

FIBROUS FILLERS FOR COMPOSITE BUILDING MATERIALS

Darina Zheleva, Gabriela Todorova

University of Chemical Technology and Metallurgy, Kl. Ohridski Blvd. 8, 1756 Sofia, Bulgaria
e-mail: darinajeleva@abv.bg

Abstract

Concrete is the most commonly used construction material. It is characterized by properties such as high compressive strength, toughness, low electrical conductivity and low toxicity. However, two of its properties prevent it from being the ideal construction material. These are its fragility and its low flexural tensile strength. The traditional method to overcome these disadvantages is to use steel reinforcement. However, even with such reinforcement, the concrete cannot be protected from cracking. It has been found that when concrete is reinforced with fibers, cracking is minimized. A modern trend is the application of industrial concrete flooring to be performed as disperse-reinforced using fibers and chemical additives.

The aim of the present study is to analyze the possible applications of various fibrous fillers in concrete compositions and the properties of construction composite materials reinforced with fibers and polymer additives.

Key words: *fibrous fillers, concrete, reinforcement, strength properties*

ВЛАКНЕСТИ ПЪЛНИТЕЛИ ЗА КОМПОЗИТНИ СТРОИТЕЛНИ МАТЕРИАЛИ

Дарина Желева, Габриела Тодорова
ХТМУ, Катедра „Текстил, кожи и горива“
e-mail: darinajeleva@abv.bg

Резюме

Бетонът е най-често използваният строителен материал, характеризиращ се с висока якост на натиск, здравина, ниска електропроводимост и ниска токсичност. Може да бъде изготвен в разнообразни форми, както в заводски условия, така и на строителния обект. Но две от неговите качества го възпрепятстват той да бъде идеалния конструкционен материал: крехкостта и ниската му якост на опън при огъване. Традиционният начин за преодоляване на тези недостатъци е използването на стоманена армировка за поемане на опънните напрежения и увеличаване на пластичността. Но дори с такава армировка бетонът не може да бъде защитен от образуване на пукнатини. Опитно е установено, че при дисперсно армиране на бетона с влакна пукнатинообразуването се свежда до минимум. Съвременна тенденция е приложението на индустриалните бетонни настилки да се нанасят като дисперсно-армирани с използване на фибри и химични добавки.

Целта на настоящото изследване е анализ на възможните приложения на различни влакнести пълнители в бетонни композиции и на свойствата на строителните композитни материали усилен с влакна и полимерни добавки.

Ключови думи: *влакнести пълнители, бетон, усилване, якостни свойства*

Увод

Бетон

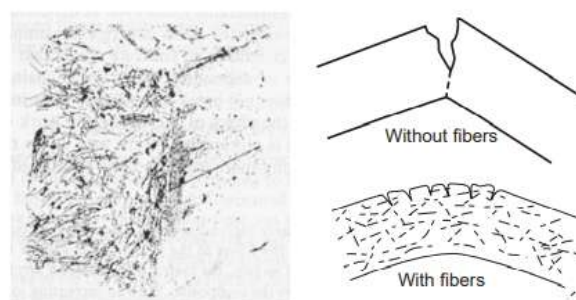
Бетонът е композитен материал, който по същество се състои от свързваща среда, в които са вградени частици или фрагменти от инертни материали. В хидравлично-циментния бетон свързващото вещество се формира от смес от хидравличен цимент и вода [1].

Влакна. Определение и значение на влакната

Бетон, съдържащ хидравличен цимент, вода, инертни материали и прекъснати дискретни влакна се нарича армиран бетон. Може да съдържа и пуцолани и други добавки, често използвани при конвенционалния бетон. Използват се влакна с различни форми и размери, произведени от стомана, пластмаса, стъкло и естествени материали. За повечето структурни и неструктурни цели обаче стоманените влакна са най-често използваните от всички влакна. Обикновено бетонът съдържа множество микропукнатини. Това бързо разпространение на микропукнатини при приложено напрежение е отговорно за ниската якост на опън на материала. Видът на влакната и тяхната обемна част имат значителен ефект върху правилните връзки на армирания бетон [2,3].

Влакна с ниска обемна фракция (<1%) се използват за намаляване на свиването и напукването. Тези влакна се използват в плочи и настилки, които имат голяма пряко изложена на атмосферни условия повърхност, водеща до високо свиване в резултат на пукнатини. Наличието на влакна с обемна част между 1 и 2% увеличава модула на разрушаване, жилавостта на счупване и устойчивостта на удар. Използваните в такава обемна фракция (>2%) влакна водят до деформационно втвърдяване на композитите. Поради поведението, което проявяват, тези композити често се наричат

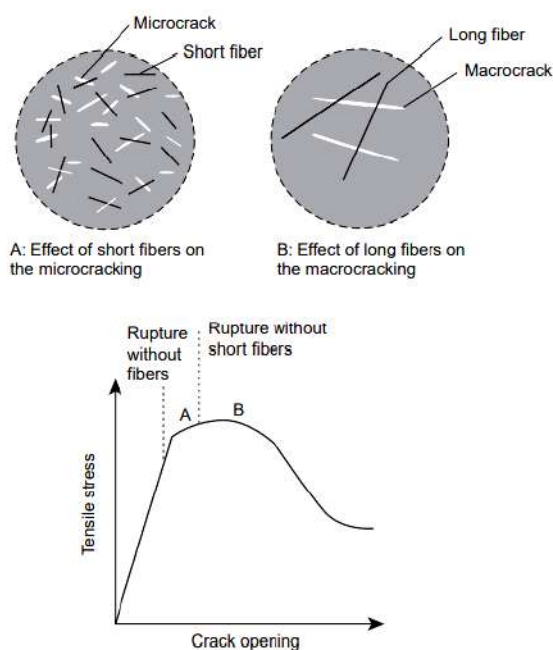
високоэффективни подсилени с влакна композити.



Фиг.1. Сравнение на композити с и без наличие на влакна [1]

Характеристика, свойства и приложение на влакната

Типичните свойства на различни видове влакна са дадени на фиг.2, и някои типични влакна са представени в таблица 1 [1].



Фиг.2 Влияние на влакна с различна дължина в различни етапи на опън на бетона [10]

Таблица 1. Видове влакна и техните характеристики [1]

Видове влакна	Якост на опън (МПа)	Модул на Юнг (GPa)	Крайно удължение (%)	Специфично тегло (g/m ³)
Акрилни	210 - 420	2,1	25-45	1,1
Азбестови	560 - 980	84 - 140	~ 0,6	3,2
Памучни	1800 - 2600	230 - 380	3-10	1,5
Стъклени	1050 - 3850	70	1,5 - 3,5	2,5
Найлонови	770 - 840	4,2	16 - 20	1,1
Полиестерни	735 - 875	8,4	11-13	1,4
Полипропиленови	560 - 770	3,5	~ 25	0,9
Полиетиленови	700	0,14 - 0,42	~ 10	0,95
Вълнени	490 - 770	70 - 119	~ 0,6	2,7
Стоманени	280 - 2800	203	0,5 - 35	7,8

Най-често използваните влакна за бетона освен стоманените, са полипропиленовите и целулозните. Типичните стъклени влакна (нарязан щам) имат диаметър от 0,005 до 0,015 mm, но те могат да бъдат свързани помежду си, за да се получат елементи от стъклени влакна с диаметър 0,013 до 1,3 mm.



Фиг.3. Видове влакнести пълнители: полиетиленови, стоманени и полипропиленови

Стоманените влакна се характеризират с висок Е-модул (модул на еластичността) (200 GPa) и висока якост на опън (2500 МПа). Те предотвратяват пълзенето на бетона, но не противодействат на ранното свиване. Корозията не причинява излюпване на бетона, а промяна на цвета на бетонната повърхност.

Синтетичните макрофибри имат по-нисък Е-модул в сравнение със стоманените влакна (5÷15 GPa). За разлика от стоманените влакна, синтетичните макро влакна не могат да поемат изключително големи натоварвания, но те работят изключително ефективно в ранните фази на втвърдяване на бетона и спомагат за предотвратяване и/или намаляване на размера на пукнатините, възникващи в бетона. Те са корозионно устойчиви и

придават на бетона по-голяма пластичност.

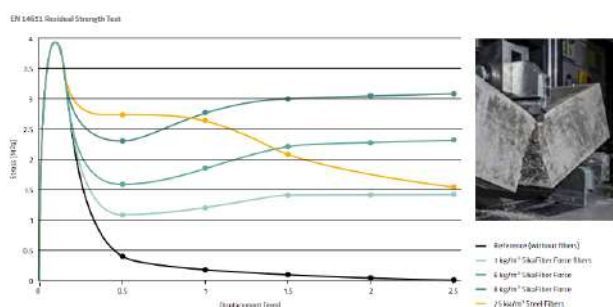
Синтетичните микрофибри имат равномерност и по-нисък Е-модул (3 - 5 GPa) в сравнение със синтетичните макрофибри. Те са главно използвани за намаляване на свиването в ранна възраст на напукване на бетона, а също и за подобряване на огнеустойчивостта поради ниската им точка на топене (160°C). Отново тези синтетични микровлакна не са корозивни.

Усилен бетон с влакна е бетон, към който са добавени влакна по време на изготвянето на бетонната смес. Те водят до подобряване на свойствата му при напукване и разрушаване [3-6].

Докато влакната вградени в циментовата матрица не проявяват значителен ефект, то по време на процеса на втвърдяване възпрепятстват появата на пукнатини и водят до повишената якост на опън и на деформация. Там, където има по-голямо напрежение, те предотвратяват по-големи пукнатини, предизвиквайки разсейването им в по-многобройни, но много фини и като цяло безвредни. Пукнатини могат да се появят по различно време в бетона: в началното време на процеса на втвърдяване, когато е налице свиване в ранна възраст и напукване; след това с увеличаване на възрастта и твърдостта възникват напрежения, разпространяващи се в бетона.

Ако в бетона се получи напукване Е-модулът на влакната е от решаващо значение, тъй като това определя съпротивлението на влакната, за да противодейства на тяхната еластична деформация.

Тъй като влакната също са лесни за работа и се дозират лесно при смесване, осъществявайки добра връзка в матрицата, те са идеални за подобряване на работата на бетона и хоросана и са подходящи в редица области. На *фиг.4* са представени якостните характеристики в зависимост от количеството на влакнените пълнители и най-висока якост е постигната при най-голямо количество, а именно 25 kg/m³.



Фиг.4. Изменение на якостните характеристики при различни дозировки на влакнести пълнители [1]

Добавянето на подходящи влакна може да осигури значително подобрене на свойствата на бетона, включително:

- ✓ По-малко напукване поради свиване в ранна възраст;
- ✓ По-добро сцепление в пресния бетон;
- ✓ По-висока якост на огъване и срязване;
- ✓ Подобрена товароносимост и пластичност;
- ✓ Повишена абразивоустойчивост;
- ✓ Защита срещу замръзване и размразяване;
- ✓ Повишена огнеустойчивост.

Влакната могат да подобрят пластичността на нанесените бетонни облицовки и да повишават огнеустойчивостта на крайните облицовъчни бетони в тунелна конструкция, те могат да намалят пукнатините по пътищата и мостовите палуби или подовите замазки, също и да увеличат устойчивостта на удар и да намалят щетите върху сглобяеми бетонни елементи.

Полипропиленовите фибри се произвеждат от химически инертен полипропилен, който не реагира с компонентите и добавките на бетона [1]. Същият не задържа хидратацията на цимента и се характеризира с много добра устойчивост в алкална среда. В зависимост от структурата си полипропиленовите фибри могат да бъдат моноvlakнесте или разклонено-vlakнесте, т.е. мрежести. Моноvlakнестите фибри предотвратяват ефективно разслояването на бетонната смес и образуването на пукнатини от съсъхване в

най-ранния възрастов стадий. Моноvlakнестите са технологични и ефективни за полагане на замазки върху всякакъв вид подово отопление и плаващи подови замазки. Подходящи са и за варово-циментови мазилки, като заменят стоманената или стъклената рабицова мрежа.

Разклонено-vlakнестите фибри имат правоъгълно напречно сечение и са свързани по между си механично. Това осигурява по-доброто им закотвяне във втвърдения бетон. Имат добро сцепление както с бетонната смес, така и с втвърдения бетон. Така се осигурява пълното използване на якостта на опън на нишките и успешното поемане на напреженията от температурни промени и структурни деформации през целия експлоатационен период. Затова армирания с такива фибри бетон има по-висока остатъчна якост.

Друг показател, влияещ върху закотвянето, е дължината на vlakнестата. Тя може да варира в границите 3-51 mm. При употреба на по-дълги vlakна трябва да се отчита възможността за неравномерно разпределение в обема на бетона и появата на проблеми при разбъркването на сместа.

Създадени са и специални смеси от фибри с различни дължини и структура-технологията „e3” на SI Concrete Systems. Например, такъв продукт е Novomesh e3 (смес от стоманени и полипропиленови фибри). Така се осигурява още по-добро взаимодействие с добавките в бетонната смес на всички зърнометрични нива.

Влагането на полипропиленови vlakна в бетонния разтвор намалява образуването на пукнатини до 100% и подобрява хомогенността на бетона. Специфичната плътност на полипропиленовите фибри е около 0,9 g/cm³, якостта на опън около 0,5 GPa. Модулът на еластичност е 5 GPa.

Малкото им специфично тегло, в сравнение със стоманата, прави строителната конструкция по-лека, без да се намалява носещата ѝ способност. Това, в комбинация с по-големите възможности за поглъщане на енергия при динамично

натоварване, прави полипропиленовите фибри незаменими при проектиране на конструкции в райони с повишена сеизмична опасност.

Армирането с полипропиленови фибри повишава устойчивостта на бетона срещу ударни, абразивни и динамични разрушаващи сили, увеличава неговата водонепропускливост и мразоустойчивост. Фибрите придават на армирания бетон "жилавост", което е уникално качество. Последното се проявява като остатъчна якост и запазване на целостта на конструкцията дори и след поява на пукнатини. Предимство на полипропиленовите фибри е, че за разлика от стоманените мрежи, те не корозират.

Полипропиленовите влакна се използват при бетонни настилки върху земна основа, замазки, мазилки, торкрети, бетонни елементи, сухи смеси, леки бетони. Армирани бетони с полипропиленови фибри, намират приложение за изработване на бетонни тръби, керемиди, плочки, бордюри, решетки, пилотни фундаменти, стълбове, вълноломи, фасадни панели. Използват се също и като заместител на разпределителна армировка. При торкретиране се постига по-голяма плътност и се намаляват загубите на материал. Благодарение на добрите си качества при динамично и ударно натоварване, и разбира се на дълготрайността си, армираният бетон с полипропиленови влакна се прилага с успех и при възстановяването на износени асфалтови пътни настилки. От друга страна, изключителната простота при работа, относително ниската цена и ефективността на полипропиленовите фибри против съсъхване, ги правят предпочитани за армиране на цименто-пясъчни замазки. Полипропиленовите влакна се използват при тънките подови замазки и настилки. В последните повишеното съдържание на цимент е предпоставка за образуване на пукнатини от съсъхване.

Някои видове фибри са произведени по специална технология с вграждане на

антимикробен агент и така осигуряват защита. Освен полипропиленови фибри, има и стоманени, които се използват в промишленото строителство.

Стоманени влакна

Стоманените влакна се получават чрез студено изтегляне на нисковъглеродна стомана [1]. На строителния пазар те се предлагат в различни форми и размери, като праволинейни, вълнообразни, спираловидни и др. Най-разпространените им дължини са от 35 до 50 mm, с различни диаметри и дебелини. Дисперсно армирания бетон със стоманени фибри притежава завишена якост на срязване и огъване. Затова той се явява добро строително решение за изпълнение на тежконатоварени индустриални подове. Якостта му на умора при циклично натоварване също е много по-голяма, в сравнение с обикновения бетон. Стоманените влакна, подобно на полипропиленовите, осигуряват добра възможност за поглъщане на енергия и работа при наличие на немалки пластични деформации, а също така и устойчивост на динамични натоварвания. Притежават специфична плътност около $7,8 \text{ g/cm}^3$. Якостта им на опън е между 1 и 3 GPa, а модулът на еластичност е 200 GPa. Тези техни характеристики определят в голяма степен практическото им приложение. Използват се за изпълнение на предварително напрегнати стоманобетонни елементи, на подове на производствени и обществени сгради, изложени на тежки условия и въздействия. В строителството се използват при изграждането на тунели и подземни пътища, за горен слой на пътни настилки, при изпълнението на летищни писти и мостове. Възможно е и приложението им в етажни плочи на жилищни сгради за поемане на вътрешните напрежения, подобно на полипропиленовите фибри. Най-широко е приложението на стоманените влакна в силно натоварени строителни елементи, като фундаменти под машини, хидродинамични конструкции [7].

Предимства на полипропиленовите и стоманените влакна

Полипропиленовите и стоманените влакна са една препоръчителна съставна част на всяка бетонова смес. С тях се постига значително редуциране на появилите се пластични деформации от температурните промени, съсъхването и пълзенето. По този начин се ограничава проникването на вода и соли в бетона, както и дълбочината на карбонизация. Намаляват се рисковете от корозия на циментовия камък и се гарантира дълъг експлоатационен период на строителната конструкция.

Използването на синтетични фибри е свързано и със значителни икономии на разходи за складиране, инсталиране и транспорт. При производството и приложението им нивата на отделиния в атмосферата въглероден диоксид са с 70% по ниски в сравнение с тези от производството на стоманените влакна.

Независими изпитвания, проведени в Австралия [1], показват, че напукани плочи от армиран със стоманени влакна бетон, тествани една година след като са изложени на въздействието на природните стихии, губят над 45% от способността си да поглъщат енергия, сравнено с измервания на 28-мия ден. Същите плочи, армирани със макросинтетични фибри, изложени на същите условия и период от време, губят само 0.2% от експлоатационните си характеристики. Този фактор силно променя в положителна посока отношението на много строителни специалисти към приложението на синтетичните фибри.

Целулозни влакнести пълнители

Основното вещество, определящо практическата стойност на памучните и ликовите влакна е целулозата [8]. Тя определя технологичните (здравина, разтегливост, и др.), а също така и експлоатационни свойства на материали от тези влакна.

Технология на армирането с фибри

Необходимото количество фибри се добавя в готовата бетонова смес на бетоновия възел или на строителния обект [1]. Препоръчителната дължина на фибрите не трябва да е по-голяма от максималния размер на пълнителя. Минималната дозировка зависи от преследваната за постигане строителна цел. Пет минути за разбъркване са достатъчни за пълното им смесване с бетоновата смес. Когато фибрите се добавят на строителния обект, те се изсипват в миксера на бетоновоза. Той също се върти с висока скорост около 5 min преди изливане или изпомпване на разтвора.

От гледна точка здравословните и безопасни условия на труд се препоръчва на работниците, добавящи фибрите в бетонната смес, да са снабдени с ръкавици и очила за адекватна защита на очите.

Видове приложения

· Пръскан бетон

Добавянето на влакна увеличава пластичността на пръскания бетон.

· Бетон с противопожарни свойства

Синтетичните микровлакна правят бетона много по-огнеустойчив. Влакната се добавят към бетонната смес по време на нейното производство. Ако избухне пожар, напр. в тунел, синтетичните влакна се разтопяват в бетона и това създава капилярна система, през която налягането на водната пара може да бъде облекчено [9].

· В бетонни настилки за пътища, писти

Влакната в бетонни подови плочи и писти значително намаляват пукнатините при свиване в ранна възраст и спомагат за стабилизиране на бетонната смес.

· Подови настилки

Влакната се използват в много видове подови замазки за подобряване на обработваемостта на пресния хоросан, освен това те подобряват свойствата и дълготрайността на втвърдената замазка чрез контролирано разпределение на пукнатини и намаляване на свиването.

· В предварителни бетонни модули

Използването на влакна в сглобяемия бетон води до олекотяване на бетоновите

изделия, тъй като възможното намаляване на усилването на стоманата намалява теглото и намалява времето за производство.

· *В бетон за възстановяване и реконструкция*

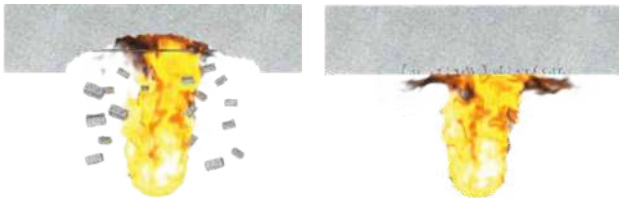
Ремонтни хоросани, формулирани и произведени с влакна, имат по-голяма издръжливост с подобро разпределение на пукнатини, също и повишена работоспособност поради способността им за преодоляване на пукнатини.

· *Във високоякостни бетони (HSC) и ултра високоэффективни бетони (UHPC)*

Високата структурна стабилност (товароносимост и способност за експлоатация) при екстремни условия (например земетресения) и много тънките компоненти изискват използването на HSC или UHPC [10].

· *Приложение на бетон, съдържащ полипропиленови фибри, с противопожарни свойства*

Полипропиленовите влакна дават значително или дори общо намаляване на такова експлозивно изсипване на бетон поради относително ниската им точка на топене от 160°C. Това означава, че влакната ще започнат постепенно да се топят почти веднага след като огънят започне и се създава капиллярна система, през която може да се изпари водата, без да се натрупва значително разрушително налягане [9].



Фиг. 5. Бетон без и с включени полипропиленови фибри

· *В бетони с повишена механична устойчивост*

Удароустойчивостта, якостта на разрушаване могат да бъдат значително увеличени чрез добавяне на

полипропиленови влакна. Синтетичните влакна и повечето стоманени влакна са подходящи. Комбинацията от влакна с висок и нисък Е-модул и голямо удължение при скъсване се оказва полезна. Подобряване на якостта на удар се наблюдава чрез добавяне на стоманени влакна, а също и полипропиленови влакна само в количества 0,1 об.%.

Използването на естествени влакна дава началото на разработването на екологични материали чрез намаляване на щетите, причинени от изкуствени материали и спестяване на невъзобновяеми ресурси. Естествените влакна са лесно и широко достъпни, устойчиви и биоразградими, с ниска цена и ниска плътност и имат превъзходни специфични свойства. Въпреки това има някои ограничения за естествените влакна в сравнение с изкуствените влакна.

В днешно време естествените влакна се използват за различни индустриални приложения за намаляване на собственото тегло на конструкцията в автомобилната авиация [5]. Следователно това изследване набляга главно на използването на техниките за повърхностна обработка за подобряване на механичните свойства на естествените влакна и тяхната приложимост в бетона, особено в строителството на гражданска инфраструктура като механизъм за задържане на пукнатини на бетона по време на предвидения живот на конструкцията.

Изводи

Установено е, че бетоновите строителни композитни материали, съдържащи влакнести пълнители (фибри), предлагат широк комплекс от предимства. Армираните с влакна бетони подобряват устойчивостта на разрастването на пукнатини, повишават якостните свойства и пожароустойчивостта на строителния материал.

Установено е, че полипропиленовите влакна повишават еластичността и

пластичността на бетона, което е от изключителна важност за устойчивостта на бетоновите конструкции към земетресения и други природни бедствия.

Изследвано е, че прилаганите фибри в бетонови материали намаляват риска от корозия, удължавайки периода на експлоатация на строителната конструкция.

Използвана литература

[1] Chandra, S., Ohama Y., *Polymers in Concrete*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1994; *Polymers in Concrete: The First Thirty Years*, Kaeding, A.O., and Prusinsk, R.C., ed., SP 214, 2003.

[2] Johnson, C.D., *In Progress in Concrete Technology*, Malhotra, V.M., ed., CANMET, Ottawa, 1980.

[3] Bentur A., Mindess S., "Fiber-reinforced cement composites", *Modern Concrete Technology Series*, Taylor & Francis, London, NY, USA, 2nd Ed., 2007.

[4] Serdar M., Baričević A., Jelčić Rukavina M., Pezer M., Bjegović D., Štirmer N., "Shrinkage behavior of fiber-reinforced concrete with recycled rubber polymer fibers", *International Journal of Polymer Science*, vol.2015, ID:145918, 2015.

[5] Krishna K.V., Venkateswara Rao J., Rao J.V., "Experimental study of the behavior of fiber-reinforced concrete for hard floors", *IOSR Journal of Mechanical and Construction Engineering*, vol.11, 4, 49–53, 2014.

[6] Castillo-Lara J.F., Flores-Johnson E.A., Valadez-Gonzalez A., *et al.*, "Mechanical properties of foam concrete reinforced with natural fibers", *Materials*, book 13, 14, 3060, 2020

[7] Aravind R., Das A., "Experimental study of the behavior of destruction of steel fibers," *Reinforced concrete*, book 04, p.10, 2017.

[8] Желева Д., *Полимери в текстилното, кожарското и обувното производство*, 2020, София, изд. „НТС по текстил, облекло и кожи“

[9] Springer International Publishing, "Thermal cracking of massive concrete structures," in *RILEM State of the Art Reports*, vol. 27, Springer International Publishing,

Berlin, 2019.

[10] Rossi, P., *Ultra-High Performance Reinforced Fiber Concretes*, *Concr. Int.*, Vol. 33, №12, pp. 46–52, 2001