



Получена: 31.12.2022 г.

Приета: 31.01.2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА КАРБОНБЕТОНА В СТРОИТЕЛСТВОТО

С. Бошнаков¹

Ключови думи: строителство, усилване, стоманобетон, карбонбетон, конструкции

РЕЗЮМЕ

Карбонбетонът (текстилбетон, армиран с въглеродна армировъчна мрежа) е материал, който се разработва в момента и все по-често се прибегва до експерименталното му прилагане в строителната област. В публикацията се разглеждат различните възможности за неговото прилагане като основен материал в изграждането на конструкции, изграждането на отделни елементи, и в усилването и възстановяването на съществуващи ст. конструкции и елементи.

1. Дефиниция (описание)

Свързаното вещество карбонбетон, познато като текстилбетон или текстилно армиран бетон, поради използването на въглеродни армировъчни мрежи се въвежда с понятието карбонбетон. Той се състои от високоякостна некорозираща въглеродна (карбонна) армировка и се разполага в матрица от дребнозърнест бетон, който представлява високоякостен бетон с малка зърнометрия. Чрез употребата на високоякостните бетони може да постигне максимално използване на опънната якост на високоякостната въглеродна армировка. Заедно с използването на дребнозърнест бетон вече започват да се прилагат и конвенционалните познати бетонни смеси, като при избора на рецепта на дадената бетонна смес трябва да се съобрази зърнометрията с използвания армировъчен материал [1, 2].

В Германия вече има разработен нормативен документ, чрез който се разрешава усилването на стоманобетонни конструкции на сгради с карбонбетон [3], тъй като

¹ Симеон Бошнаков, д-р инж., e-mail: simbosh07@gmail.com

Германия е водеща държава в разработването на материала от ТУ Дрезден и ТУ Ахен, освен това има разработени и някои други стандарти за неговото прилагане [40 – 43]. Този документ влиза в сила през 2014 г., като поставя началото на приложението на усилване на стоманобетонни конструкции с текстилбетон. Днес вече е познат като карбонбетон, който е с доста по-добри и високи якостни характеристики на използваните въглеродни материали. Към момента документът [3] е приложим при усилване и възстановяване само на сгради с карбонбетон, за прилагането на карбонбетон в конструкции на транспортната инфраструктура на мостове и тунели са необходими технически позволения за всеки конкретен проект, които се издават на базата на разработения инвестиционен проект след представянето пред съответния институт.

Съгласно [3] прилаганите дебелини усилващите слоеве могат да имат дебелина от 10 до 20 mm, като съответно се полагат не по-малко от два армировъчни реда. В документа са дефинирани конструктивните изисквания за прилагане на усилването. Основното предимство в този тип усилване е минималното повишаване на постоянните въздействия (натоварвания) върху конструкцията.

2. Характеристики на използваните армировъчни материали

За армирането на карбонбетона се използват само въглеродни материали, които могат да бъдат във вид на армировъчни пръти, мрежи или пространствени скелети в зависимост от вида на елемента, който трябва да бъде армиран. Те се изработват по предварителни размери съгласно проектното решение.

Използваните армировки за армирането на карбонбетона са развити в сравнение с тези, които са използвани при текстилбетона. При текстилбетона се използват армировки, различни от въглеродните, докато при карбонбетона въглеродните армировки са обновени. В началото на изследванията са използвани армировки от стъклени нишки с опънна якост от 600 до 1300 N/mm² [4]. С новите подобрени и развити технологии опънната якост на въглеродните армировъчни мрежи е повишена до 3000 N/mm² [5].

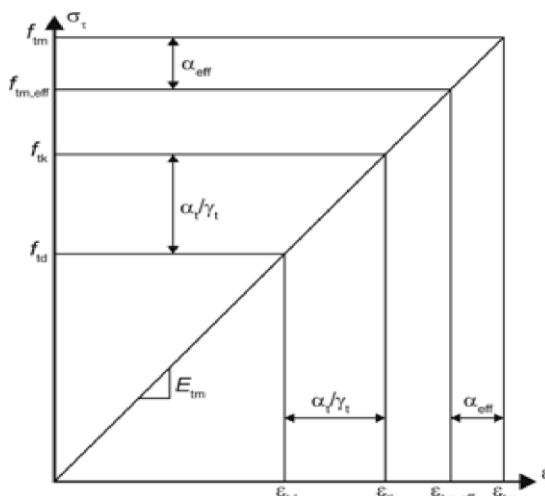
Освен подобренията в опънната якост новите поколения на въглеродната армировка показват и доста по-добра температурна устойчивост в диапазона от -20 °C до + 80 °C [6].

Използваният армировъчен материал, подобно на обикновената армировъчна стомана, може да бъде във вид на армировъчни мрежи, които са разработени за натоварване в едно или в две направления, като има и разработки със специални плетки за поемане на напречни сили. Отделните носещи пръти от мрежата се състоят от множество влакна, слепени едно към друго чрез епоксидна смола или полиакрилна основа. Основното предимство на въглеродната армировка е нейната устойчивост към всички реагенти, срещани в строителството [7].

Друг основен плюс на този тип армировка е възможността да бъде произведена във вид на рула, което улеснява транспорта ѝ до обекта и логистиката на самата строителна площадка, както и начина ѝ на полагане [7]. При отчитане на голямата опънна якост на използвания армировъчен материал от 3000 N/mm² и на високите коефициенти на сигурност се получава проектната опънна якост на армировъчния материал от 1200 – 1500 N/mm² [8].

Таблица 1. Характеристики на използваните армировъчни материали [8]

| Параметър | Мярка | Надлъжна посока | Напречна посока |
|--|----------------------|-----------------|-----------------|
| Е-модул E_{tm} | [N/mm ²] | 205,0 | 234,152 |
| Напрежения на разрушаване f_{tm} $f_{tm,eff}$ f_{tk} f_{td} | [N/mm ²] | 2,692 | 2,898 |
| | [N/mm ²] | 2,281 | 2,420 |
| | [N/mm ²] | 2,000 | 2,106 |
| | [N/mm ²] | 1,538 | 1,620 |
| Проектна стойност на удължението ϵ_{td} | [‰] | 7,5 | 6,9 |
| Осово разстояние между влакната A | [mm] | 38 | 38 |
| Площ на напречното сечение на влакнестата нишка A_{FS} | [mm ²] | 5,42 | 5,42 |



Фиг. 1. σ - ϵ линии за оразмеряване на напречното сечение [9]

3. Характеристики на бетонната смес

Предвид спецификата на използваните армировъчни мрежи при изработването на карбонбетон се налага и разработването на бетонни смеси, по-различни от традиционно използваните при познатите стоманобетонни конструкции. Затова в [3] се позволява използването на високоякостен дребно финбетон за усиление на конструкции. Този бетон трябва да има големина на зърнометричния състав от 1 mm, което дава възможност той да бъде полаган чрез пръскане на усиляната повърхност или ръчно чрез мазане към усиляната повърхност. След 28-ия ден финбетонът притежава якост на натиск от 80 N/mm² и опънна огъвателна якост, по-голяма от 6 N/mm², определена чрез призми с размери 40×40×160 mm. Високата опънна якост съдейства за доброто захващане на усиляния материал към усиляната конструкция. Освен това в техническото позволение са дефинирани и допълнителни експлоатационни класове за употребата на бетона при усилянето на мостове.

Освен използването на финбетон е възможна и употребата на други видове бетони, поради липсата на необходимост от защита на армировката от корозионни агенти. При използването на други видове бетонни смеси е необходимо да се докаже съответната опънна якост на използваната бетонна смес с цел избягване на разрушаване вследствие загубата на адхезия между усиляваната конструкция и усиления материал, в противен случай е необходимо осигуряването на допълнително дюбелиране.

При избора на бетонна смес, в която ще се поставя въглеродната армировка, е необходимо да се съобрази и едрината на добавъчния материал с вида на използваната армировка.

При проектирането на някои елементи от карбонбетон, като описания пилотен проект в [1], при който пътната плоча е изработена от карбонбетон с бетонна смес с якост на натиск C 50/60, в този случай бетонната смес отговаря на изискванията, дадени в Еврокод 2 [11] и DIN EN 206-1 [12]. В табл. 2 са показани якостните характеристики на плочата от карбонбетон, разработена за пилотния проект, описан в [1] съгласно [11].

Таблица 2. Характеристики на използвания бетон в пилотния проект описан в [1] съгласно [11]

| Параметър | Мярка | Стойност |
|--|----------------------|----------|
| Якост на натиск f_{cm} f_{ck} f_{cd} | [N/mm ²] | 58 |
| | [N/mm ²] | 50 |
| | [N/mm ²] | 28,3 |
| Опънна якост f_{ctm} | [N/mm ²] | 4,1 |
| Е – модул E_{cm} | [N/mm ²] | 37,000 |
| Разрушаващи деформации ϵ_{c2} ϵ_{cu2} | [‰] | 2,00 |
| | [‰] | 3,5 |

4. Приложение на карбонбетона в мостовото строителство

През последното десетилетие се наблюдава прилагането първоначално на текстилно армирания бетон в строителството на мостове, като първоначално бяха направени пилотни проекти на пешеходни мостове и множество изследвания за прилагане на текстилбетона за усиляване на отделни елементи на съществуващи мостове, както и тяхното възстановяване и осигуряване на дълготрайността им в бъдещата експлоатация на конструкциите. Бяха отчитени положителните резултати от тези изследвания и пилотни проекти и се разработи и обособи приложението на карбонбетона с вече усъвършенствани армировъчни материали при съществуващите мостове, както и при разработването на иновативни мостови конструкции, в които елементите от карбонбетон са в основата на конструкцията и формират нейната цялост и дълготрайност, използвайки положителните страни на карбонбетона.

4.1. Новоизградени мостови конструкции от карбонбетон

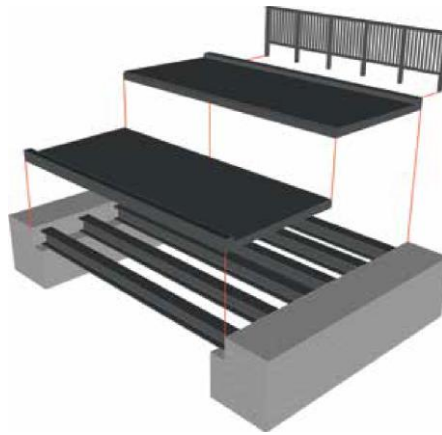
В последните години има построени доста пилотни проекти на мостови конструкции първоначално от текстилно-армиран бетон, а вече и от обособилата се нова разновидност на текстилбетона, карбонбетон. Първоначално около 2007 г. са построени няколко пешеходни моста от текстилбетон от техническия университет в Дрезден. Конструкциите на тези мостове представляваха съединени елементи от текстилбетон, като бяха обединени чрез предварително налягане до получаване на цялата конструкция фиг. 2 [13].



Фиг. 2. Пилотен проект пешеходен мост от текстилбетон в Кемптен [13]

Показаната конструкция на фиг. 2 е доста лека, с общо тегло от 12,5 t, за мостово съоръжение с дължина от 16,74 m и ширина 2,58 m. Конструкцията е сглобена в заводски условия и е транспортирана до мястото за монтаж.

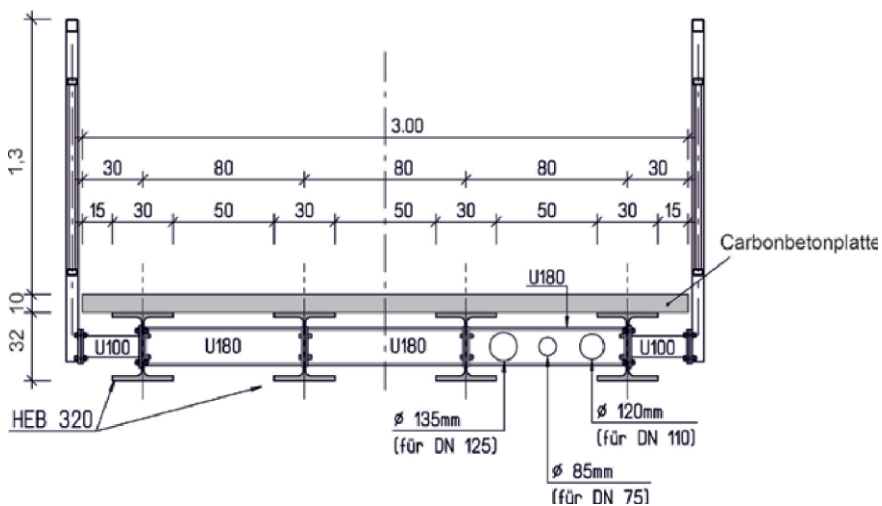
Последните пилотни проекти са за изграждане на малки пътни мостове от карбонбетон. Основното предимство при изграждането на пътни мостове от карбонбетон е по-малкият обем от необходимите материали за изграждане на моста, липсата от необходимост на дебели бетонни покрития за предпазване на армировката от външните реагенти, намалените емисии в атмосферата спрямо обикновения стоманобетон и не на последно място по-малките срокове, необходими за изпълнение на мостовите конструкции. В [2] са разгледани някои пилотни проекти, които доста ясно показват предимствата и вида на примерни конструктивни системи, които се прилагат в пилотни проекти. Това са два моста в Маргетхаузен и Пфедфинген. В тези два проекта конструкцията на мостовите съоръжения представлява плоча от карбонбетон, която стъпва върху стоманени греди. Натоварванията в напречна посока се поемат от карбонната бетонна плоча, а в надлъжна посока – от стоманените греди [2].



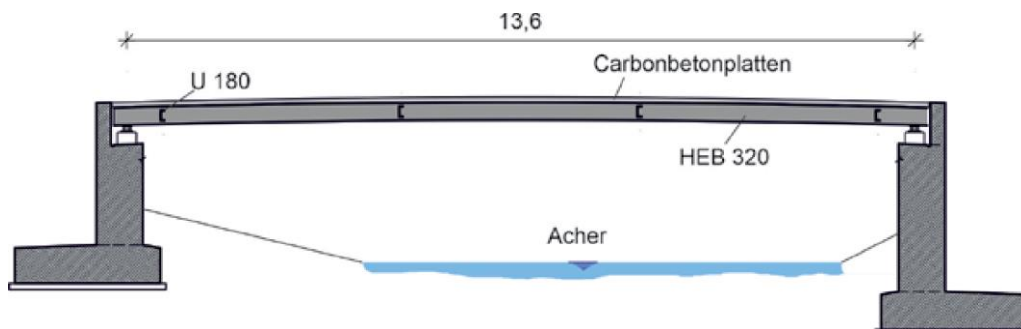
Фиг. 3. Изчислителен модел на моста в Пфединген [2]

Друг пример за малко отворен мост от карбонбетон е мостът в Гагенау, Германия [2]. В този проект мостът е кос, с дължина от 7 m и ширина от 3,1 m. Това налага разработването на армировъчни скелети със съответната форма, а премостването на отвора се осъществява чрез карбонна бетонна плоча с дебелина от 40 cm.

Друг пример на изграден мост от карбонбетон е мостът в Отенхьофен в Германия [1], който е пешеходен и велосипеден. Върхната конструкция на моста се състои от стоманени надлъжни греди HEВ 320, разположени през осово разстояние от 80 cm (фиг. 4). За осигуряване на стабилността в напречна посока са разположените стоманени U180 профили на 4 места (фиг. 5). Върху стоманената скара стъпват отделни бетонни елементи изработени от карбонбетон, които имат дебелина от 10 cm (фиг. 4). Бетонните плочи стъпват на еластомерни подложки върху стоманените греди, като за напречни въздействия са точно свързани към металната конструкция. В конкретния проект проектните проверки за стоманените елементи са извършени без отчитане на действието на бетонната плоча. В [1] се отбелязва, че надлъжните въздействия се поемат от стоманената конструкция, а напречните въздействия от бетонната плоча.



Фиг. 4. Напречен разрез на мост в Отенхьофен [1]



Фиг. 5. Надлъжен разрез на мост в Отенхьофен [1]

4.2. Възстановяване и усилване на мостове с карбонбетон

Първоначално са направени множество изследвания за прилагане на текстилно-армиран бетон за възстановяване и усилване на стоманобетонни елементи и конструкции впоследствие са направени изследвания за прилагане на вече обособилия се материал карбонбетон. Едно от основните предимства при прилагането на карбонбетона при съществуващите стоманобетонни конструкции е изключително добрата адхезия, която се постига със съществуващия бетон, както и малката дебелина на усилващия слой в сравнение с други методи на усилване с други материали. Освен това карбонбетонът не се влияе от слънцето и от други химични реагенти подобно на карбонните нишки, които са широко прилагани в конвенционалното усилване на съществуващи мостови конструкции.

В [17 ÷ 19] се разглеждат експерименти, проведени в УАСГ, при които се изследва дълготрайно циклично натоварване върху стоманобетонни мостови греди, усилени с карбонбетон. В експериментите е изследвана промяната в адхезията между усилвания стоманобетонен елемент при различни циклични натоварвания във времето, както и промяната в носимоспособността на усилените елементи. Публикуваните резултати и анализи в [18 и 19] показват изключително добро поведение на усилващата система по отношение на носимоспособността и адхезията със съществуващия стоманобетонен елемент, както и липса на загуба на носеща способност при натоварване на изследваните образци до разрушаване при различните цикли на натоварване.

Това увеличава възможностите за прилагане на материала към съществуващи мостове. Затова, освен за чисто статическо усилване, карбонбетонът може да бъде използван и за възстановяване и увеличаване на дълготрайността на стоманобетонните конструкции. Това се дължи на доброто сцепление на карбонната армировъчна мрежа с бетона. Пукнатините, които се получават в карбонбетона, са множество с много малки размери. Затова карбонбетонът може да бъде използван върху реални конструкции, като се показва увеличаване на дълготрайността върху реална конструкция. Пример за практическо приложение на карбонбетона като материал за възстановяване е дъговият мост в Найла [20] (фиг. 6). Мостът е построен през 1910 г. и се състои от три неармирани бетонни дъги.

В анализа и избора на материал, разгледан в [20], се налага и икономическата целесъобразност за избора на карбонбетон като защитен материал за дъгите, като в конкретния случай е положен в максимална дебелина от 20 mm.



Фиг. 6. Възстановяване на дъгов мост в Найла Германия [20]

Овен с цел възстановяване и осигуряване на дълготрайността на конструкцията карбонбетонът може да бъде използван за усилване на огъване поради високата си ефективност и високата якост на въглеродните армировъчни мрежи [5]. В много изследвания в усилването на мостови конструкции при дълготрайно циклично натоварване той показва доста добра адхезия с бетона на усилвания елемент [5, 17 ÷ 19]. В [5] се забелязва и значителното увеличаване в носимоспособността на огъване от 3 до 4 пъти.

Освен за усилването на чисто огъване карбонбетонът се прилага и за усилването на кутиеобразни мостови сечения, при които е необходимо усилване на огъване със срязване. Едно от основните предимства при този вид усилване е тънкият усилващ слой, който се нанася към конструкцията и добрата адхезия, която се създава със съществуващата конструкция. Това не налага допълнително дюбелиране, което би наранило съществуващата напрегната и ненапрегната армировка в стоманобетонното сечение, както би било при едно усилване с пръскан бетон. Допълнителна информация е разгледана в [21].

Карбонбетонът може да се прилага и за усилване на конструкции поради налагащата се необходимост от преминаването на извън нормативен товар. В такива случаи е необходимо избирането на максимално икономически ефективен и времеви ефективен начин на усилване. В тези случаи се търси вариант за усилване на конструкцията, който не е свързан с особено сложни строителни процеси, които да налагат дълго отклоняване на трафика и съответно много средства и ресурси. Затова карбонбетонът е доста подходящ материал, като простота на разработените начини за усилване, както и ефективността по отношение на усилваните стоманобетонни елементи. Такъв пример е разгледан в [21]. Но преди това са извършени съответните изпитвания за мостовото съоръжение съгласно [22], и са извършени проектните проверки съгласно [23 и 24] по отношение на въздействията на усукване.

Усилването на съществуващи мостове за напречни сили посредством карбонбетон към момента все още е обект на задълбочени изследвания. Изследванията, разгледани в [25 ÷ 27], показват, че носимоспособността на усилените елементи за напречни сили е значително по-голяма от носимоспособността на неусилените. Освен това от проведените

циклични натоварвания на образци усилен за напречни сили не се вижда значително намаляване в носимоспособността на усилен елементи с карбонбетон за напречни сили, подложени на дълготрайно циклично натоварване, описани в [28 и 29].

Подобни експерименти за усиление на мостове се провеждат и в ТУ Инсбрук, като при тях усиленият слой се закрепва към конструкцията посредством дюбелна връзка. В това усиление се показва още по-високо увеличаване на носимоспособността спрямо неусилените елементи. В скоро време се очаква и появата на усилен мост в Австрия [30]. Освен за горепосочените методи за усиление карбонбетонът се прилага и в усиляването на пътни плочи [31].

4.3. Потенциал на усиляването с карбонбетон и актуално състояние на съществуващата нормативна уредба

В последните години са направени множество изследвания за усиление на стоманобетонни мостове с карбонбетон, при които материалът показва изключително добро поведение. Основните предимства на карбонбетона са малката дебелина на усиления слой и високата якост на въглеродната армировка, които са основната причина за добрата ефективност, която се постига при усиление или възстановяване на бетонното покритие на конструкцията. Полагането на усилящата система в тънки слоеве също подобрява икономическата ефективност и скоростта на изпълнение на конструкцията, което от своя страна при транспортната инфраструктура е от особено значение, както и минималното намаляване на транспортния габарит при прилагането на усилящата система при пътни надлези, което е от особено значение поради постоянно увеличаващите се транспортни габарити в годините.

Към днешна дата основните недостатъци са липсата на технически стандарти за прилагането на материала за усиление на конструкции, като би трябвало до няколко години да се появят такива. Това забавя и ограничава прилагането на материала.

В Германия е възможно усиляването само на огъване на вътрешни стоманобетонни елементи под постоянно нединамично натоварване съгласно [3] за всички останали проекти, в които е прилаган карбонбетонът, са използвани единични технически разрешения за конкретните проекти.

5. Приложение в строителството на сгради и съоръжения

В следствие на множеството проведени експерименти и изследвания през последните 20 години в разработването на множество изделия и материали първоначално от текстилно-армиран бетон, а вече и от карбонбетон, е налице строителството на първата сграда от карбонбетон. Пилотният проект (фиг. 7) се разработва на територията на техническия университет в Дрезден и сградата ще бъде използвана за конгресни събития и изложби. В този проект се виждат нестандартните архитектурни форми, зададени от архитектурното решение, които могат да бъдат изпълнени посредством карбонбетон. В конкретния проект се вижда изобилието и свободата във формите, които се задават от карбонбетона, както и минималната дебелина в сравнение със стоманобетонна, при която изпълнението на тези форми би било значително по-трудно и почти невъзможно.



Фиг. 7. Сграда, изпълнена от карбонбетон [32]

С този проект ще се види дълготрайността на цяла сграда, изпълнена от материала, както и неговата възможност за по-нататъшно конвенционално приложение в строителството.

6. Предварително напрегнат карбонбетон

Подобно на стоманобетона вече има проведени изследвания за приложение и на предварително напрегнат карбонбетон. За реализирането на предварително напрегнат карбонбетон се използват армировка въжета, пръти или пластини от карбон или пластмаси въглеродно усилени, за краткост наричани карбонна армировка [33 ÷ 36]. За образуването на пластмасовата матрица се използват дуро- или термопластични полимери. Основното предимство на карбона като материал за предварително напрегнати елементи е неговата лекота, устойчивост на умора, висока якост и корозионна устойчивост. За напрегащи елементи от карбонбетон могат да се използват влакна, ламели, кабели, пръти и мрежи. Основният принцип на работа на предварително напрегнатия карбонбетон не се различава от работата на конвенционалния стоманобетон.

Бетонни мостове, в които е използвана напрегаща карбонна армировка не са новост [33 и 35]. Още през 1988 г. са изпробвани напрегащи елементи от карбонна армировка в около 30 бетонни моста [33, 35].

7. Екологични аспекти на карбонбетона

В днешни дни е налице преобразуване на индустриалния свят вследствие на настъпващите глобални промени и преориентирането на света към по-екологични материали и стратегии за намаляване на въглеродният отпечатък, което ще доведе до промени и на строителната индустрия несъмнено. Един такъв материал, който намалява

употребата на ресурси, е карбонбетонът. Чрез него е необходим значително по-малък обем материал за постигане на същата носимоспособност в сравнение със стоманобетонните конструкции, както и при усилване и възстановяване също на стоманобетонни елементи с него в сравнение с познатите (конвенционални начини) за усилване могат да се понижат емисиите на CO² до 52 %, както и употребата на ресурси до 85 % съгласно [37].

8. Заключение

Карбонбетонът е материал, който все по-често се прилага при реконструкция, усилване и възстановяване, както и при изграждане на нови конструкции, макар само в пилотни проекти. Оценявайки до голяма степен неговата прилика по отношение на проектни методи, начини на конструиране с конвенционалния стоманобетон, както и проектните проверки за изчисляване на конструктивните елементи, които като подход и философия са сходни, този материал би трябвало доста успешно да се внедри за масово прилагане в строителните конструкции.

За масовото прилагане на материала е необходимо да се събере още опит относно неговата дълготрайност и поведение във времето, в строителните конструкции, както при усилените стоманобетонни конструкции с него. Освен това към момента няма разработени международни стандарти за проектиране и усилване на конструкции с него, както и за изпълнение, което го прави неприложим за конвенционалното строителство.

Карбонбетонът е материал с голям потенциал, който се нуждае от време за доразвиване и изучаване от инженерите и строителите, за да се прила мащабно в строителния сектор.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rempel, S., Nigl, D., Bielak, J.* Bemessung der Carbonbetonbrücken in Ottenhöfen. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium – Ergänzungsband 2021, 08./09.03.2021 (digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2021.
2. *Rempel, S., Kanschin, E.* Reduzierte Bauzeit bei Ersatzneubauten von Straßenbrücken. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium, 09./10.03.2020, verlegt auf 08./09.03.2021 (digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2021.
3. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-31.10-182: Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT® (Textilbewehrter Beton). Geltungsdauer: 01.12.2016–01.06.2021.
4. *Hegger, J., Will, N., Schneider, M.* Textilbeton: Tragverhalten – Bemessung – Sicherheit. In: Curbach, M., Ortlepp, R. (Hrsg.): T Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6), Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche SFB 528 (Dresden) und 532 (Aachen) am 19./20.09.2011 in Berlin, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2011, S. 269–284.
5. *Müller, E., Schmidt, A., Schumann, A., May, S., Curbach, M.* Biegeverstärkung mit Carbonbeton. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020) 10, S. 758–767.
6. *Holz, K., Curbach, M.* Zugtragverhalten von Carbonbeton unter Hochtemperaturbeanspruchung. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020) 3, S. 231–240 – DOI: 10.1002/best.2019000.

7. *Hentschel, M., Schumann, A., Ulrich, H., Jentzsch, S.* Sanierung der Hyparschale Magdeburg. Bautechnik 96 (2019) 1, S. 25–30 – DOI: 10.1002/bate.201800087.

8. *Rempel, S., Nigl, D., Bielak, J.* Bemessung der Carbonbetonbrücken in Ottenhöfen. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium – Ergänzungsband 2021, 08./09.03.2021 (digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2021.

9. *Spelter, A., Bergmann, S., Bielak, J., Hegger, J.* Long-Term Durability of Carbon-Reinforced Concrete: An Overview and Experimental Investigations. Applied Sciences 9 (2019) 8, 1651 – DOI: 10.3390/app9081651.

10. *Riegelmann, Ph., May, S., Schumann, Al.* Das Potential von Carbonbeton für den Brückenbestand das ist heute schon möglich!

11. DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.

12. DIN EN 206:2017-01: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Deutsche Fassung EN 206: 2013+A1:2016.

13. https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/die_fakultaet/news-1/ordner_pressemeldungen/ordner_presse07/kempten_poseten_na_24.12.2022.

14. *Michler, H.* Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton – Rottachsteg Kempenim Allgäu. Beton- und Stahlbetonbau 108.(2013) 5, S. 325–334 – DOI: 10.1002/best.201300023.

15. *Mittelstädt, J.* Remstalbrücken – Kombination von Carbonbeton und Holz. C3 – Carbon Concrete Composite e. V., TUDALIT e.V. (Hrsg.): Tagungsband der 11. Carbon- und Textilbetontage, 24./25.09.2019 in Dresden, 2019, S. 52–53.

16. *Helbig, T., Unterer, K., Kulas, C., Rempel, S., Hegger, J.* Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen. Beton- und Stahlbetonbau 111(2016) 10, S. 676–685 – DOI: 10.1002/ best.201600058.

17. *Boshnakov, S.* Evaluation of the influence of cycle loading on the adhesion of beams strengthened with textile reinforced concrete. Annual of the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy Sofia. Volume 49, Issue 4, 2016 Sofia.

18. *Boshnakov, S.* Experimental study on the use of textile reinforced mortar for strengthening concrete beams of bridges. Annual of the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy Sofia. Volume 51, Issue 3, 2018 Sofia

19. *Boshnakov, S.* Retrofitting and strengthening of concrete elements and bridge structures. Ph, D, Thesis UACG, Sofia 2017.

20. *Al-Jamous, A., Uhlig, K.* Sanierung der historischen Betonbogenbrücke in Naila. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 27. Dresdner Brückenbausymposium – Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken, 13./14.03.2017 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2017, S. 71–78.

21. *Steinbock, O., Curbach, M., Bösche, T.* Ertüchtigung einer Stahlbetonstraßenbrücke mit Carbonbeton. In: Foster, F., Gilbert, R., Mendis, P., Al-Mahaidi, R., Millar, D. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Brückenkolloquium – Fachtagung für Beurteilung, Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Brücken, 08./09.09.2020 in Esslingen, Esslingen: Technischen Akademie Esslingen, 2020, S. 651–662.

22. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – Abteilung Straßenbau: Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosions-gefährdetem Spannstahl erstellt wurden (Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion), Ausgabe Juni 2011.

23. *Schladitz, F.* Torsionstragverhalten von textilbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen. Diss., TU Dresden, 2011.

24. Müller, E. Torsionsversuche an carbonbetonverstärkten Plattenbalken mit neuen Carbonbewehrungssystemen – Experimentelle und analytische Betrachtungen. Diss., in Fertigstellung.
25. Adam, V., Will, N., Hegger, J. Verstärkung für Fahrbahnplatten von Massivbrücken aus Textilbeton: Versuche im Rahmen einer Demonstratorrealisierung. Bauingenieur 96 (2020) 3, S. 85–95 – DOI: 10.37544/0005-6650-2020-03-33.
26. Brückner, A. Querkraftverstärkung von Bauteilen mit textilbewehrtem Beton. Diss., TU Dresden, 2011.
27. May, S., Schumann, A., Bergmann, S., Curbach, M., Hegger, J. Versuche zur Querkraftverstärkung mit Carbonbeton. Bauingenieur 97 (2021).
28. Wagner, J., Spelter, A., Hegger, J., Curbach, M. Ermüdungsverhalten von Carbonbeton unter Zugschwellbelastung. Beton und Stahlbetonbau 115 (2020) 9, S. 710–719 – DOI: 10.1002/best.201900104.
29. May, S., Schumann, A., Schütze, E., Curbach, M. Querkraftverstärkung aus Carbonbeton unter zyklischer Beanspruchung. In: Foster, F., Gilbert, R., Mendis, P., Al-Mahaidi, R., Millar, D. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Brückenkolloquium – Fachtagung für Beurteilung, Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Brücken, 08./09.09.2020 in Esslingen, Esslingen: Technischen Akademie Esslingen, 2020, S. 643–650.
30. May, S., Schumann, A., Bergmann, S., Curbach, M., Hegger, J. Versuche zur Querkraftverstärkung mit Carbonbeton. Bauingenieur 97 (2021) 3.
31. Egger, M., Walzl, C. Brückenverstärkung mit Textilbeton – Einblick in ein österreichisches Pilotprojekt. In: C3 – Carbon Concrete Composite e. V., TUDALIT e. V. (Hrsg.): Tagungsband der 12. Carbon- und Textilbetontage, 22./23.09.2020 in Dresden, S. 18–19.
32. https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_The_Cube_first_carbon_concrete_building_in_the_world_3536699.html.
33. Apitz, An., Jesse, Fr., Schlaich, M. Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton. 31. Dresdner Brückenbausymposium. Dresden 2022.
34. Apitz, A. Vorgespannter Carbonbeton im Brückenbau. Beitrag zum werkstoffgerechten Entwerfen und Bemessen. Diss., TU Berlin, 2020.
35. Karbhari, V. M. Use of Composite Materials in Civil Infrastructure in Japan. World Technology Evaluation Center (WTEC) Division of Loyola University Maryland, Baltimore, MD, USA, 1998.
36. Ushijima, K., Enomoto, T., Kose, N., Yamamoto, Y. Field deployment of carbon-fiber-reinforced polymer in bridge applications. PCI Journal 61 (2016) 5
37. Schumann, A., Schladitz, F., Schöffel, J., May, S., Curbach, M. Ressourceneinsparung mit Carbonbeton – Am Beispiel der Verstärkung der Hyparschale in Magdeburg. In: Hauke, B. (Hrsg.): Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz, Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen – Aktueller Stand der Technik, Berlin: Ernst & Sohn, 2021.
38. Peled, A., Bentur, B., Mobasher, B. Textile Reinforced concrete. 2019, CRC Press.
39. Report 36: Textile Reinforced Concrete – State of the Art Report of RILEM TC 201 – TRC.
40. ACI SP – 250: Textile – Reinforced Concrete.
41. ACI SP – 251: Design and Applications of Textile -Reinforced Concrete.
42. ACI SP – 345: Materials, Analysis, Structural Design and Applications of Textile Reinforced Concrete/ Fabric Reinforced Cementitious Matrix.
43. ACI 549.4R – 13 Guide to design and Construction of Externally Bonded Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures.

USE OF CARBONCONCRETE IN CONSTRUCTION

S. Boshnakov¹

Keywords: *structures, concrete, construction, carbon concrete, strengthening, retrofitting*

ABSTRACT

Carbon concrete is a material that is currently being developed and is more and more often being applied experimentally in the construction field. The paper examines the various possibilities for its application as a basic material in the construction of structures and in the construction of individual elements. There is another use of this material in strengthening and retrofitting reinforced concrete structures and elements.

¹ Simeon Boshnakov, Dr. Eng., e-mail: simbosh07@gmail.com