фиг. IV. 15: Изменение на якостта на натиск при състави с различно количество стоманени влакна .....	179
фиг. V. 1: Електростатично и хаотично (пространствено) отблъскване между частиците [Stephan, 2008].....	188
<b>фиг. V. 2: Илюстрация на изотермичния режим при +10 °C (температури, измервани в горната, средната и долна част на образеца).....</b>	<b>191</b>
фиг. V. 3: Влияние на температурата на изготвяне и отлежаване върху топлинния поток във времето.....	192
фиг. V. 4: Количество топлина, освобождавано при хидратацията на СВЯБ в зависимост от температурата на изготвяне и отлежаване във времето .....	192
фиг. V. 5: Влияние на вида на състава върху времевързването на СВЯБ, определено посредством уреда на Vikat.....	193
фиг. V. 6: Влияние на температурата на изготвяне и отлежаване върху времевързването на СВЯБ, определено посредством уреда на Vikat.....	194
фиг. V. 7: Влияние на вида на състава върху обемната (а) и специфична плътност (б), при отлежаване във влажни условия .....	195
фиг. V. 8: Влияние на топло-влажностната обработка върху обемната и специфична плътност на моделния състав.....	195

фиг. V. 9: Влияние на топло-влажностната обработка върху обемната и специфична плътност на оптималния състав .....	196
фиг. V. 10: Влияние на вида на състава върху абсорбцията на пробни тела отлежавали във влажна среда .....	198
фиг. V. 11: Влияние на вида на състава върху абсорбцията на пробни тела отлежавали във влажна среда след пропараване .....	198
фиг. V. 12: Влияние на вида на състава върху абсорбцията на пробни тела отлежавали във влажна среда след автоклавиране .....	199
фиг. V. 13: Влияние на вида на дисперсната армировка върху съсъхването на СВЯБ .....	200
фиг. V. 14: Влияние на стоманените влакна върху съсъхването на СВЯБ .....	201
фиг. V. 15: Влияние на ПП влакна върху съсъхването на СВЯБ .....	202
фиг. V. 16: Влияние на комбинирани стоманени и ПП влакна върху съсъхването на СВЯБ .....	202
фиг. V. 17: Влияние на вида на топло-влажностната армировка върху съсъхването на СВЯБ, при оптимален състав, моделен състав и оптимален състав с 2% стоманени влакна за една година .....	203
фиг. V. 18: Влияние на вида на топло-влажностната армировка върху съсъхването на СВЯБ при моделен състав .....	204
фиг. V. 19: Влияние на вида на топло-влажностната армировка върху съсъхването на СВЯБ при оптимален състав .....	205
фиг. V. 20: Влияние на вида на топло-влажностната армировка върху съсъхването на СВЯБ при оптимален състав с 2% стоманени влакна .....	205
фиг. V. 21: ДТА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден, отлежавали при влажни условия .....	206
фиг. V. 22: ТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден, отлежавали при влажни условия .....	207
фиг. V. 23: ДТГА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден, отлежавали при влажни условия .....	207
фиг. V. 24: Разпределение на порите на 3-ти месец, на оптимален състав 90 и моделен състав 91, отлежавали във влажни условия, представено в: а) диференциален вид; б) интегрален вид .....	210
фиг. V. 25: ДТА анализ на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на различна възраст и отлежавали при влажни условия .....	211
фиг. V. 26: Разпределение на порите във времето на оптимален състав 90, отлежавал във влажна среда, представено в: а) диференциален вида; б) интегрален вид .....	214
фиг. V. 27: ДТА анализ на оптимален състав 90 при различни условия на отлежаване .....	215
фиг. V. 28: Разпределение на порите на оптимален състав 90, при различни топло-влажностни обработки, представено в: а) диференциален вид; б) интегрален вид .....	219
фиг. V. 29: ДТА анализ на моделен състав 91 при различни условия на отлежаване .....	219
фиг. VI. 1: Развитие на якостта на натиск на матрицата на СВЯБ във времето при вариране на В/Ц отношение .....	235
фиг. VI. 2: Изменение на якостта на натиск в зависимост от водо-циментните отношения на състави с различна зърнометрия ( $D_{max}$ ) и 4% суперпластифицираща добавка на: .....	236
фиг. VI. 3: Изменение на якостта на натиск в зависимост от водо-циментните отношения на състави с различна зърнометрия ( $D_{max}$ ) и 4% суперпластифицираща добавка на: .....	236

фиг. VI. 4: Развитие на якостта на натиск на матрицата на СВЯБ при вариране на $D_{max}$ във времето.....	237
фиг. VI. 5: Изменение на якостта на натиск на 28-ми ден в зависимост от водо-циментните отношения на състави с различна зърнометрия ( $D_{max}$ ) и 4% суперпластифицираща добавка на .....	237
фиг. VI. 6: Влияние на количеството суперпластификатор върху развитието на якостта на натиск във времето на оптималния състав от плана на експеримента .....	240
фиг. VI. 7: Изменение на якостта на натиск на 28-ми ден в зависимост от количеството суперпластифицираща добавка на състави с различно В/Ц отношение и $D_{max}=0,5$ mm на .....	241
фиг. VI. 8: Влияние на стоманените влакна върху якостта на натиск на СВЯБ .....	242
фиг. VI. 9: Влияние на полипропиленовите влакна върху якостта на натиск на СВЯБ .....	243
фиг. VI. 10: Влияние на хибридната армировка върху якостта на натиск на СВЯБ .....	243
фиг. VI. 11: Влияние на скоростта на разбъркване върху якостта на натиск на: а) 7-ми ден; б) 28-ми ден.....	244
фиг. VI. 12: Влияние на температурата и условията на отлежаване на пробни тела, изготвени при $10^{\circ}\text{C}$ , върху якостта на натиск във времето .....	245
фиг. VI. 13: Влияние на температурата и условията на отлежаване на пробни тела, изготвени при $20^{\circ}\text{C}$ , върху якостта на натиск във времето .....	246
фиг. VI. 14: Влияние на температурата и условията на отлежаване на пробни тела, изготвени при $30^{\circ}\text{C}$ , върху якостта на натиск във времето .....	246
фиг. VI. 15: Влияние на топло-влажностната обработка при различни състави върху якостта на натиск на: а) 3-ти ден; б) 28-ми ден .....	249
фиг. VI. 16: Премостване на микропукнатини със стоманени влакна при половинки гредички 40/40/160 mm, натоварени на натиск.....	250
фиг. VI. 17: Изменение на модула на еластичност в зависимост от: а) $D_{max}$ , при количество на СП=4%; б) В/Ц отношение, при количество на СП=4%; в) СП, при В/Ц=0,20 .....	252
фиг. VI. 18: Изменение на коефициента на Поасон спрямо надлъжната деформация при: а) оптимален състав; б) оптимален състав с къси стоманени влакна.....	255
фиг. VI. 19: Влияние на вида на дисперсната армировка върху коефициента на Поасон .....	256
фиг. VI. 20: Влияние на вида на топло-влажностната обработка върху коефициента на Поасон .....	256
фиг. VI. 21: Развитие във времето на якостта на опън при огъване на матрицата на СВЯБ в зависимост от В/Ц отношение.....	258
фиг. VI. 22: Развитие във времето на якостта на опън при огъване на матрицата на СВЯБ в зависимост от $D_{max}$ .....	259
фиг. VI. 23: Изменение на якостта на опън при огъване в зависимост от максималния диаметър на добавъчния материал, с 4% суперпластифицираща добавка при различно водо-циментно отношение на:.....	259
фиг. VI. 24: Изменение на якостта на опън при огъване в зависимост от водо-циментните отношения на дребнозърнест бетон с $D_{max}=0,5$ mm и различно количество суперпластифицираща добавка на: .....	260
фиг. VI. 25: Влияние на количеството суперпластификатор върху якостта на опън при огъване във времето при оптималния състав от плана на експеримента.....	260
фиг. VI. 26: Якост на опън при огъване на СВЯБ в зависимост от количеството на МСП .....	261
фиг. VI. 27: Влияние на стоманените влакна върху якостта на опън при огъване на СВЯБ .....	262

фиг. VI. 28: Влияние на полопропиленовите влакна върху якостта на опън при огъване на СВЯБ .....	263
фиг. VI. 29: Влияние на хибридна армировка върху якостта на опън при огъване на СВЯБ ...	263
фиг. VI. 30: Якост на опън при огъване на оптимизиран състав на 7-ми ден, при използване на български и френски цимент при различни условия на отлежаване .....	264
фиг. VI. 31: Влияние на топло-влажностната обработка при различни състави върху якостта на опън при огъване .....	264
фиг. VI. 32: Работна диаграма 'натоварване-провисване' при СВЯБ, с използване на различни видове стоманени влакна .....	266
фиг. VI. 33: Работна диаграма 'натоварване-надлъжна деформация' в опънна зона при СВЯБ, с използване на различни видове стоманени влакна .....	270
фиг. VI. 34: Работна диаграма 'натоварване-надлъжна деформация в опънна зона' при СВЯБ, с използване на различни видове полипропиленови влакна .....	271
фиг. VI. 35: Работна диаграма 'натоварване-провисване' при СВЯБ, с използване на хибридна армировка .....	273
фиг. VI. 36: Работна диаграма 'натоварване-надлъжна деформация' в опънна зона при СВЯБ, с използване на различни видове стоманени и полипропиленови влакна .....	274
фиг. VI. 37: Работна диаграма 'натоварване-провисване' на СВЯБ с къси стоманени влакна, подложен на различни топло-влажностни обработки .....	276
фиг. VI. 38: Работна диаграма 'натоварване-провисване' на СВЯБ с дълги стоманени влакна, подложена автоклавна обработка .....	278
фиг. VI. 39: Влияние на вида дисперсната армировка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според ASTM C1018-97 .....	279
фиг. VI. 40: Работна диаграма 'натоварване-провисване' при СВЯБ с къси и с дълги влакна, с отчитане на основните й характеристики според ASTM C1018-97 .....	280
фиг. VI. 41: Влияние на вида дисперсната армировка върху индексите на пластично разрушение на СВЯБ, според ASTM C1018-97 .....	281
<b>фиг. VI. 42: Влияние на вида дисперсната армировка върху фактора на остатъчна якост на СВЯБ, според ASTM C1018-97 .....</b>	<b>281</b>
фиг. VI. 43: Влияние на вида дисперсната армировка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според RILEM 50-FMC .....	282
фиг. VI. 44: Влияние на вида дисперсната армировка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според фиксирана остатъчна носимоспособност .....	283
фиг. VI. 45: Влияние на вида на топло-влажностната обработка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според ASTM C1018-97, армиран с къси стоманени влакна .....	284
фиг. VI. 46: Влияние на вида на топло-влажностната обработка на СВЯБ, армиран с къси стоманени влакна, върху .....	284
фиг. VI. 47: Влияние на вида на топло-влажностната обработка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според RILEM 50-FMC, армиран с къси стоманени влакна .....	285
фиг. VI. 48: Влияние на вида на топло-влажностната обработка върху енергията на разрушение на СВЯБ, според фиксирана остатъчна носимоспособност, армиран с къси стоманени влакна .....	285
фиг. VI. 49: Работна диаграма 'натоварване-провисване' при СВЯБ, преди и след прилагане на топло-влажностна обработка, с отчитане на основните й характеристики според ASTM C1018-97 .....	286

фиг. VI. 50: Влияние на автоклавната обработка на СВЯБ, армиран с дълги стоманени влакна, върху:.....	287
фиг. VI. 51: Издръжливост на удар на състави с различен вид и количество стоманени и ПП влакна .....	288
фиг. VI. 52: Относително увеличение на издръжливост на удар, изразено в %, на пробни тела армирани със стоманени и комбинирани влакна спрямо неармирани проби .....	289
фиг. VI. 53: Относително увеличение на издръжливост на удар, изразено в %, на пробни тела армирани с ПП влакна спрямо неармирани проби.....	289
фиг. VI. 54: Издръжливост на удар на състави с различен вид и количество ПП влакна .....	290

## ИЗПОЛЗВАНИ ТАБЛИЦИ

табл. I. 1: Теоретични зависимости между модула на еластичност и якостта на натиск на обикновен бетон и СВЯБ, на възраст 28-ми ден .....	61
табл. I. 2: Модул на еластичност според опростения дву-фазов модел на [Illston, 2010].....	62
табл. I. 3: Основни параметри при дисперсно армираните композити съгласно ASTM C 1018-97 .....	72
табл. I. 4: Основни параметри на еласто-пластичен материал съгласно ASTM C 1018-97.....	73
табл. III. 1: Моделни състави.....	104
табл. III. 2: Физични свойства и механични характеристики на използвания цимент .....	107
табл. III. 3: Физични свойства, химичен състав и микроскопска снимка на използвания микросилициев прах по БДС EN 196-2:2005 .....	108
табл. III. 4: Физически характеристики и химически състав на използваните кварцови пясъци (изпитвания съгласно методите, специфицирани в [БДС EN 12620:2013] .....	109
табл. III. 5: Ситов анализ на използваното кварцово брашно.....	110
табл. III. 6: Физични и механични характеристики на използвания едър добавъчен материал 111	
табл. III. 7: Характеристики на поликарбоксилатна химическа добавка <i>BASF Glenium 51</i> .....	111
табл. III. 8: Технически данни на използваните стоманени фибри (данни на Производителя) .	113
табл. III. 9: Технически данни на използваните полипропиленови фибри .....	114
табл. III. 10: Фактори на планирания експеримент в кодиран вид .....	116
табл. III. 11: Стойности на приетите фактори в определените опитни точки .....	117
табл. III. 12: Класове по разстилане според метода на стръскваща масичка.....	119
табл. III. 13: Класове по разстилане според уреда на Vebe .....	120
табл. III. 14: Класове по устойчивост на износване по Vöhme за материали на база циментова матрица при подови настилки .....	141
табл. IV. 1: Представяне на пластифициращия ефект на различни поликарбоксилатни добавки (1% от масата на цимента) върху якостите на моделен състав, с В/Ц=0,33 и Ц= 778 kg/m <sup>3</sup> .....	161
табл. IV. 2: Влияние на В/Ц отношение върху моделни състави с различни химически добавки, вложени в 2,5% от масата на цимента при съдържание на Ц=850 kg/m <sup>3</sup> .....	162
табл. IV. 3: Влияние на количеството на суперпластификатора <i>Glenium 440</i> върху якостите на опън при огъване и натиск на 7ми и 28ми ден, при моделен състав с В/Ц=0,22 .....	164



табл. IV. 4: Състав 1, създаден по метода на пространственото уплътняване и състав 2 - моделен състав.....	165
табл. IV. 5: Съпоставка между състав изпотвен според метода <i>Modified Andreassen</i> и моделен състав.....	169
табл. IV. 6: Влияние на метода на проектиране на зърнометричните криви на матрицата върху показателите на СВЯБ, при използваните методи за уплътняване.....	171
табл. IV. 7: Експериментални и изчислителни стойности на якостта на натиск на различните състави на бетона от Плана на експеримента .....	173
табл. IV. 8: Видове влакна и степен на армиране на СВЯБ .....	176
табл. IV. 9: Резултати от изпитването на влакнесто-армираните композити на СВЯБ .....	177
табл. V. 1: Влияние на вида на състава върху обработваемостта на прясната бетонна смес, определена посредством уреда на Vebe и стръскваща масичка.....	186
табл. V. 2: Влияние на количеството на цимента в състава на СВЯБ върху обработваемостта на прясната бетонна смес, определена посредством уреда на Vebe и стръскваща масичка.....	187
табл. V. 3: Влияние на водо-циментния фактор в състава на СВЯБ върху обработваемостта на прясната бетонна смес, определена посредством уреда на Vebe и стръскваща масичка.....	187
табл. V. 4: Влияние на скоростта и времето на приготвяне на прясната бетонна смес върху обработваемостта ѝ, определена посредством уреда на Vebe и стръскваща масичка .....	189
табл. V. 5: Влияние на температурата на изготвяне и отлежаване на прясната бетонна смес върху обработваемостта ѝ, определена посредством уреда на Vebe и стръскваща масичка... ..	189
табл. V. 6: Влияние вида на състава върху относителната плътност и порестост.....	196
табл. V. 8: Влияние на условията на отлежаване и вида на състава върху основните хидро-физични свойства .....	197
табл. V. 9: Развитие на термичните процеси от 0 до 1000 °С при оптимален състав 90 и моделен състав 91, отлежавали във влажна среда на 3-ти ден и 3-ти месец .....	212
табл. V. 10: Загуба на маса на оптимален състав 90 и моделен състав 91 на 3-ти ден и 3-ти месец .....	213
табл. V. 11: Развитие на термичните процеси от 0 до 1000 °С при оптимален състав 90, подложен на различни топло-влажностни обработки .....	216
табл. V. 12: Загуба на маса на оптимален състав 90, подложен на различни топло-влажностни обработки.....	217
табл. V. 13: Развитие на термичните процеси от 0 до 1000 °С при моделен състав 91, подложен на различни топло-влажностни обработки.....	221
табл. V. 14: Загуба на маса на моделен състав 91, подложен на различни топло-влажностни обработки.....	222
табл. V. 15: Общ вид на СВЯБ отлежавал при влажни условия и след автоклавиране .....	223
табл. V. 16: Елементи на оптимален състав на СВЯБ, отлежавал във влажна среда и след автоклавиране .....	224
табл. V. 17: Преходна зона (ITZ) между матрица и: а) и б) кварцовите частици; в) стоманени влакна; г) ПП влакна .....	226
табл. VI. 1: Модифицирани състави на база оптималния състав от плана на експеримента с различно количеството цимент.....	238
табл. VI. 2: Влияние на вида на цимента върху якостта на натиск на оптимизиран състав, при отлежаване под вода .....	238

табл. VI. 3: Влияние на вида на цимента върху якостта на натиск на оптимизиран състав, при отлежаване в суха среда .....	239
табл. VI. 4: Влияние на якостта на натиск на цимента върху якостта на натиск на оптималния състав .....	239
табл. VI. 5: Вариране на количеството на МСП върху оптималния състав от плана на експеримента .....	240
табл. VI. 6: Вариране на количеството на суперпластификатора върху оптималния състав от плана на експеримента .....	241
табл. VI. 7: Влияние на технологичните параметри върху бетонната смес .....	244
табл. VI. 8: Относителни стойности на изменението на якостта на натиск на СВЯБ във времето, според различни условия на изготвяне и отлежаване, отнесени към стандартни условия на изготвяне и отлежаване под вода при 20°C .....	247
табл. VI. 9: Описание на съставите на СВЯБ, подложени на топло-влажностна обработки .....	247
табл. VI. 10: Влияние на вида на пробното тяло върху якостта на натиск при различни състави .....	249
табл. VI. 11: Съпоставка между експериментални резултати и теоретични зависимости за определяне модула на еластичност на СВЯБ .....	253
табл. VI. 12: Влияние на възрастта на бетона върху модула на еластичност на СВЯБ .....	253
табл. VI. 13: Влияние на дисперсната армировка върху модула на еластичност на СВЯБ .....	253
табл. VI. 14: Изчислителни стойности на модула на еластичност на СВЯБ спрямо теоретичните модели на <i>Illston</i> .....	254
табл. VI. 15: Влияние на вида на топло-влажностна обработка върху модула на еластичност на СВЯБ .....	254
табл. VI. 16: Сравнение между якостта на опън при разцепване и якостта на натиск на кубчета 50/50/50 mm върху матрицата на СВЯБ .....	257
табл. VI. 17: Сравнение между якостта на опън при разцепване и якостта на натиск на кубчета 50/50/50 mm върху дисперсно-армиран СВЯБ .....	257
табл. VI. 18: Вариране на количеството на цимента върху модифицирани състави от плана на експеримента .....	261
табл. VI. 19: Влияние на активността на цимента върху якостта на опън при огъване на СВЯБ .....	261
табл. VI. 20: Експериментално определяне на провисването на греди 40/40/160 mm, армирани със стоманени влакна, при натоварване на опън при огъване, реализирано съответно по сила и по деформации .....	268
табл. VI. 21: Експериментално определяне на провисването на греди 40/40/160 mm, армирани със стоманени влакна, при натоварване на опън при огъване, реализирано съответно по сила и по деформации .....	272
табл. VI. 22: Влияние на вида на влакнестата армировка за определяне на устойчивост на износване на СВЯБ, според БДС EN 13892-3:2005 .....	291

## ИЗПОЛЗВАНИ СНИМКИ

сн. I. 1: Пробни тела от:.....	20
сн. I. 2: Самозаздравяване на микропукнатина [Acker, 2004] .....	45
сн. I. 3: Премостване на микропукнатина чрез стоманено влакно [Voort, 2008] .....	46
сн. I. 4: Четири точково натоваване на огъване, с датчици в опънна (1) и натискова(2) зона [Корп, 1998] .....	75
сн. III. 1: Материали за изготвяне на лабораторен замес от СВЯБ .....	104
сн. III. 2: Определяне на пластифициращия ефект от различни химически добавки .....	105
сн. III. 3: Миксери за приготвяне на бетонна смес: а)4l; б)20l .....	118
сн. III. 4: Стръскраща маса, за определяне на обработваемостта на бетонната смес.....	119
сн. III. 5: Уред на Vebe, за определяне на обработваемостта на бетонната смес .....	120
сн. III. 6: Уред за определяне съдържанието на въздух.....	120
сн. III. 7: Електронен уред на Вика за определяне начало свързване на разтвори .....	121
сн. III. 8: Експериментална постановка за определяне на хидратационните процеси в ранна възраст на бетон, чрез пробни тела с размери 15/15/6 cm [Wirquin, 2008] .....	122
сн. III. 9: Камера за отлежаване при 10°C .....	123
сн. III. 10: Камера за отлежаване при 20°C .....	123
сн. III. 11: Камера за отлежаване при 30°C .....	123
сн. III. 12: Пробни тела гредички 4/4/16 cm, подложени на пропарване в продължение на 48 часа .....	124
сн. III. 13: Пробни тела 4/4/16 cm, подложени на автоклавна обработка в а) заводски условия; б) лабораторен автоклав.....	125
сн. III. 14: Уред за измерване на ДТА и ТГА .....	126
сн. III. 15: Уред за определяне на живачна порьозиметрия .....	128
сн. III. 16: Сканиращ електронен микроскоп (СЕМ) .....	129
сн. III. 17: Хидростатична везна за определяне на обемна плътност на пробни тела гредички 4/4/16 cm .....	130
сн. III. 18: Пикнометър за определяне на специфична плътност на бетона, предварително смлян до ситност на частиците под 200 $\mu\text{m}$ .....	131
сн. III. 19: Пробни тела 4/4/16 cm, потопени във вода, в ексикатор, свързан с вакуум помпа ..	133
сн. III. 20: Пробни тела гредички 4/4/16 cm, подложени на капиларна водопопиваемост, до постоянна маса .....	134
сн. III. 21: Електронен уред за измерване на съсъхането на пробни тела гредички 4/4/16 cm	135
сн. III. 22: Изпитване якост на опън при огъване на половинки гредички 4/4/16 cm.....	136
сн. III. 23: Изпитване на якост на натиск на половинки гредички 4/4/16 cm .....	137
сн. III. 24: Изпитване якост на разцепване на кубчета 5/5/5 cm.....	138
сн. III. 25: Уред на Пейдж, за определяне на ударната якост на кубчета 4/4/4 cm .....	139
<b>сн. III. 26: Уред на „Vöhtе”, за определяне изтриваемостта на кубчета 7/7/7 cm.....</b>	<b>140</b>
сн. III. 27: Изпитване модула на еластичност на пробни тела гредички 4/4/16 cm.....	141
сн. III. 28: Определяне на коефициента на Поасон на пробни тела 4/4/16 cm .....	143

сн. III. 29: Опитни постановки за определяне на връзката между натоварване и деформация (вертикално провисване и надлъжна деформация в опънна зона) на пробни тела призми 4/4/16 см, посредством а) преса с натоварване по сила и б) преса с натоварване по деформации .....	144
сн. III. 30: Определяне на провисването при огъване на пробни тела 4/4/16 см, посредством: а) индикаторни деформометри б) цифров запис на полученото провисване .....	144
сн. III. 31: Определяне на надлъжната деформация в опънната зона на пробни тела гредички 4/4/16 см., посредством а) индуктивен датчик и б) съпротивителен датчик.....	147
сн. IV. 1: Макроструктура на състави с различен максимален размер на добавъчния материал .....	174