

Construction

**Сика България ЕООД**  
Централен офис:  
гр. София  
бул. „Ботевградско шосе“ № 247  
тел.: +359 2 942 45 90  
факс +359 2 942 45 91  
info@bg.sika.com; www.sika.bg



Construction



**Sika® CarboDur® FRP**  
полимерни композити,  
усилени с нишки за възстановяване  
и усилване на строителни конструкции



1. РЕЦЕНЗИЯ .....	4
2. УВОДНА ЧАСТ .....	10
2.1. Значимост на възстановяването, усилването и сеизмичното укрепване .....	10
2.2. Дефиниции .....	10
2.3. Предмет на ръководството .....	11
3. ПРОЕКТИРАНЕ ПРИ ВЪЗСТАНОВЯВАНЕТО И УСИЛВАНЕТО НА КОНСТРУКЦИИТЕ .....	12
3.1. Точна оценка на капацитета на вече изградените конструкции .....	12
3.2. Преоценка на натоварването .....	12
3.3. Отстраняване на концептуални и конструктивни грешки .....	13
3.4. Правилен избор на конструктивна интервенция .....	13
3.5. Избрани техники на ремонтване .....	13
3.6. Усилване на конструкцията .....	13
3.7. Инженерна оценка: схема на процеса .....	14
4. ТЕХНИКИ ЗА ВЪЗСТАНОВЯВАНЕ И УСИЛВАНЕ НА КОНСТРУКЦИЯТА .....	15
4.1. Техники за възстановяване .....	15
4.1.1. Инжектиране на смола .....	15
4.1.2. Възстановяване чрез запълване .....	15
4.1.3. Торкрет бетон .....	15
4.2. Техники на усилване .....	16
4.2.1. Усилване на армировката .....	16
4.2.2. Усилване със стоманобетонни кожуси .....	16
4.2.3. Външно прикрепени ламели или тъкани .....	16
4.2.4. Предварително напрегнати външно прикрепени ламели .....	17
4.2.5. Усилване със стоманени кожуси .....	17
4.2.6. Усилване чрез допълнителна външна армировка - /полимерни композити усилени с нишки /-ПУН/FRP/ обшивки .....	17
5. ВЪВЕДЕНИЕ В ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ПОЛИМЕРНИ КОМПОЗИТИ, УСИЛЕНИ С НИШКИ (FRP) ЗА УСИЛВАНЕ НА СТРОИТЕЛНИ КОНСТРУКЦИИ .....	19
5.1. Стандартни технологични методи на усилване .....	19
5.2. Полимерни композити усилени с нишки (FRP) .....	19
5.3. Полимерни композити усилени с нишки (FRP) - състав на материалите .....	21
5.3.1. Нишки .....	21
5.3.2. Лепило .....	22
5.3.3. Матрица .....	22

5.4.	Коефициент на сигурност на полимерните композити, усилени с нишки (FRP материали) .....	23
5.5.	Механични свойства на полимерните композити, усилени с нишки, FRP .....	23
5.6.	Сравнение на FRP системите: Ламели - Нишки .....	25
5.7.	Дълготрайност на FRP материалите .....	27
5.7.1.	Противопожарна защита .....	27
5.7.2.	Ултравioletово лъчение .....	27
5.7.3.	Умора .....	27
5.7.4.	Пълзене .....	28
5.7.5.	Динамичен удар .....	28
5.7.6.	Температура .....	28
5.7.7.	Влага .....	29
5.7.8.	Галванична корозия .....	29
5.7.9.	Алкалност/киселинност .....	29
5.8.	Преимущества и недостатъци на FRP материалите .....	29
5.9.	Възможни приложения на FRP материалите .....	30
6.	<b>ПРОГРАМА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ И ИЗЧИСЛЕНИЕ НА CARBODUR КОМПОЗИТНИ МАТЕРИАЛИ FRP</b> .....	31
6.1.	Теоретични постановки .....	31
6.1.1.	Увеличаване носимоспособността при огъване .....	31
6.1.2.	Усилване по отношение на якостта на срязване .....	37
6.1.3.	Обвиване с FRP материал .....	39
6.2.	Използуване на програмата за изчисление на Carבודur FRP материалите .....	42
6.2.1.	Обща част .....	42
6.2.2.	Усилване на конструкцията по отношение на огъване .....	43
6.2.3.	Усилване по отношение на срязване на елемента	
6.2.4.	Обвиване с FRP материал .....	57
6.2.5.	Опции .....	60
6.2.6.	Отпечатване .....	61
7.	<b>ПРИМЕРИ ЗА ИЗПОЛЗУВАНЕ НА ПРОГРАМАТА ЗА ИЗЧИСЛЕНИЕ НА CARBODUR FRP МАТЕРИАЛИТЕ</b> .....	62
7.1.	Пример за усилване по отношение на огъване .....	62
7.2.	Пример за усилване на срязване .....	63
7.3.	Пример за обвиване на елемент .....	63

<b>8. ПОДРОБНИ ИНСТРУКЦИИ ЗА ПРИЛАГАНЕ НА CARBODUR FRP МАТЕРИАЛИТЕ</b> .....	65
8.1. Увеличаване якостта на огъване .....	65
8.1.1. Препоръки .....	65
8.1.2. Многослойно изпълнение на усилването от FRP материали .....	66
8.1.3. Област на анкерно укрепване .....	66
8.2. Усилване по отношение на срязване .....	66
8.2.1. Препоръки .....	67
8.3. Обвиване на елемента .....	68
8.3.1. Препоръки .....	68
8.4. Препоръки при работа във влажна среда .....	69
8.4.1. Препоръки .....	69
<b>9. SİKA СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ</b> .....	70
9.1. Sika технологиите в действие .....	70
9.2. CarboDur FRP системи - на базата на полимерни композити, усилени с нишки .....	71
9.2.1. Sika Carbodur системи .....	71
9.2.2. SikaWrap системи .....	72
9.2.3. SikaDur свързващи вещества и импрегниращи смоли .....	74
9.3. CarboDur допълнителни системи .....	75
9.3.1. CarboShear L системи - системи за усилване на срязване .....	75
9.3.2. CarboHeater - нагреватели .....	75
9.3.3. Прегварително напрегнати FRP материали .....	76
<b>10. СЛУЧАИ НА УСИЛВАНИЯ ЧРЕЗ FRP МАТЕРИАЛИ В БЪЛГАРИЯ</b> .....	79
10.1. Мост № 2 на р. Марица, по път II-56 .....	79
10.2. Пътен надлез над ж.п. линии, гр. Стамболийски .....	80
10.3. Търговски център - ГУМ, Ловеч, реконструкция .....	81
10.4. Административна сграда на БТК, София, реконструкция .....	83
10.5. Търговски център, ул. Капитан Райчо, Пловдив .....	83
10.6. Резидентна сграда в района на Родопската яка .....	84
10.7. Усилване на Джумая сжамия /1364г./, гр. Пловдив .....	85
<b>11. БЕЛЕЖКИ</b> .....	86

## РЕЦЕНЗИЯ

### от доц. г-р инж. мат. Георги Дянков Георгиев

Относно: Ръководство за проектиране усилването на стоманобетонни конструктивни елементи чрез външно залепени полимерни композити, усилени с нишки

Ръководството за проектиране и програмата за изчисление на усилването на стоманобетонни конструкции чрез външно залепени полимерни композити, усилени със стъклени, въглеродни и араמידни нишки, по системите на Sika - Sika CarboDur и SikaWrap, е разработено от Sika Гърция в сътрудничество с факултета по строително инженерство при университета в Патрас, Гърция. То е основано на световния опит на Sika при прилагане на тези системи през последните години и ползва за нормативна база бюлетин № 14 на **fib** от юли 2001г. Ръководството се състои от 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10 раздели.

Във въводната част №2 са дадени :

- Условието за възникване на необходимостта от възстановяване, усилване и сеизмично укрепване на строителните стоманобетонни конструкции конструкции, с цел повишаване на тяхната дълготрайност, устойчивост на стареене и агресивни среди, а също така за увеличаване на носимоспособността при нарастване на експлоатационните товари.

- Дефинирани са такива важни понятия като: изисквана носимоспособност; налична носимоспособност; остатъчна носимоспособност (при наличие на данни за намаляване носимоспособността от влошено качество); загуба на носимоспособност - като разлика между наличната и остатъчната носимоспособности.

- Дадени са понятия за Ремонт и Усилване на строителни конструкции със съответните графики за изискваната, наличната и остатъчната носимоспособности.

В част №3 формулирана:

„Проектиране при конструктивното възстановяване и усилване“ са дадени:

- Стандартна схема за реконструкция (подобрене на конструкциите).

- Точна оценка на носимоспособността на вече изградените конструкции - т.е. действителната им носимоспособност.

- Преоценка на натоварването - точно определяне на действителните действащи постоянни и временни товари.

- Отстраняване на концептуални и конструктивни грешки - при прилагане на неподходящи детайли, некачествени строителни материали и др.

- Правилен избор на конструктивна интервенция - чрез надежден структурен анализ се определя необходимото ниво на усилване, от което се нуждае конструкцията и/ или допълнение на нови строително - конструктивни елементи.

- Избрани техники на ремонтване - на база направения структурен анализ се определят съответните техники.

- Усилване на конструкцията - на база направена инженерна оценка на конструкцията се разработва съответната стратегия за усилване със съответните техники.

В част №4 формулирана:

„Техники за възстановяване на конструкцията и усилване“ са гадени:

- Техниките за възстановяване с цел да се възстанови първоначалната носеща способност и/или да се защити от по-нататъчно разрушение конструкцията, които включват:

- Инжектиране на смола (епоксидна);
- Възстановяване чрез запълване;
- Полагане на водоплътен бетон/торкретбетон в комбинация с армирани мрежи;

- Техники на усилване - това е свързано с повишаване на носимоспособността или стабилността на строителната конструкция, като може:

● Да се вложат по-високо якостни материали(на мястото на дефектни или нискокачествени материали), като се обърне внимание на взаимодействието между стари и нови материали;

● Да се добавят нови носещи елементи в строителната конструкция, като се отчете влиянието им върху цялата конструкция.

- Техниките за усилване включват :

● Усилване на армировката - при наличие на неподходяща (с по-малко напречно сечение) армировка или корозирали участъци, с (или без) последващо напояване и полагане на външно покритие.

● Усилване със стоманобетонни кожуси - много ефективно при необходимост от повишена носимоспособност и коравина на стоманобетонния елемент.

● Усилване с външно свързани плоскости или тъкани - стоманени листове или ленти от CFRP (от въглеродни влакна споени с епоксидна смола) залепени към бетонните повърхности с епоксидни смоли. При този начин на усилване увеличението на размерите на усилвания участък е минимално.

● Усилване с предварително напрегнати външно свързани ленти - лепени или нелепени стоманени листове или CFRP елементи, като се вземат необходимите мерки за ограничаване на приплъзването на напрегнатата армировка в анкера и се изпълни съответната защита срещу пожар и корозия.

● Усилване със стоманени кожуси - полагане на стоманен кожух около стоманобетонния елемент и полагане на монолитно бетонно покритие или торкретбетон - постига се повишена носимоспособност за вертикален товар и сръзваща сила, а също така и повишена коравина.

● Усилване чрез полагане на външни FRP обвивки от тъкани от стъклени, въглеродни или арамидни влакна, напоени с епоксидна смола. Те могат да се положат върху всеки конструктивен елемент и са много подходящи при възстановяване и усилване в сеизмични райони - повишава се деформируемостта и носимоспособността на сръзване. В сравнение със стоманобетонните и стоманени кожуси усилените елементи са с по-малка коравина.

Влиянието на различните техники на усилване върху деформируемостта, якостта и носимоспособността на конструкцията е гадена в таблица.

В част №5 формулирана като:

„Въведение в използването на композитни материали за усилване на строителни конструкции, базирани на полимерни нишки (FRP)“ са гадени:

- Стандартни технологични методи за усилване - залепяне на стоманени листове към конструкцията с епоксидни смоли; полагане на стоманобетонен кожух; посочени са предимствата и недостатъците на стандартните методи.

- Композити за усилване на строителни конструкции, базирани на полимерни нишки (FRP) - от въглеродни (CFRP), стъклени (GFRP) и арамидни (AFRP) нишки, споени в ленти или еластични тъкани и нетъкани тъкани в една или две посоки.

- Съставни композити с армирани влакна:

- Влакна - дадени са трите типа влакна: въглеродни, арамидни, стъклени с техните якостно деформационни характеристики и корозионна устойчивост.

- Лепило - епоксидни лепила с техните основни характеристики: срок на годност при смесване, отворено време за работа и температура за преминаване в стъклообразно състояние ( $T_g$ ).

- Матрица - най-често приложими са епоксидните смоли.

- Коефициент на сигурност на композитните материали за усилване на строителни конструкции, базирани на полимерни нишки - дадени са коефициентите на сигурност на композитните материали - CFRP, AFRP, GFRP.

- Механични свойства на композитните материали за усилване на строителни материали, базирани на полимерни нишки - чрез правилото на смесите се отчита влиянието на обема и характеристиките на влакната и матрицата.

- Сравнение на FRP системите: Ламели - Влакна.

- Дългосрочна надеждност на FRP материалите:

- Противопожарна защита - ограничаване на повишаването на температурата в залепващия слой; прилагане на защита от огнеупорни панели.

- Ултравioletово лъчение - UV-A и UV-B

лъчения, които нарушават химичните връзки; полагане на защитна светла боя на акрилна или полиуретанова основа.

- Умора - по-голяма устойчивост от стоманата.

- Бавна пластична деформация - пълзене - най-устойчиви са въглеродните влакна.

- Влияние - висока устойчивост на арамидните влакна при висока енергия на разрушение - удари, експлозии, взривни вълни и др.

- Температура - следва да се отчита влиянието на циклите на замръзване/размръзване с оглед образуване на лег в пукнатините и разслоение в контакта FRP - бетонна повърхност.

- Влага - въглеродните и стъклените нишки не абсорбират влага; арамидните влакна абсорбират до 13% влага.

- Контактна корозия - алуминият и стоманата при директен контакт с въглеродните влакна кородират (потенциална контактна корозия).

- Алкалност /киселинност - въглеродните влакна са киселинно и алкало устойчиви; стъклените и понякога арамидните влакна не са устойчиви и трябва да се предпазват и изолират.

- Преимущества и недостатъци на FRP материали - дадени са сравнения със стоманата.

- Възможни приложения на FRP материалите:

- външно залепени CFRP ламели;

- обвиване на CFRP, AFRP и GFRP тъкани, обмотани около конструктивните елементи - особено при сеизмични въздействия;

- външно предварително напрегнати FRP ламели, анкерирани в блокове в краищата на елементите.

Част №6 е: „Програма за изследване и изчисление на FRP композитни полимерни материали за усилване на строителни стоманобетонни конструкции“.

Програмата е предназначена за инженера конструктор за изчисляване на FRP композитни материали при усилване на строителните стоманобетонни конструкции с цел: повишаване носимоспособността на огъване; повишаване носимоспособността на срязване; обвиване на конструкцията или на отделни стоманобетонни елементи. Приложените уравнения в програмата са публикувани в Бюлетин №14, FIB, от юли 2001г.: „Проектиране и използване на външно закрепени FRP материали за усилване на стоманобетонни конструкции“.

В част 6.1 са дадени теоретичните постановки като са разгледани следните случаи:

- Увеличаване носимоспособността на огъване - разглежда се :
  - гранично състояние при загуба на носеща способност ULS - Евроког-2;
  - гранично състояние за експлоатация SLS - Евроког-2;
  - проверка на здравината на FRP материала.
- Усилване по отношение на якостта на срязване чрез:
  - затворени (правилно закомтвени) обвивки (кожуси);
  - прекъснати ленти, закомтвени в натисковата зона;
  - отворени обвивки (кожуси).
- Обвиване с FRP материали - за кръгли колони и правоъгълни стоманобетонни колони със закръгляне на ъглите; обвиването е особено благоприятно при поемане на сеизмични въздействия.

Част 6.2 „Използване на програмата за изчисление на FRP материалите“ включва:

- Обща част.
- Усилване на конструкцията по отношение на огъване - включено е:
  - Въвеждане на данните: тип на напречното сечениегеометрия на напречното сечение, данни за бетона, композитни материали, стоманена армировка.
  - Определяне на огъващите моменти, команди, информационен рег, общи бележки.
    - Резултати:
      - гранично състояние по носеща способност - ULS ;
      - гранично състояние на годност за експлоатация - SLS - особени товари;
      - гранично състояние на годност за експлоатация - SLS - полезно натоварване;
      - усилване по отношение на огъването - окончателни стойности;
      - команди - дават се характеристиките на напречното сечение с графики и цифри:
        - първоначална носеща способност по време на усилването;
        - гранично състояние по носеща способност - ULS;
        - пластичност при проверка по гранично състояние на годност за експлоатация - SLS;



- гранично състояние на годност за експлоатация - SLS - особени товари;
- гранично състояние на годност за експлоатация - SLS - полезно натоварване;
- характеристики на сечението;
- стоманена армировка;
- подреждане на FRP материалите;
- изчисление.
  - Усилване по отношение на срязване на елемента - включва:
    - въвеждане на данни:
      - метод на заковъване - затворена или отворена обшивка;
      - геометрия на напречното сечение;
      - бетон;
      - композитни материали;
      - тип на приложение на FRP материал;
      - повишаване на възможността за поемане на срязване;
      - рег за информация;
      - общи бележки;
    - резултати;
    - команди.
  - Усилване с FRP материал включва:
    - въвеждане на данни:
      - тип на напречното сечение;
      - геометрия на напречното сечение;
      - бетон;
      - композитни материали;
      - тип на приложение на FRP материала;
      - изисквания;
      - команди;
      - информационен рег;
      - общи бележки;
      - резултати;
      - команди.
    - Опции - включва:
      - общи положения;
      - отпечатване /усилване при огъване;
      - коефициенти на сигурност за FRP материала;
    - Отпечатване.

В част №7: „Примери за използване на програмата за изчисление на FRP материалите - композитни материали за усилване на строителни конструкции, базирани на полимерни нишки“ са дадени:

- Пример за усилване по отношение на огъване - със Sika CarboDur S812 на прота Т - образна стоманобетонна греда, с цел повишаване носимоспособността при по-висока стойност на подвижното натоварване.
- Пример за усилване на срязване - с CFRP тъкан на стоманобетонна правоъгълна колона за поемане на допълнителна срязваща сила.

- Пример за обвиняване на елемент - разгледани са два варианта: обвиняване със стъклена тъкан - GFRP и с въглеродна тъкан - CFRP на правоъгълно напречно стоманобетонно сечение (стоманобетонна колона), като целта е да се повиши якостта на бетона и граничната осова деформация, а от там и носещата способност на стоманобетонния елемент.

В част №8: „Подробни инструкции за прилагане на FRP материалите - композитни материали за усилване на строителни конструкции, базирани на полимерни нишки“ са дадени:

- Подробни инструкции и препоръки при усилване на стоманобетонни елементи подложени на:

- огъване - чрез CFRP ленти и гъвкави тъкани;
- срязване - чрез CFRP L - образни ленти и гъвкави тъкани;
- натиск - чрез обвиняване с гъвкави тъкани от няколко пласта.

В част №9: Sika системи и технологии - чрез схеми са дадени всички Sika системи и тяхното приложение при различните случаи на усилване на стоманобетонни конструкции:

- Sika CarboDur - фабрично изработени ленти на въглеродна основа (типове S, M и H), залепвани с епоксидна смола Sikadur-30 върху стоманобетонни елементи.

- Sika Wrap - гъвкави тъкани, които се залепят върху стоманобетонни елементи в няколко слоя по „мокра“ или „суха“ технология с епоксидни смоли съответно Sikadur-300 и Sikadur-330. Тъканите са произведени на базата на въглеродни, стъклени или арамидни нишки, като е дадена цялата номенклатура на фирмата Sika.

- Sika CarboShear L - L-образни ленти за усилване на срязване, които се залепят с епоксидна смола Sikadur-30.

- Sika предварително напрегащи системи:

- Sika Leoba CarboDur CFRP;
- Sika StressHead.

В част №10 са дадени конкретни случаи на приложение на Sika FRP материалите при усилване на сгради и съоръжения в България.

Представеният материал в Ръководството, заедно с цялата гама от продуктите на фирмата Sika за усилване на строителните стоманобетонни конструкции и съоръжения е много полезно за инженера конструктор при неговата практика в условията на Република България. Освен това материалите на Sika могат да намерят широко приложение и за други строителни конструкции и системи, което е въпрос на бъдеще. Приложението на FRP продуктова гама на Sika от страна на строителните инженери не е в противоречие с:

- Еврокод - 2 (също и с другите Еврокодове), където са дадени препоръки за тяхното приложение;

- действащата Нормативна база в Република България.

София, 27.12.2005 г.

Съставил:

/Доц. г-р инж. мат. Георги Дянков Георгиев/

## 2. УВОДНА ЧАСТ

### 2.1. Значимост на възстановяването, усилването и сеизмичното укрепване

Въпросът за подобряване качеството на съществуващата строителна инфраструктура и строителни конструкции е от особено голямо значение за новото строителство. Влошаването на настилката на мостове, греди, трегери и колони, сгради и паркинги съоръжения може да се отгаве на различни причини и да включва:

- Проблеми свързани с дълготрайността на конструкцията, които се дължат на некачествени или неподходящи строителни материали.
- Грешки в проектирането или строителството.
- Агресивна околна среда, чието въздействие не е взето под внимание по време на етапите на проектиране.
- Увеличени изисквания по отношение на натоварването, поради промени на методите или използването на конструкциите.
- Увеличени изисквания по отношение на дълготрайността, направени на базата на инфраструктурата при стареене.
- Изключително натоварване и натоварване от случайни товари.
- Варираща дълготрайност на различните конструктивни и неконструктивни елементи.

Поради нарастващото разпадане на инфраструктурата и сградите, което често се съчетава с необходимостта от подобряване на качеството, така че конструкциите да отговарят на строгите изисквания към тях (например, увеличения трафик по мостовете, превишаващ първоначалното проектно натоварване), въпросът за строителна реконструкция получи неотдавна значителен акцент навсякъде по света. В същото време сеизмично усъвършенстваните конструкции станаха също така от голямо значение в областите с висок сеизмичен риск.

### 2.2. Дефиниции

**Изисквана устойчивост ( $V_B$ ):** се определя като капацитет на конструкцията след извършване на усилващи интервенции.

**Налична устойчивост ( $V_C$ ):** се определя като капацитета на конструкцията преди влошаване на качеството, дължащо се на един или всички параметри, посочени в § 1.1.

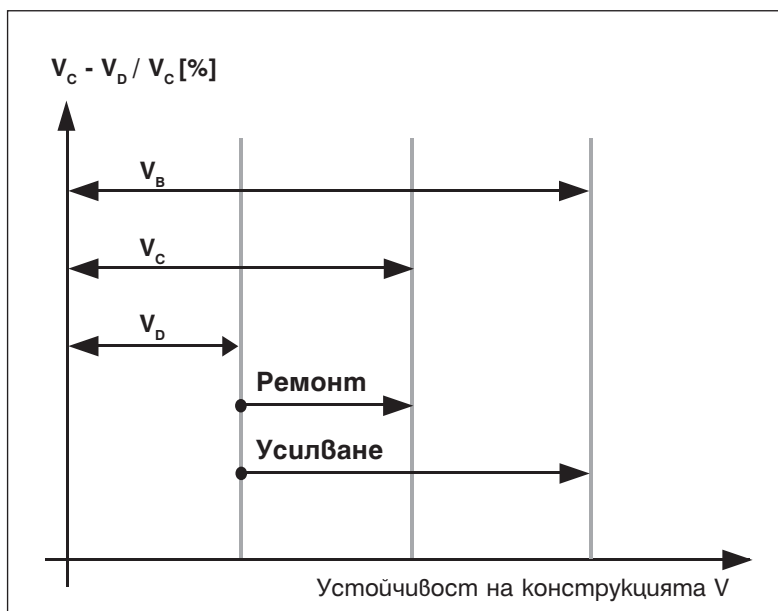
**Остатъчна устойчивост ( $V_D$ ):** се определя като капацитет на конструкцията след влошаване на качеството, дължащо се на един или всички параметри, посочени в § 1.1.

**Загуба на устойчивост:** се определя от разликата ( $V_C - V_D$ ).

**Ремонт:** се определя като възстановяване на първоначалните характеристики (якост, коравина, дуктилност) на конструкцията. При извършване на ремонт  $V_D$  се повишава минимум до стойността на  $V_C$ .

**Усилване:** Означава повишаване на характеристиките на конструкцията над първоначално предвидените нива или тези, постигнати при ремонт. Устойчивостта става равна на  $V_B$  или на предварително определен процент от нея.

**Възстановяване по отношение на сеизмичност:** Прилага се при конструкции, повредени от земетръсни процеси. Този ефект се постига чрез извършване на ремонтни работи или чрез усилване на конструкцията.



Фиг. 1.1 Схематично представяне на  $V_B$ ,  $V_C$ ,  $V_D$ .

Горепосочената фигура е схематично представяне съответно на изискваната ( $V_B$ ), наличната ( $V_C$ ) и остатъчната ( $V_D$ ) устойчивост.

### 2.3. Предмет на ръководството

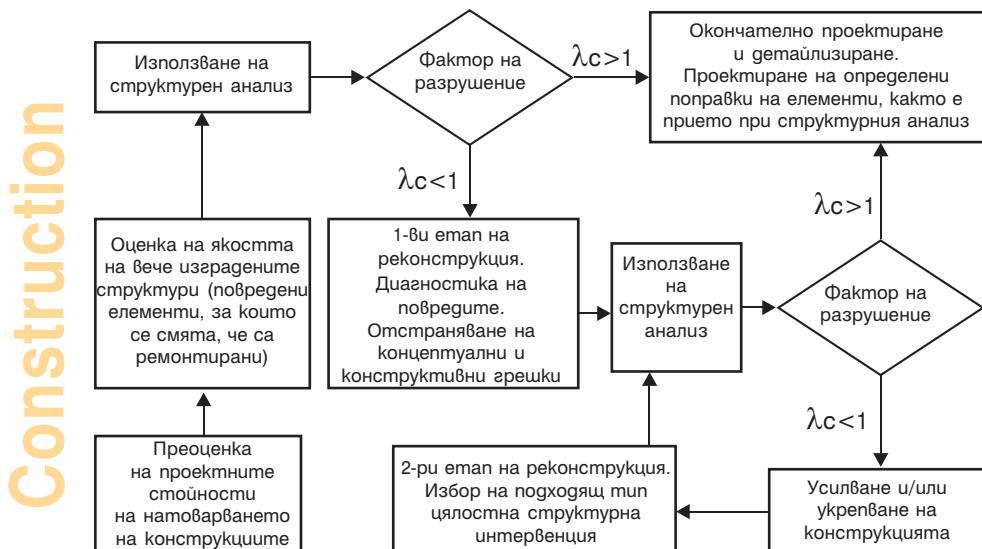
Целта на това ръководство е да бъде полезно средство за Инженера като преглед на методите за ремонт и усилване, при използване на FRP материали (полимерни композити, усилен с нишки) на Сика. Разгледани са редица системи за усилване, например Sika CarboDur, SikaWrap и Sikadur епоксидни смоли.

Ръководството включва опита и знанията, натрупани през последните години чрез много проекти. Освен това ръководството включва подробна информация за приложение, методически указания за проектиране и примери.

### 3. ПРОЕКТИРАНЕ ПРИ ВЪЗСТАНОВЯВАНЕТО И УСИЛВАНЕТО НА КОНСТРУКЦИИТЕ

Повредата на конструкцията много често не се разпознава като такава и се предприемат единствено козметични поправки, които да прикрият видимите дефекти. Следователно, стратегията за ремонтване трябва да включва действително подобрене на структурните условия, за да се постигне приемливо ниво на безопасност. Най-общите етапи от проектирането на ремонта и усилването на конструкцията ще бъдат описани накратко.

По-долу е дадена стандартна схема на етапите при проектирането на възстановителните и усилващи операции.



#### 3.1. Точна оценка на капацитета на вече изградените конструкции

Необходимо условие за всяка структурна интервенция е извършването на прецизна предварителна оценка не само на степента на повреда, но също така и на първоначалната носимоспособност на конструкцията при нейното построяване. Техническите решения естествено имат своите ограничения и следователно характеристиките на конструкцията след построяване трябва да бъдат оценени и използвани по време на етапа на анализ при цялостния ремонтен процес.

#### 3.2. Преоценка на натоварването

Стойностите на натоварването на конструкциите по време на експлоатацията им са често неизвестни по време на етапите на проектиране и затова се правят допускания за вида на довършителните работи и полезния товар при различен тип обстоятелства. По-добро познаване на вида и

размера на натоварването, на което конструкцията е подложена, води до по-прецизно определяне на силите, оказващи влияние върху критичните елементи.

### **3.3. Отстраняване на концептуални и конструктивни грешки**

Първият етап на възстановяването на способността на конструкцията да поема очакваното проектно натоварване включва коригиране на евентуални концептуални и конструктивни грешки. Този процес може да включва коригиране на резки изменения в коравината, несъответствия в съотношението между коравината и масата, както и обръщане внимание на недобре изпълнени детайли, употреба на некачествени материали и др. Отстраняването на подобни грешки не е необходимо да бъде последвано от по-нататъшни интервенции, но то се извършва с цел предварителен анализ, който да може да определи критичните елементи и степента на неизправност на конструкцията.

### **3.4. Правилен избор на конструктивна интервенция**

Изискванията спрямо елементите, касаещи якостта и деформацията, определени чрез надежден структурен анализ се явяват определящи за вида и степента на необходимото усиление на конструкцията. Възможно е да има нужда от подобрения по отношение на якостта и дуктилността, допълване с нови елементи или усиление на съществуващите.

### **3.5. Избрани техники на ремонтване**

При планиране на ремонтните дейности трябва да се вземат предвид изводите, направени по време на структурния анализ. Повишаването на якостта на даден елемент обикновено води до подобрение и на неговата коравина, а оттам и до възможността този елемент да поема по-голямо натоварване. По подобен начин увеличаване на дуктилността на определени места намалява ротационната коравина и това може да повлияе на изискването за дуктилност на други места.

Определени видове ремонт имат за цел единствено усиление до желаната степен без намеса в другите характеристики.

### **3.6. Усиление на конструкцията**

Усиленето на конструкцията е абсолютно необходимо, ако възможността за поемане на пластични деформации или границите на експлоатационна надеждност на конструкцията след първоначалното отстраняване на грешки бъдат надвишени. Използват се няколко вида техники, като например уплътняване и запълване на пукнатини, усиление със стоманобетонни кожуси, увеличаване на размерите на критични елементи чрез уължаване и разширяване или чрез подходящо покритие, както и добавяне на нови конструктивни елементи.

При традиционните интервенции деформациите като цяло биват контролирани, но сериозен недостатък на този вид укрепване е невъзможността за увеличаване на натоварването.

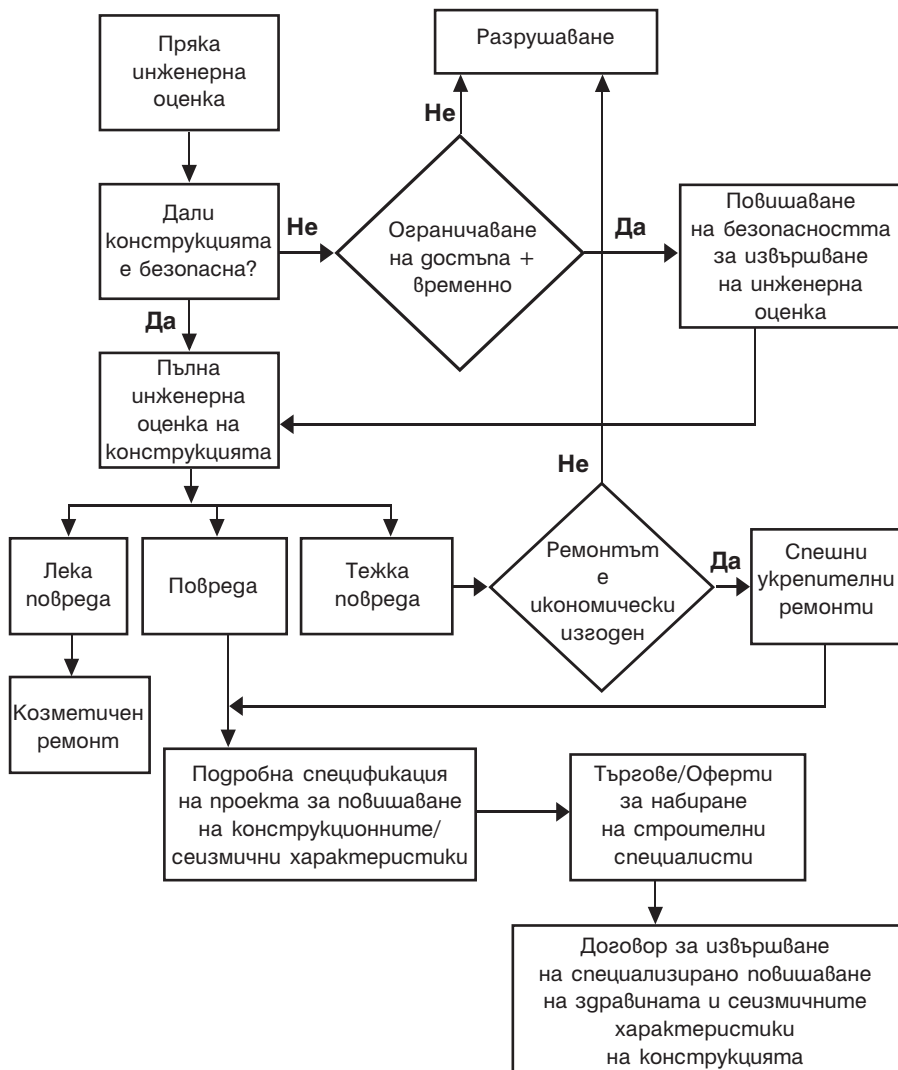
Това е от особено значение на нивото на основите, където може да се изисква значително усиление. В допълнение, усиленето на конструкцията може да доведе до нежелани ефекти върху архитектурния облик на конструкцията. Големите разходи и намесата във функционалността на конструкцията

могат също да бъдат причина собствениците да не дадат разрешението си за основни ремонти и вместо това да предпочетат по-евтини и чисто козметични мерки.

Следователно, трябва да се приеме добре разработена стратегия за усиление, като нейното планиране е пряко свързано с желания резултат.

### 3.7. Инженерна оценка: схема на процеса

Construction



## 4. ТЕХНИКИ ЗА ВЪЗСТАНОВЯВАНЕ И УСИЛВАНЕ НА КОНСТРУКЦИЯТА

### 4.1. Техники за възстановяване

Техниките за извършване на възстановителни работи могат да се използват, за да се отстранят грешки при проектирането и изпълнението или за възстановяване на определени елементи. Целта е следната:

- 1) Да се възстанови конструкцията до нейното първоначално състояние на експлоатационна надеждност и/или
- 2) Да се предпази конструкцията от по-нататъшно разрушение.

Техниките за възстановяване включват:

#### 4.1.1. Инжектиране на смола

Инжектирането на смола е най-широко разпространеният метод за запълване на леки до средно големи пукнатини в бетонните конструкции. Образуването на пукнатини при огъване обикновено не е структурен проблем, освен ако елементът не е бил натоварен над допустимите стойности на надеждност и е понесъл повреда. Запълването на пукнатини, образувани при огъване, може да възстанови коравината, но не увеличава носимоспособността при огъване над първоначално зададените граници. Следователно, по-често запълването на значителни пукнатини е мярка, необходима само за защита на арматурата от атмосферните условия.

Запълването на пукнатини от срязване или пукнатини, свързани с разрушаване на връзките, също само ще възстанови устойчивостта на конструкцията на деформации, но няма да помогне за разрешаването на основните проблеми, които водят до тяхното образуване. Такива пукнатини, следователно, трябва да се третират не само с тази техника, но също и с подходящи техники на усилване.

#### 4.1.2. Възстановяване чрез запълване

Запълването може да се използва, за да се възстановят локализираните места на повреден или разрушен бетон поради случайно пренатоварване. Правилно извършените възстановителни работи може да доведат до изграждане на добра спойка между стария и новия бетон или строителен разтвор, без да има нужда от поставяне на армировка. Като цяло, очаква се новият материал да има по-висока якост отколкото първоначалния бетон.

#### 4.1.3. Торкрет бетон

Този метод обикновено е необходим там, където голямо количество бетон трябва да бъде погменено и където е трудно използването на кофраж (т.е. при връзка греда-колона). Този метод може да се използва за подмяна или подобрене на бетонното покритие над армировката или за подмяна на разрушен бетон в елементи от конструкцията. Често този метод се прилага и при зидарии.

Въпреки това, прилагането на този метод има и известни недостатъци като например значителна загуба и преразход на материали, поради рикоширането на сместа при полагането ѝ и необходимостта от използването на телени мрежи, за да се избегне образуването на пукнатини от съсъхването



на високоякостната цименто-бетонена смес. Необходимото оборудване, изискването високо ниво на експертиза и необходимостта от източник на електрическа енергия може също да възпрепятстват използването на този метод за възстановителни работи.

#### 4.2. Техники на усилване

Техниките на усилване трябва винаги да бъдат свързани с цялостна стратегия за реконструкция. Целта е да се увеличи носимоспособността или устойчивостта на дадена конструкция в сравнение с предишното ѝ състояние.

Степената на усилване, която трябва да се постигне зависи от желаното ниво на безопасност. В допълнение, не трябва да се забравя, че в много случаи усилването може да има обратен ефект върху дуктилността на конструкцията. Това може да доведе до сериозни проблеми, особено в сеизмични райони, където се изисква конструкцията да е в състояние да поема сеизмични натоварвания.

Усилването на елементи от конструкцията може да включва просто употребата на по-високоякостни материали, които да заместят дефектни или нискокачествени материали или може да бъде по-сложно, включвайки добавяне на нови носещи елементи към конструкцията. Както при възстановителните работи, трябва да се обърне внимание на проблема, свързан с взаимодействието между стари и нови материали и елементи.

Техниките на усилване включват:

##### 4.2.1. Усилване на армировката

Неподходяща или корозирала армировка може да бъде заменена от допълнителна армировка, последващо налягане или външно свързани усилващи ламели. Степената на усилване, която следва да се постигне, зависи до голяма степен от характеристиките на съществуващия елемент. Слабо армирани елементи могат да бъдат значително усилены, обикновено за сметка на дуктилността, докато силно армираните елементи не могат да бъдат значително подобрени без добавяне на бетонни покривни пластове.

##### 4.2.2. Усилване със стоманобетонни кожуси

Този метод изисква временно премахване на натоварването от елемента, който подлежи на усилване и отстраняване на бетонното покритие. Може да се добави достатъчно количество нова армировка към вече съществуващата чрез подходящо проектирани припокрити наставяния, заварки или муфи. Трябва да се внимава при заваряване, тъй като високите температури на заварките могат да повредят бетона или употребените свързващи вещества.

Добавянето на нови пръти води до усилване на целия укрепван елемент или на част от него. Този метод е много ефективен за увеличаване на носимоспособността, коравината и дуктилността на даден елемент и се препоръчва за силно повредени бетонни елементи.

##### 4.2.3. Външно прикрепени ламели или тъкани

Стоманени ламели и ламели от т. нар. CFRP (полимерни композити, усилены с

въглеродни нишки) се свързват с бетонните повърхности чрез епоксидни смоли. Тази техника е много ефективна за намаляване на провисванията и големината на пукнатините.

Използването на тази техника може да доведе до някои ограничения в подобряването на работните характеристики поради недостатъчната якост на контактната повърхност и процесите на отлепване, които възникват в бетона. Пълзенето на свързващото вещество също може да създаде проблеми и затова дебелината на слоя свързващо вещество трябва да бъде сведена до минимум. Основното предимство на тази техника е, че се налага само минимално увеличение на размерите на усилвания елемент.

#### **4.2.4. Предварително напрегнати външно прикрепени ламели**

Предварителното налягане на високоякостни материали е ефективен начин те да бъдат използвани за усилване на конструкциите.

Може да се използва лепена и нелепена стоманена армировка или въглеродни FRP материали (полимерни композити, усилен с нишки). Усилването чрез предварително налягане може да се извърши, като се приложат конвенционалните процедури за предварително налягане.

Трябва да се вземат предохранителни мерки, за да се ограничи плъзгането на напрегнатата армировка в анкера и да се осигури защита срещу пожар и корозия. Анкерването може да се извърши в крайщата на елемента, на допълнителни подпори, върху съществуващи диафрагми или други подходящи места.

#### **4.2.5. Усилване със стоманени кожухи**

Това е бърза и ефективна техника, която се основава на закрепване на тънки стоманени листове около даден елемент от конструкцията. Стоманени ъгли се поставят във всеки от крайщата на елемента и се затягат към бетона. След това листовите се заваряват към тези ъгли и се излива монолитен бетонен кожух или кожух от торкрет бетон. Чрез тази техника може да се постигне подобрене на носимоспособността, коравината и устойчивостта на срязване.

#### **4.2.6. Усилване чрез допълнителна външна армировка - /полимерни композити усилен с нишки /- ПУН/FRP/ обшивки**

При тази техника се използват високоякостни нишки (от стъкло, въглерод или арамид) във формата на еластични тъкани напоени с епоксидна смола, която им позволява да се обвият и да се прикрепят към всякакъв вид елементи. Тази схема е подходяща при възстановяване и усилване на елементи в сеизмични райони. Доказано е, че чрез тази техника се повишава дуктилността и се увеличава устойчивостта на срязване до такава степен, че малки срязвания се превръщат в пластични деформации. Като цяло постигнатата повишената коравина се явява по-малка от тази на стоманените или бетонови кожухи.

Техниките за възстановяване на конструкцията, упоменати по-горе, имат различни ефекти върху дуктилността, коравината и якостта на конструкцията. Съответните ефекти върху конструкцията за всяка интервенция са дадени в следната таблица:

Интервенция върху конструкцията	Дуктилност	Коравина	Якост
Стоманобетонни кожуси	Да	Да	Да
Стоманени кожуси	Да	Да	Да
ПУН/FRP/ обшивки	Да	?	?
Усилване чрез инжектиране на смоли	Не	Да	Не
Външно прикрепени ламели	Не	Да	Да
Предварително напрегнати външно прикрепени ламели	Не	Да	Да
Торкрет бетон	Да	Да	Да

Таблица 2. Ефект от конструктивните интервенции върху характеристиките на конструкцията.

## 5. ВЪВЕДЕНИЕ В ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ПОЛИМЕРНИ КОМПОЗИТИ, УСИЛЕНИ С НИШКИ (FRP) ЗА УСИЛВАНЕ НА СТРОИТЕЛНИ КОНСТРУКЦИИ

### 5.1. Стандартни технологични методи на усилване

Както вече беше посочено в & 3.2.3, директното усилване на стоманобетонните елементи на конструкцията (греди, плочи, колони и др.) на мястото на строителната площадка, при използване на външно прикрепени стоманени листове и епоксидни смоли, се приема за ефективен и стандартен метод за повишаване на носимоспособността.

Този метод се използва широко за усилване както на мостове и сгради, така също и за бетонни повърхности, подложени на опън и натиск.

Обаче усилването с помощта на този технологичен метод има следните недостатъци:

- Трудности при манипулиране с тежките стоманени листове на строителния обект
- Влошаване на връзката между стоманените листове и бетона, причинено от корозията на стоманата
- Необходимост от скеле и временно укрепване или разчетно натоварване
- Необходимост от оформяне на правилни шевове поради ограничената строителна дължина на стоманените листове

Друг стандартен метод за усилване на носещите конструкции от стоманобетон включва конструкция от стоманобетонни кожуси (монолитно изпълнени или торкретирани) около съществуващите елементи. Този метод е доста ефективен що се отнася до якостта, коравината и дуктилността, но:

- Той е трудоемък
- Често се получава нарушаване на използваемостта на съоръжението
- В много случаи елементите от стоманобетон стават нежелано тежки и са със завишена коравина [3]

### 5.2. Полимерни композити усилени с нишки, (FRP)

Посочените по-горе конструктивни трудности и проблеми с корозията довежда до заместване на стоманените листове или другите стандартни методи с алтернативното решение да се използват полимерни композитни материали, усилени с нишки (FRP). Те предлагат изпитано решение, тъй като много видове от този материал се използват успешно от много време в другите индустрии (напр. при летателните апарати), а отскоро и в гражданското строителство.

Полимерните композити, усилени с нишки (FRP), се състоят от многобройни, непрекъснати неметални нишки, разположени в определено направление (изработени обикновено от въглерод, стъкло и арамид), които са с усъвършенствани характеристики и са съединени помежду си с матрица от смола. Нишките са компонентите, носещи главните напрежения, докато смолата разпределя напреженията между нишките, като в същото време ги предпазва.

За да се улесни приложението им в строителството, полимерните композити, усилен с нишки (FRP) се произвеждат в различни модификации (Фиг.4.1), като например:

- Тънки еднородни предварително изработени ленти с дебелина от порядъка на 1 мм (Фиг. 4.1а)
- Гъвкави тъкани и нетъкани тъкани, изработени с нишки, разположени в едно или две направления (Фиг. 4.1б)



Фиг. 4.1а

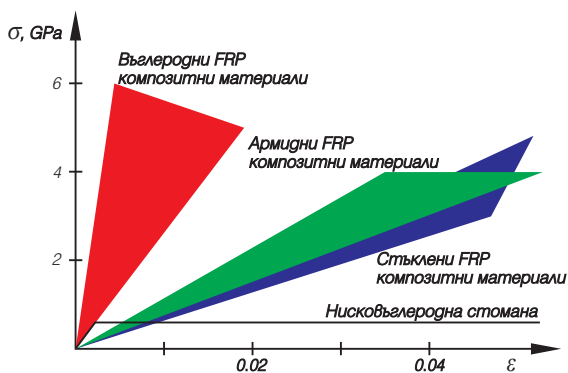


Фиг. 4.1б

Фиг. 4.1 - Изработени разновидности на полимерни композити, усилен с нишки - FRP материали

В зависимост от вида на използваните нишки FRP композитите са следните:

- CFRP (на базата на въглеродни нишки)
- AFRP (на базата на арамидни нишки)
- GFRP (на базата на стъклени нишки)



Фиг. 4.2 Едноосни диаграми на зависимостта на деформациите от напрежението за различните полимерни композити, усилен с еднородно разположени нишки - FRP материали

На Фиг. 4.2 характерните диаграми на зависимостта на деформациите от напрежението за FRP композити с еднородно разположени нишки, подложени на кратковременно еднородно натоварване, е сравнена със съответната диаграма на зависимостта на деформациите от напрежението за стоманата.

### 5.3. Полимерни композити усилени с нишки FRP - състав на материалите

В следващите раздели ще бъдат разгледани накратко трите основни съставни части на системата FRP за усилване, а именно нишки, лепила и матрици от смола.

#### 5.3.1. Нишки

Трите основни типа нишки, които се използват при усилване на конструкциите:

- Въглеродни
- Арамидни
- Стъклени

Трябва да се има предвид, че физичните и механичните свойства могат да варират значително за даден тип нишки, както и между различните типове нишки. В таблица 4.1 са дадени характерните свойства на трите основни типа нишки.

Материал	Еластичен Модул (GPa)	Якост на опън (MPa)	Гранична относителна деформация при опън (%)
Въглерод	165 - 700	2100 - 4800	0.2 - 2.0
Арамид	70 - 130	3500 - 4100	2.5 - 5.0
Стъкло	70 - 90	1900 - 4800	3.0 - 5.5

Табл. 4.1 Типични свойства на нишките

В общи линии, суровината на *въглеродните нишки* е смола или PAN (1-(2-пиридилазо)-2-нафтанол). Нишките на смолата са произведени чрез използването на пречистена нефтена или каменновъзлена смола, която се прокарва през тясна дюза и се втвърдява чрез нагряване. PAN нишките са изработени от полиакрилонитрил, който се овъглява чрез изгаряне. Въглеродните нишки представляват универсални, високоякостни и еластични материали. Те притежават устойчивост на основи, окиси и ултравиолетови лъчи, високо съпротивление на умора и нисък коефициент на топлинно разширение.

*Арамидната нишка* е анизотропна и притежава висока якост и среден коефициент на еластичност в надлъжно отношение. Арамидните нишки са еластични при опън, но имат нелинейно и пластично поведение при натиск; те имат също така подобрена жилавост, устойчивост на умора и повреда.

*Стъклените нишки* за непрекъснато армиране са класифицирани в три типа: Е-стъклени нишки, S-стъклени нишки и основоустойчиви AR-стъклени нишки. Е-стъклените нишки, които съдържат големи количества борна киселина и алуминат, са ниско устойчиви на основи. S-стъклените нишки са по-здрави и по-корави от Е-стъклените нишки, но също не са устойчиви на основи. За да се предпази стъкленото влакно от ерозиране, причинено от съдържащата основа цимент, се добавя известно количество циркон, за да се получат основоустойчиви AR-стъклени нишки; такива нишки имат механични свойства подобни на Е-стъклените нишки. Едно от най-важните предимства на стъклените нишки е тяхната икономичност.

Устойчивостта към факторите на корозия за гореспоменатите типове нишки са посочени в Таблица 4.2.

Фактори на корозия	Е-стъклени	AR-стъклени	Арамидни	Въглеродни
Водопоглъщане (% , 24 ч)	-	-	0,05	-
Слаби окиси	LR	HR	HR	HR
Силни окиси	NR	LR	LR	HR
Слаби основи	NR	HR	HR	HR
Силни основи	NR	LR	LR	HR
Температура	HR	HR	NR	HR
Ултравиолетово облъчване	HR	HR	NR	HR
NR = Неустойчиви LR = Ниско устойчиви HR = Високо устойчиви				

Таблица 4.2. Устойчивост на полимерните композити усилен с нишки към корозия (Пантазополу, 1999)

### 5.3.2. Лепило

Целта на лепилото е да осигури между бетона и композитния материал повърхност, поемаща сръзващите сили, така че да се осъществи напълно съвместността им действие. Най-разпространения тип конструктивни лепила са на епоксидна основа и се получават в резултат на смесване на епоксидна смола (полимер) с втвърдител. В зависимост от изискванията при полагане, лепилото може да съдържа запълващи материали, омекотители, добавки за придобаване на якост, както и групи съставки.

При употребата на епоксидни лепила, трябва да се вземат под внимание три съображения: срок на годност при смесване, отворено време за работа и температура за промяна на стъклообразното състояние [1].

Срок на годност при смесване е времето, през което лицето, което нанася лепилото може да работи с него след смесване на смолата и втвърдителя и преди тя да започне да се втвърдява в смесителния съд или контейнер.

Отворено време за работа е времето, което има на разположение лицето, използващо лепилото след като то е било нанесено върху повърхностите за свързване и преди те да бъдат съединени.

Температура за промяна на стъклообразното състояние ( $T_g$ ), е температурата, над която епоксидното лепило променя състоянието си от твърдо и стъкловидно в каучукообразно. Това може да доведе до намаляване на съединяващата способност.

### 5.3.3. Матрица

Матрицата на композитен материал за строителни конструкции може да бъде от тип термореактивна пластмаса или от тип термопластична пластмаса, като първата е по-широко използваната. Функцията на матрицата е:

- да предпазва нишките от износване или корозия, причинена от околната среда
- да свързва нишките помежду им
- да разпределя натоварването

Матрицата оказва силно въздействие върху отделни механични характеристики на материала като якостта и модулите в напречно отношение, якостта на срязване и на натиск.

Епоксидните, полиестерните и винилестерните смоли са най-използваните полимерни материали за изработване на матрицата, като се влагат висококачествени армирани влакна. Епоксидните смоли подобряват механичните свойства и са изключително издръжливи, докато полиестерите и винилестерите са по-евтини.

#### 5.4. Коефициент на сигурност на полимерните композити, усилен с нишки (FRP материали)

Стойностите на коефициента на сигурност на полимерните композити, усилен с нишки (FRP материали) -  $Y_f$  са в съответствие с fib бюлетин № 14 и са изложени в Таблица 4.3.

Вид композити	Вид на полагането А <sup>(1)</sup>	Вид на полагането В <sup>(2)</sup>
CFRP	1.20	1.35
AFRP	1.25	1.45
GFRP	1.30	1.50

Таблица 4.3 Стойности на коефициента на сигурност на полимерните композити усилен с нишки (FRP материали)  $Y_f$

Където:

(1) Полагането на фабрично изработените FRP системи (ламели) става при нормални условия на контрол на качеството. Полагането се извършва по „мокрия“ метод, като се взимат всички необходими мерки за да се постигне стриктен контрол както на условията, така и на процеса на полагане.

(2) Полагането на FRP системите от тъкани става при нормални условия на контрол на качеството. Полагането на всеки вид усилюваща система може да се извършва и на място при трудни условия на работа.

#### 5.5. Механични свойства на полимерните композити, усилен с нишки, FRP

Основните механични свойства на FRP материалите могат да се оценят, ако са известни свойствата на съставните материали (нишки и матрица) и техният относителен обем. Това може да се извърши чрез прилагане на уравнението за „правилото на смесите“, както следва:  $E_f = E_{fib} V_{fib} + E_m V_m$  (4.1)

$$f_f H'' f_{fib} V_{fib} + f_m V_m \quad (4.2)$$

Където:  $E_f$  = Модул на Янг за композитни материали FRP по направление на нишките

$E_{fib}$  = Модул на Янг за нишките

$E_m$  = Модул на Янг за матрицата

$V_{fib}$  = Относителен обем на нишките

$V_m$  = Относителен обем на матрицата (Забележка  $V_{fib} + V_m = 1$ )

$f_f$  = Якост на опън на FRP по направление на нишките.

$f_{fib}$  = Якост на опън на нишките.

$f_m$  = Якост на опън на матрицата



**Фабрично произведени ленти!** При изчисленията могат да се използват свойствата на материала въз основа на цялото напречно сечение.

**Нишки, импрегнирани на място!** Окончателната дебелина на композитните материали FRP, а като резултат и относителният обем на нишките може да варира в следствие на различното количество напояване със смола. По тази причина не е подходящо да се правят изчисления, базирани на свойствата на армираните нишки за цялата система (нишки и матрица), както и да се определя действителната дебелина. Затова свойствата на материала ( $E_f$  и  $f_f$ ) зависят главно от на свойствата на нишките и чистото им напречно сечение. Това се дължи на факта, че коравината и якостта на нишките ( $E_{fib}$  и  $f_{fib}$ ) са много по-големи от тези на матрицата ( $E_m$  и  $f_m$ ).

Трябва да се отбележи, че тъй като свойствата на FRP са базирани на цялото напречно сечение (нишки и матрица), коравината и якостта са по-ниски от тези на чистите нишки. Може би е очевидно, че якостта и коравината на цялата система не се променят, защото намалението се компенсира от увеличението на напречното сечение в сравнение с напречното сечение само на нишките. Затова има силно изразена зависимост между относителния обем на нишките и свойствата на целия FRP материал, които се използват при изчислението.

Това е показано в таблица 4.4. При избрани определени свойства на нишките и матрицата, ефектът на относителния обем на нишките върху свойствата на FRP е очевиден.

Избрани свойства на съставните материали на FRP полимерните композити								
$E_{fib} = 220 \text{ GPa}, f_{fib} = 4000 \text{ MPa}$								
$E_m = 3 \text{ GPa}, f_m = 80 \text{ MPa}$								
Напречно сечение				Свойства на FRP			Разрушаващо натоварване	
$A_{fib}$ ( $mm^2$ )	$A_m$ ( $mm^2$ )	$A_f$ ( $mm^2$ )	$V_{fib}$ (%)	$E_f$ [Ф-ла 4.1] (GPa)	$F_f$ [Ф-ла 4.2] (MPa)	Гранична деформация (%)	(kN)	(%)
70	0	70	100	220.0	4000	1.818	280.0	100
70	30	100	70	154.9	2824	1.823	282.4	100.9
70	70	140	50	111.5	2040	1.830	285.6	102.0

**Таблица 4.4** Пример, показващ ефекта на относителния обем на нишките върху свойствата на FRP (бюлетин 14, fib).

За постоянно количество нишки (напречно сечение =  $70 \text{ mm}^2$ ) разрушаващото натоварване и деформацията при разрушаване се влияят минимално от увеличението на количеството на смолата. Обаче характеристиките на FRP, които се използват в изчисленията, базирани на цялото напречно сечение, са силно повлияни. За сравняването на FRP полимерните композити може да се окаже недостатъчно само да се сравнява якостта и/или съотношението между напрежение и деформация. Важно е също да се знае съставът на композитния материал, за който се отнася дадена характеристика.

Най-общо, при импрегнираните на място нишки е удобно да базираме изчисленията на:

а) Характеристиките на FRP системата. Това е възможно само когато характеристиките на импрегнираната на място система са определени при изпитване.

б) Характеристиките на нишките и напречното сечение на нишките. В този случай вторият член на уравненията 4.1 и 4.2 може да бъде пренебрегнат и  $V_{fib} = 1$ . Получената в резултат характеристика (например модул на еластичност, якост на опън) трябва да бъде умножена с редукиционния коефициент ( $r$ ), за да се изчисли ефективността на системата нишки - смола, както и конфигурацията на листовите или нишките.

### 5.6. Сравнение на FRP системите: Ламели - Нишки

Сравняването на различните FRP системи е трудна задача, която трябва да бъде решена от инженера. Да предположим, че се разглеждат две FRP системи за усилване на стоманобетонен елемент и са известни механичните свойства на материала, определени от съответните производители.

**Система А:** състои се от суха тъкан с въглеродни нишки, разположени в една посока, покрити с епоксидна смола чрез използване на „мокрят“ метод на полагање (например SikaWrap-103 C със Sikadur-300).

**Система Б:** състои се от предварително втвърдени епоксидни многослойни материали (ламели) от въглеродни нишки (например SikaCarboDur S 1012), които са свързани с бетонната повърхност чрез епоксидна смола (например Sikadur-30).

Система А: SikaWrap-103 C	Система Б: Sika CarboDur S1012
<b>Тип нишка:</b> Високоякоsten въглерод <b>Полимерна смола:</b> Sikadur-300 <b>Механични свойства (зона на разположение на нишките)</b> Дебелина $t_f = 0.34 \text{ mm}$ Якост на опън $f_f = 3300 \text{ N/mm}^2$ Гранична относителна деформация при опън $\varepsilon_{fu} = 1.5 \%$ Модул на еластичност $E_f = 231 \text{ kN/mm}^2$ Коефициент на сигурност на материала $Y_{fA} = 1.35$	<b>Тип нишка:</b> Високоякоsten въглерод <b>Полимерна смола:</b> Sikadur-300 <b>Механични свойства</b> Дебелина $t_f = 1.2 \text{ mm}$ Якост на опън $f_f = 2800 \text{ N/mm}^2$ Гранична относителна деформация при опън $\varepsilon_{fu} = 1.7 \%$ Модул на еластичност $E_f = 165 \text{ kN/mm}^2$ Коефициент на сигурност на материала $Y_{fB} = 1.2$

Таблица 4.5 Свойства на материала на двете системи

След разглеждане на списъка с техническите данни на материала (Таблица 4.5), инженерът сравнява модулите на еластичност (респективно коравините) и якостите на опън на двете системи. Тъй като списъците с техническите данни на материалите на двете системи не са съставени на една и съща база (лазелите са разглеждани на базата на измерването на цялата система от ламели, докато тъканта е разглеждана само на базата на теоретичните стойности за нишките), не е възможно директно сравнение на якостта (якостта на опън на системата на тъканта = близо 50-80 % от тази на нишките). Модулът може да бъде сравнен приблизително като 1:1.

Трябва да се вземе под внимание също и факта, че контролът на качеството на място на строителната площадка (за системите от тъкани) е много по-слаб от контрола на качеството за фабрично изработените ламели.

Въпреки това, сравнение на якостите на опън и модулите на двете системи може да бъде направено като извършим привеждане чрез коефициента на сигурност на материала (предложено във fib бюлетин № 14), като се има предвид, че разликата в якостта на опън е по-голяма от така изчислената. Изчисленията са показани по-долу:

Процедура	Изчисление
<b>Стъпка 1А - Изчислява се якостта на опън за единица ширина на система А</b> $p_{fu} = f_{fu} t_f / Y_{f,A}$	$p_{fu} = (3300 * 0.34) / 1.35 = 831 \text{ kN/mm}$
<b>Стъпка 1В - Изчислява се якостта на опън за единица ширина на система В</b> $p_{fu} = f_{fu} t_f / Y_{f,A}$	$p_{fu} = (2800 * 1.2) / 1.2 = 2800 \text{ kN/mm}$
<b>Стъпка 2А - Изчислява се модула на еластичност при опън за единица ширина на система А</b> $k_f = E_f t_f / Y_{f,A}$	$k_f = (231 \times 10^3 \times 0.34) / 1.35 = 58178 \text{ N/mm}$
<b>Стъпка 2В - Изчислява се модула на еластичност при опън за единица ширина на система В</b> $k_f = E_f t_f / Y_{f,B}$	$k_f = (165 \times 10^3 \times 1.2) / 1.2 = 165000 \text{ N/mm}$
<b>Стъпка 3 - Сравняват се двете системи</b> Сравнява се якостта на опън	$\frac{p_{fu}(\text{система В})}{p_{fu}(\text{система А})} = \frac{2800}{831} \approx 3.0$ Три слоя от система А се изискват за всеки слой от система В за една и съща <b>якост на опън</b>
Сравнява се коравината	$\frac{k_f(\text{система В})}{k_f(\text{система А})} = \frac{165000}{58178} = 2.8$ Три слоя от система А се изискват за всеки слой от система В за една и съща <b>коравина</b>

От следващата част може да се види (§ 5), че проектните решения ограничават деформацията във FRP материала. Затова пълната гранична деформация при опън не е подходящо да се използва и не трябва да бъде база за сравнение между двете системи на материала. Когато се сравняват различни системи от FRP композитни материали за дадено конкретно приложение, **FRP системите трябва да бъдат сравнявани само на базата на еднаква коравина**. В допълнение следва да се каже, че всяка FRP система, която се разглежда, трябва да има възможността да поема деформация, близка до проектната деформация, за която е извършено оразмеряването, без разрушаване  $\varepsilon_{fu} > \varepsilon_{fc}$ .

В много случаи има възможност да се променя ширината на FRP лентата, за сметка на броя на слоевете (за системи с по-малка дебелина се използват по-големи ширини и обратно). В такива случаи, получената при изчисленията една и съща стойност за коравината не винаги означава един и същи принос към якостта на елемента. Като цяло, **по-тънките (с по-малка  $t_f$ ) и по-широките (с по-голяма  $w_f$ ) FRP системи осигуряват по-висока якост на елемента поради по-малките напрежения в областта на свързването**. Точно съответствие обаче може да бъде постигнато само чрез извършване на пълни изчисления (например според ACI комитетата 440) за всяка система.

### 5.7. Дълготрайност на FRP материалите

Правилно инсталирани, FRP системите предлагат същия или подобрен експлоатационен цикъл в сравнение с другите усилващи системи. Дълготрайността както на бетона, така и на FRP е добре изследвана, но дългосрочната надеждност на такива системи поражда някои проблеми.

Критично място за ефективността на повечето FRP системи се явява връзката и взаимодействието между FRP композитния материал и съответната повърхност на конструкцията, към която се апликира. Качеството на връзката се влияе от редица фактори като:

- Състояние на съществуващата основа, върху която се извършва апликацията
- Подготовка на основата за апликация
- Качество на FRP композитния материал
- Качество на апликацията на FRP
- Дълготрайност на смолата

#### 5.7.1. Противопожарна защита

Отслабването на залепващия слой поради високите температури е главната причина за повредата на външно свързаните усилващи системи. Следователно, противопожарната защита се базира на мерки за ограничаване повишаването на температурата в залепващия слой.

Ламелите на Sika CarboDur могат да бъдат успешно защитени от пожар с облицовка от огнеупорни материали. Системата е изпитана в ЕМРА според ISO стандартите. По време на изпитването, практически не се е наблюдавало отгеляне на пушек (ЕМРА Доклад за изпитването № 148795, 1994).

#### 5.7.2. Ултравиолетово лъчение

Полимерните материали влошават качеството си, когато се изложат на слънчева светлина и ултравиолетово (UV-A и UV-B) лъчение, като може да получи и нарушаване на химичните връзки. Като резултат от това, способността за пренос на светлина намалява и се променя цвета на композитния материал. Въпреки че това явление може да се възприеме като индикатор за намаляване на якостта, всъщност той е само състояние, касаещо повърхността на материала, което обикновено не означава промяна в структурната му цялостност или физическа повреда.

Промените в цвета и намалената способност за пренос на светлината в композитните материали зависят предимно от матрицата на смолата, а не от усилващите нишки. Както може да се види от таблица 4.2 обаче, само арамидните нишки са засегнати от ултравиолетовото лъчение.

Като цяло, механичните свойства на композитите са само минимално повлияни от излагането на ултравиолетови лъчи.

Защита от ултравиолетовото лъчение се постига чрез използването на светла боя на акрилна или полиуретанова основа. Тя трябва да се положи докато смолата е все още лепкава на пипане. Втъвърдена вече повърхност от смола следва да се грундира преди да се полага боя.

#### 5.7.3. Умора

Възлеродните FRP композитни материали имат по-голяма устойчивост на умора от стоманата. Доминиращият фактор при умората на гредите, усилени с FRP е умората на съществуващата стоманена армировка.

#### 5.7.4. Пълзене

FRP композитните материали на въглеродна основа не са застрашени от пълзене, а пълзенето при FRP материалите на стъклена основа е незначително. Обаче пълзенето на FRP материалите с арамидни нишки не може да се пренебрегне. Тъй като самият AFRP композитен материал пълзи, деформациите в дългосрочен план се увеличават значително при елементи, усилен с AFRP.

Друг важен момент, който трябва да се вземе под внимание е слабата устойчивост на GFRP при продължително натоварване. При стъклените нишки, положени на продължителни напрежения се появява преждевременно разрушаване на опън (разрушаване при налягане). Следователно, съпротивлението на опън на GFRP спада до много ниски стойности (до 20 % от максималните), когато материалът е обект на постоянно напрежение.

Напреженията от корозия се появяват, когато атмосферата или околната среда са със корозиращ характер, но не до такава степен, че да въздействат самостоятелно. Проявата на тази корозия е в зависимост от действието и на други фактори, като времето, големината на напреженията, околната среда, вида на матрицата и нишките.

Въглеродните влакна остават сравнително незасегнати от корозия, предизвикана от налягане при ниво на напреженията до 80% от граничните. Арамидните и стъклените влакна са податливи на корозия от налягане.

#### 5.7.5. Динамичен удар

Единствено арамидните нишки притежават устойчивост на динамичен удар. Материалът се използва за защитни жилетки поради голямата му твърдост и висока устойчивост на разрушаване. Затова арамидните нишки могат да бъдат използвани в случаи, когато има нужда от предпазване или усиление на конструкции, които са застрашени от експлозии (например при терористични атаки) и е необходимо да се използват материали със свойствата да смекчават взривната вълна. Арамидните нишки могат да бъдат използвани и за усиление на мостови опори срещу случайно натоварване, причинено от превозни средства.

#### 5.7.6. Температура

Обикновено FRP усиляването се прилага при напукани бетонни участъци. Така че наличието на празнини в контактната повърхност между FRP материала и бетонната повърхност не е необичайно явление. В случай на ниски температури и когато има задържане на вода в тези празнини, разпространението на водата може да причини разслояване на FRP композита в контактната повърхност между FRP материала и бетона. Следователно следва да се вземе под внимание влиянието на цикъла на замръзване/размръзване върху състоянието на усиления с FRP композитен материал конструкции.

Проведени са изпитвания със статични и динамични натоварвания върху различни стоманобетонни греди, усилен със Sika CarboDur системи. Гредите са изпитвани при въздействието на висока относителна влажност и екстремални температури от  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ . По време на цикъла на замръзване се наблюдава наличие на лед в пукнатините. Въпреки това, последвалите тестове не показват отслабване на усиляващата система.

### 5.7.7. Влага

Влагата е един от факторите на околната среда, който оказва най-силно разрушаващо влияние върху материалите на строителните конструкции. Въглеродните и стъклените влакна са относително нечувствителни към въздействието на водата, докато арамидните влакна абсорбират до 13 % от теглото на влагата. Това има неблагоприятен ефект върху съпротивлението на опън и може да засегне контактната повърхност между нишките и смолата.

Освен това, матриците на смолата абсорбират вода дълъг период от време. Абсорбирането на вода води до намаляване на температурата на промяна на стъклообразното състояние, както и до втвърдяване на смолата. Тези два ефекта са частично обратими при епоксидната смола, ако водата се отстрани чрез изсушаване.

При усилване на бетонни елементи с FRP важен проблем се явява налягането на водата в порите. Тъй като FRP системата оказва вторичен ефект на запечатване на бетона, това вътрешно налягане се акумулира локално. За да се даде възможност на водната пара да се разпространи свободно в усилените чрез FRP елементи, то е необходимо да има достатъчно големи зони, свободни от FRP усилване.

### 5.7.8. Галванична корозия

Когато въглеродните нишки са в контакт със стомана, следва да се вземат специални мерки. Въглеродните влакна реагират химически, като благороден метал и могат да индуцират ток, ако не са електрически изолирани от металите. Следователно, алуминият и стоманата ще корозират (потенциална галванична корозия), ако се поставят в директен контакт с въглеродни нишки. Е-стъклени или арамидни нишки могат да се поставят първо като изолационен слой.

### 5.7.9. Алкалност/киселинност

Както може да се види от таблица 4.2, въглеродните нишки са устойчиви на алкални и киселинни среди, докато стъклените, а при някои случаи и арамидните нишки не притежават устойчивост.

Правилно апликираната матрица на смола успешно изолира и предпазва нишките и по този начин възпрепятства повредата им.

### 5.8. Предимства и недостатъци на FRP материалите

При сравняване на FRP полимерните композити със стоманата се отбелязват следните най-главни предимства:

- Отлична устойчивост на корозия
- Ниско тегло (1/4 до 1/5 от това на стоманата)
- Коравина, отговаряща на проектните изискванията
- Задоволителна химическа устойчивост
- Неограничено разнообразие по отношение на геометрия и размери
- Висока устойчивост на деформации
- Отлична устойчивост на умора и пълзене

Обаче FRP композитите притежават също и някои недостатъци, като:

- Те проявяват трошливост, т.е. проявяват линейна еластичност до момента на разрушаването на материала, без да показват значително провлачване (без наличие на площадка на провлачване) или пластична деформация
- Висока цена на суровините (ако се сравняват обаче на базата на постигнатата якост, то високата цена до известна степен се компенсира)
- Несъвместимост между коефициентите на топлинно разширение при FRP и при бетона
- При излагане на високи температури се получава преждевременно разрушаване на връзките

Следователно, FRP материалите не трябва да бъдат възприемани като абсолютен заместител на стоманата или други материали при извършване на интервенции на строителни конструкции. Вместо това трябва да се направи избор според изброените предимства и евентуалните недостатъци, а окончателното решение за употребата им трябва да вземе след като се преценят няколко фактора, включващи не само механичните свойства на материала, но също така практичност и дълготрайност.

### 5.9. Възможни приложения на FRP материалите

FRP материалите могат да се използват за външна апликация в регици случаи, включващи:

- **Външно укрепване със CFRP ламели** се прилага в много проекти по целия свят. Ниското тегло на ламелите и оригинално изготвените им повърхности, които са подходящи за свързване с помощта на епоксидни смоли, ги правят много по-лесни за употреба от стоманените плочи. Все още анкерването на краищата на ламелите остава проблем, но има доста техники, които могат да се употребят.

- **Обвиване на CFRP, AFRP и GFRP тъкани около елементи на строителни конструкции.** Тази техника има за цел да увеличи якостта и дуктилността за сеизмични цели. Но тъй като тази техника включва цялостното обвиване на елемента, тя може да се използва в случаи, когато повредата в бетона води до неговото разширяване.

- **Външно приложени предварително напрегнати FRP ламели**, с анкерирани блокове по краищата.

## 6. ПРОГРАМА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ И ИЗЧИСЛЕНИЕ НА CARBODUR КОМПОЗИТНИ МАТЕРИАЛИ FRP - полимерни композити, усилен с нишки, използвани за укрепване на строителни конструкции

Целта на тази програма е да подпомогне потребителя при изчисляването на размерите на композитните материали FRP - полимерни композити, усилен с нишки за укрепване на строителни конструкции, така че да се постигне: (а) повишаване якостта на огъване на конструкцията, (б) повишаване якостта на срязване и (с) обвиване на конструкцията или елемента с FRP материалите. В следващите дялове са разгледани тези три теми, като изложените разработки представляват теоретичната база на изчисленията.

Използваните в тази програма уравнения са публикувани във fib бюлетин №14 от юли 2001 г.: „Проектиране и използване на външно закрепени композитни материали FRP за усилване на стоманобетонни конструкции“ (1).

### 6.1. Теоретични постановки

#### 6.1.1. Увеличаване носимоспособността на огъване

Носимоспособността на огъване на носещите стоманобетонни елементи като греди, плочи и колони може да бъде увеличена чрез използване на FRP композитни материали, които се залепват с епоксидни материали към зоните с най-големи напрежения. Направлението на нишките на FRP материала е успоредно на направлението на най-големите опънни напрежения (по оста на елемента). Изложените по-долу изчисления се отнасят както за Гранично състояние по носеща способност (ULS), така и за Гранично състояние по експлоатационни изисквания.

#### Гранично състояние по носеща способност

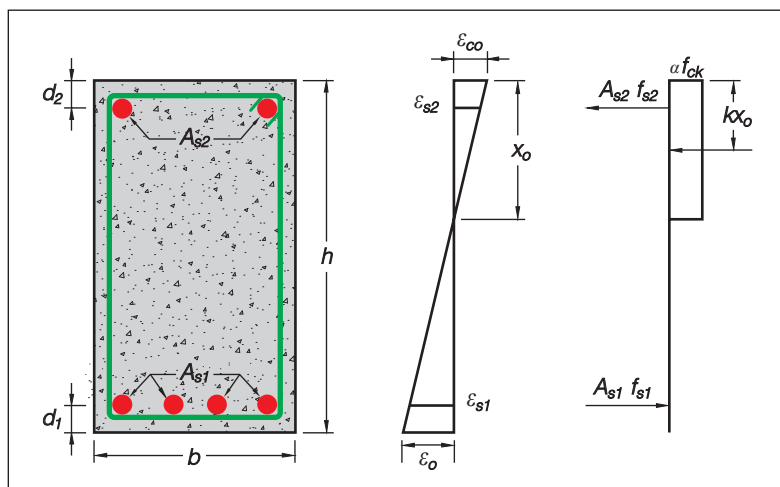
Изчисленията са направени при предпоставката, че разрушаването на елемента настъпва по един от следните два начина:

(а) настъпва провлачване на вътрешната опънна армировка и **бетонът се смачква** в натисковата зона;

(б) настъпва провлачване на вътрешната опънна армировка и **FRP композитът достига граничната си деформация**,  $\varepsilon_{f,lim}$  (това е опростен метод за разглеждане на отлепването на FRP композита в зоните, където огъването се явява доминиращо усилие, например, в средната част на отвора на проста греда).

Първата стъпка при изчисленията е да се намери първоначалната деформация,  $\varepsilon_o$ , която се появява в най-крайната зона на напречното сечение при извършване на операциите по усилването на елемента (фиг. 5.1). Тази деформация е резултат от действието на момента  $M_o$  (експлоатационен момент), действащ в най-критичното напречно сечение на елемента по време на операциите по усилването (например, под въздействието на собственото тегло на конструкцията). Тази деформация се изчислява на базата на уравнението за равновесието на вътрешните сили и моменти. По-долу са дадени резултатите от примера, разгледан на фиг. 5.1.





Фиг. 5.1 Първоначално състояние: Действащият момент  $M_o$  по време на усилването на елемента предизвиква първоначална деформация  $\varepsilon_o$  в най-крайната опънна зона на бетона.

Уравнение за вътрешното равновесие на силите (първоначално състояние):

$$\alpha f_{ck} b x_o + A_{s2} f_{s2} = A_{s1} f_{s1} \quad (5.1.1)$$

Уравнение за равновесието на моментите (първоначално състояние):

$$M_o = A_{s1} f_{s1} (h - d_1 - k x_o) + A_{s2} f_{s2} (k x_o - d_2) \quad (5.1.2)$$

където  $x_o$  е разстоянието от неутралната ос до най-крайната точка на натисковата зона на напречното сечение, а  $f_{s1}$ ,  $f_{s2}$  са напреженията съответно в долната и горната част на стоманената армировка.

$$f_{s1} = \varepsilon_{co} \frac{h - d_1 - x_o}{x_o} E_s \leq f_{yk} \quad (5.1.3)$$

$$f_{s2} = \varepsilon_{co} \frac{x_o - d_2}{x_o} E_s \leq f_{yk} \quad (5.1.4)$$

В по-горните уравнения  $f_{ck}$  е нормативната (цилиндрична) якост на бетона,  $f_{yd}$  е напрежението при провлачване на стоманата, а  $a$  и  $k$  са коефициенти, определящи местоположението и размера на равнодействащото напрежение в подложения на натиск бетонов блок. Тези коефициенти зависят от максималната деформация на бетона при натиск  $\varepsilon_{co}$ .

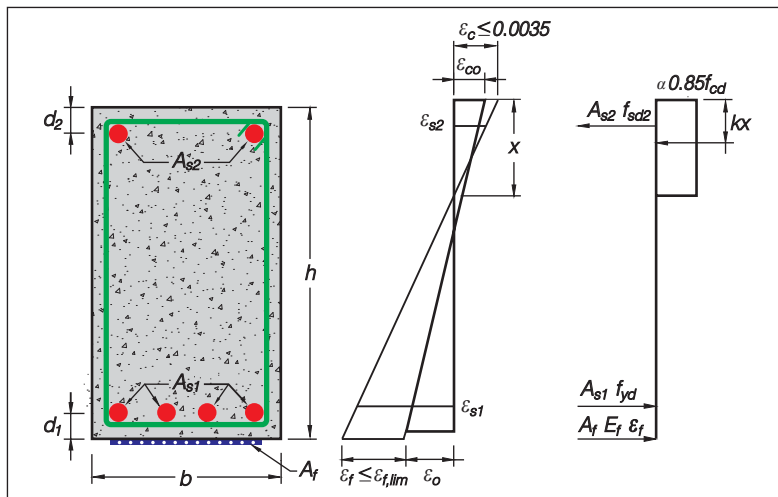
$$\alpha = \begin{cases} 1000 \varepsilon_{co} \left( 0.5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_{co} \right) & \text{ако } \varepsilon_{co} \leq 0.002 \\ 1 - \frac{2}{3000 \varepsilon_{co}} & \text{ако } 0.002 \leq \varepsilon_{co} \leq 0.0035 \end{cases} \quad (5.1.5)$$

$$k = \begin{cases} \frac{8 - 1000 \varepsilon_{co}}{4(6 - 1000 \varepsilon_{co})} & \text{ако } \varepsilon_{co} \leq 0.002 \\ \frac{1000 \varepsilon_{co} (3000 \varepsilon_{co} - 4) + 2}{2000 \varepsilon_{co} (3000 \varepsilon_{co} - 2)} & \text{ако } 0.002 \leq \varepsilon_{co} \leq 0.0035 \end{cases} \quad (5.1.6)$$

При числовото решаване на уравнения (5.1.1) и (5.1.2) се изчислява максималната деформация в бетона при натиск  $\varepsilon_{co}$  и разстоянието до наутралната ос  $x_o$ . Първоначалната деформация  $\varepsilon_o$  се дава с уравнението:

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{co} \frac{h - x_o}{x_o} \quad (5.1.7)$$

След като  $\varepsilon_o$  е изчислен, изследването на критичното напречно сечение при ULS (Гранично състояние по носеща способност) продължава въз основа на фиг. 5.2, където са показани диаграмите на деформациите и на вътрешните сили при Гранично състояние по носеща способност.



**Фиг. 5.2 Изследване на правоъгълно напречно сечение**  
(диаграма на деформациите и на вътрешните сили при Гранично състояние по носеща способност при огъване)

Уравнение за равновесието на вътрешните сили:

$$\alpha 0.85 f_{cd} b x + A_{s2} f_{sd2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f \quad (5.1.8)$$

Стойността на съпротивителният момент е:

$$M_{rd} = A_{s1} f_{yd} (h - d_1 - kx) + A_{s2} f_{sd2} (kx - d_2) + A_f E_f \varepsilon_f (h - kx) \quad (5.1.9)$$

Където  $A_f$ ,  $E_f$  и  $\varepsilon_f$  са съответно площта на напречното сечение, еластичният модул и деформацията на армировката от FRP материал. Напрежението и деформацията във FRP материала в горната стоманена армировка се изчисляват при максимална натискова деформация в бетона  $\varepsilon_c$  и положение на неутралната ос както следва:

$$f_{sd2} = \varepsilon_c \frac{x - d_2}{x} E_s \leq f_{yd} \quad (5.1.10)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{f, \text{lim}} \quad (5.1.11)$$

Трябва да се обърне внимание, че коефициентите  $\alpha$  и  $k$  в уравнения (5.1.8) и (5.1.9) са същите както в уравнения (5.1.5) и (5.1.6) като  $\varepsilon_{co}$  е заменен с  $\varepsilon_c$ . Числовото решаване на уравнения (5.1.8) и (5.1.9) се извършва чрез многократно повторение като по този начин се получава необходимото напречно сечение  $A_f$  на FRP композитния материал.

#### Гранично състояние по експлоатационни изисквания

При Гранично състояние по експлоатационни изисквания, изследването на критичното напречно сечение се извършва в съответствие с EC2 за две възможни комбинации от натоварване: Особено натоварване и Полезно натоварване.

При случая на Особено натоварване изчисленията се извършват както при Гранично състояние по носеща способност, като се правят следните изменения:

- $0.85 f_{cd}$  в уравнение (5.1.8) и при фиг. 5.2 се заменя с  $f_{ck}$ ;
- $M_{rd}$  се заменя с действащия момент (при условия на комбинация от Особено натоварване)  $M_{ser,r}$ ;
- $f_{yd}$  (опънните напрежения в армировката) се заменят с  $f_{s1}$ ;
- ограничението на напрежението е  $f_{s1} \leq 0.8 f_{yd}$  (за стоманата) и  $\sigma_c \leq 0.6 f_{ck}$ , където напрежението в бетона се определя от следната формула за връзка между напрежения и деформации в бетона (при  $\varepsilon_c \leq 0.002$ ):

$$\sigma_c = \frac{\varepsilon_c \left( 2 - \frac{\varepsilon_c}{0.002} \right)}{0.002} f_{ck} \quad (5.1.12)$$

При случая на Полезно натоварване изчисленията се извършват като при Гранично състояние по носеща способност, като се направят следните промени:

- (а)  $0.85 f_{cd}$  в уравнение (5.1.8) и във фиг.5.2 се заменя с  $f_{ck}$ ;
- (б)  $M_{rd}$  се заменя с действащия момент (при условия на комбинация от Полезно натоварване)  $M_{ser,q-p}$ ;
- (в)  $f_{yd}$  (опънните напрежения в стоманата) се заменя с  $f_{s1}$ ;
- (г)  $\varepsilon_c$  в уравнение (5.1.5) - (5.1.6) се заменя с  $\varepsilon_c/(1+\varphi)$ , където  $\varphi$  е коефициент на пластична деформация (пъзене);
- (г) ограничението на напрежението е  $f_{s1} \leq 0.8 f_{yk}$  (за стоманата) и  $\sigma_c \leq 0.45 f_{ck}$ , където напрежението в бетона се определя от уравнение (5.1.12) като  $\varepsilon_c$  се заменя с  $\varepsilon_c/(1+\varphi)$ .

### Проверка на зграбината на залепване на FRP материала

При загадени от потребителя размери и геометрия на напречното сечение на FRP материала ( $n$  на брой ивици с ширина  $b_f$  и дебелина  $t_f$ , разположени в  $m$  пласта, като  $n/m$  трябва да бъде цяло число при  $m > 1$ ), програмата изчислява максималната сила  $N_{bd,max}$ , която може да бъде понесена от общия брой ивици при съответната дължина на закрепването  $l_{bd,max}$ , преди да започне отлепване на външната армировка по крайщата (областта на анкерно укрепване), виж фиг. 5.3. Изчисленията се извършват въз основа на следните формули:

$$l_{bd,max} = 0.6 \sqrt{\frac{E_f (m t_f)}{f_{ctd}}} \quad (5.1.13)$$

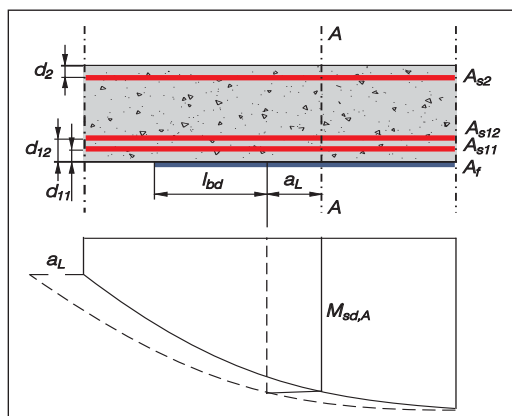
$$N_{bd,max} = \frac{n}{m} 0.5 k_b b_f \sqrt{E_f (m t_f) f_{ctd}} \quad (5.1.14)$$

$$k_b = \max \left( 1.106 \sqrt{\frac{2 - \left( \frac{b_f}{b/(n/m)} \right)}{1 + \left( \frac{b_f}{400} \right)}} \right) \quad (5.1.15)$$

$b$  = ширина на гредата [ $b/(n/m)$  е равно на разстоянието между ивиците при брой на пластове по-голям от единица]

$f_{ctd}$  = проектна стойност на якостта на опън на бетоновия слой близо до повърхността, в  $N/mm^2$

$l_{bd,max}$  е в  $mm$ ,  $N_{bd,max}$  е в  $N$ ,  $b_f$  и  $t_f$  са в  $mm$ ,  $E_f$  е в  $N/mm^2$ .



Фиг. 5.3 Диаграма на огъващия момент и определяне на дължината на залепване на FRP материала за сечение A.

За всяко напречно сечение (например за сечение A), от уравненията за статическо равновесие и съвместността на деформациите се извежда опънната сила  $N_{fd,A}$  поемана от всяка ивица. Ако тази сила не надвишава  $N_{bd,max}$ , то тогава проверката за залепването е потвърдена. При този случай не се очаква разрушаване в областта на анкерното укрепване при условие, че дължината на залепване  $l_{bd,max}$  е достатъчна. Дължината на залепване, отнасяща се за  $N_{fd,A}$  се изчислява по следния начин:

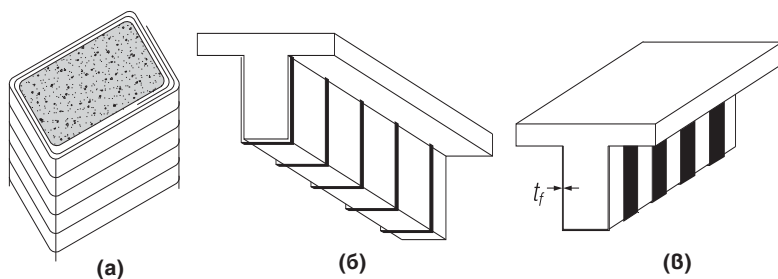
$$l_{bd,A} = l_{bd,max} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{N_{fd,A}}{N_{bd,max}} \right)} \right] \quad (5.1.16)$$

Както е отбелязано по-горе,  $N_{fd,A}$  е опънната сила, поемана от композитния материал FRP. Тя се изчислява като се умножи площта на напречното сечение  $A_f$  с произведението от еластичния модул и деформацията  $E_f \varepsilon_f$ , където  $\varepsilon_f$  се получава от уравнението за равновесието и съвместната работа на напречното сечение. Уравненията в този случай са същите като тези, използвани при Гранично състояние по носеща способност (ULS), при условие, че опънната стоманена арматура не е провлачена. Използват се същите формули, както при Граничното състояние по носеща способност, като:

- $M_{rd}$  се заменя от проектната стойност на огъващия момент, действащ в сечение A,  $M_{sd,A}$ ;
- $f_{yd}$  се заменя с  $f_{sd1}$ ;
- $\varepsilon_o$  се приема приблизително равно на деформацията при  $M_o$  умножено с редуциращия коефициент ( $M_{sd,A} / M_{sd}$ ). Това се извършва при предпоставката, че огъващият момент, възникващ по време на усиливателните операции в напречното сечение A,  $M_{o,A}$ , е равен на  $M_o$  (действащ в критичното сечение), редуциран с коефициента  $M_{sd,A} / M_{sd}$  (га се обърне внимание, че моментът действа в критичното сечение).

### 6.1.2. Усилване по отношение на якостта на срязване

Усилването на срязване на стоманенобетонни елементи при използване на композитни материали FRP може да се извърши чрез залепване на външна армировка с направление на основните нишки успоредно, доколкото е практически възможно, на направлението на максималните опънни напрежения в елемента, така че ефективността на FRP материала да бъде максимална. В най-често срещания случай на конструктивни елементи, подложени на напречно натоварване, траекториите на максималните напрежения в критичните за срязването зони образуват с оста на елемента ъгъл с приблизителна стойност 45 градуса. Обаче обикновено е по-удобно външната FRP армировка да се положи с направление на основните нишки, перпендикулярно на оста на елемента (фиг. 5.4).



**Фиг. 5.4** Примери за усиление на срязване чрез използване на: (а) затворени (правилно закомвени) обшивки; (б) прекъснати ленти, закомвени в натисковата зона; (в) отворени обшивки.

Затворените обшивки (фиг. 5.4.а) или правилно анкерирани ленти (фиг. 5.4б) са винаги за предпочитане пред отворените обшивки (фиг. 5.4.в), тъй като в последния случай FRP материалът е възможно преждевременно да се отлепи и по този начин да намалее ефективността на действието му.

Външната армировка от FRP композитен материал може да се разглежда аналогично като вътрешната стоманена армировка (ако се приеме, че FRP материала поема само нормални напрежения в основното си направление) и при предпоставката, че при гранично състояние по носеща способност при срязване (диагонална опън в бетона) във FRP материала се получава действителна деформация по основното направление на нишките  $\varepsilon_{f,e}$ , която в общия случай е по-малка от разрушителната деформация при опън  $\varepsilon_{fu}$ . Действителната деформация зависи от степента на отлепване на FRP материала, когато се изчерпи якостта на срязване на стоманенобетонния елемент, от типа на закомвянето (правилно закомвените FRP материали, така наречените затворени обшивки са по-ефективни от по-слабо закомвените FRP материали т.е. отворените обшивки). Якостта на срязване на усиления елемент може да се изчисли по следния начин (съгласно формулата на Евроког 2):

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}) \quad (5.1.17)$$

където  $V_{fd}$  е приноса на композитния материал FRP за увеличаване якостта на срязване на конструктивния елемент и се пресмята от следния израз:

$$V_{fd} = 0.9 \varepsilon_{fd,e} E_f \rho_f b d (1 + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (5.1.18)$$

В горния израз  $E_f$  е еластичният модул на FRP материала,  $b$  е ширината на напречното сечение,  $d$  е полезната височина на сечението,  $\alpha$  е ъгълът между направлението на основните носещи нишки на FRP материала и надлъжната ос на елемента,  $\varepsilon_{fd,e}$  е проектната стойност на действителната деформация на FRP материала и  $\rho_f$  е процентът на FRP армиране, равно на  $(2t_f/b) \sin \alpha$  за FRP материали с непрекъснато залепване с дебелина  $t_f$ , или  $(2t_f/b)(b_f/s_f)$  за FRP армиране във формата на ленти или листове с ширина  $b_f$  (перпендикулярна на направлението на нишките) на разстояние  $s_f$  една от друга (междусововото разстояние между лентите по направление на оста на конструктивния елемент). Уравнение (5.1.18) може да бъде изчислено за дебелина на FRP материала, необходима да осигури съпротивление на срязване равно на  $V_{fd}$ .

Действителната FRP деформация може да бъде определена по следния начин:

- При напълно обвити или правилно анкерирани композитни материали FRP с карбонови или стъклени нишки (CFRP или GFRP):

$$\varepsilon_{fd,e} = \min \left[ \frac{k 0.17 \varepsilon_{fu} \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.3}}{\gamma_{f,f}}, \frac{\varepsilon_{f,lim}}{\gamma_{f,1}} \right] \quad (5.1.19a)$$

- При напълно обвити или правилно анкерирани FRP материали с араמידни нишки (AFRP):

$$\varepsilon_{fd,e} = \min \left[ \frac{k 0.048 \varepsilon_{fu} \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.47}}{\gamma_{f,f}}, \frac{\varepsilon_{f,lim}}{\gamma_{f,1}} \right] \quad (5.1.19b)$$

- При отворени FRP обшивки (например странични или U-образни листове):

$$\varepsilon_{fd,e} = \min \left[ \frac{k 0.17 \varepsilon_{fu} \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.3}}{\gamma_{f,f}}, \frac{k 0.65 \cdot 10^{-3} \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.56}}{\gamma_{f,b}}, \frac{\varepsilon_{f,lim}}{\gamma_{f,1}} \right] \quad (5.1.20)$$

В горните уравнения  $f_{cm}$  е средната якост на натиск на бетона в  $N/mm^2$ ,  $E_f$  се измерва в  $kN/mm^2$ ,  $k$  е константа, отнасяща се до характеристиката на средната стойност на действителната FRP деформация (приема се  $k = 0.8$ ) и  $\gamma_f$  е коефициент на сигурност на FRP материала. Коефициентът на сигурност зависи от типа на FRP материала, както и от приетия модел на разрушение при срязване. Първото условие в уравнения (5.1.19а), (5.1.19б) и (5.1.20) се отнася за разрушението на FRP материала (когато се изчерпи якостта на срязване), като  $\gamma_{f,f} = (1.20$  за CFRP, 1.25 за AFRP, 1.30 за GFRP), второто условие в уравнение (5.1.19) се отнася за отлепването на FRP материала като  $\gamma_{f,b} (=1.30)$  и последното условие се изпълнява ( $\gamma_{f,l} = 1.25$ ), ако е необходимо да се ограничи FRP деформацията с цел да се запази целостта на бетона и да се задейства механизма на сцепление с инертния материал.

В случаите на кръгло напречно сечение (обикновено при колони), приносът на композитния материал FRP (при затворени обшивки) за увеличаване съпротивлението на срязване зависи от якостта на опън на FRP обшивката, но може да бъде ограничена до максимална стойност, за да не се допусне прекалената деформация на бетона, дължаща се на сцеплението с инертния материал в наклонените пукнатини. При ограничаване на деформацията на бетона и при радиална деформация с максимална стойност  $\varepsilon_{max}$ , съпротивлението на срязване на FRP материала се изчислява по следния начин:

$$V_{fd} = \frac{\varepsilon_{max}}{\gamma_f} E_{fu} \rho_f \frac{1}{2} \frac{\pi D^2}{4} \cot \theta \quad (5.1.21)$$

където  $D$  е диаметърът на колоната,  $\rho_f$  е обемното съотношение на FRP материала и  $\theta$  е ъгълът между образуваните наклонени пукнатини и оста на колоната. Експериментално е намерено, че  $\varepsilon_{max}$  е в поряръка на 0.006.

### 6.1.3. Обвиване с FRP материал

Главните цели при обвиването с FRP материал са следните:

- да се увеличи съпротивлението на бетона и допустимата деформация,
- да се осигури напречно укрепване на надлъжната армировка,
- да се предпази повърхността на бетона от напукване.

При кръгли колони тези цели могат да бъдат постигнати като се прилагат външни FRP обшивки, които са или разположени непрекъснато по цялата повърхност или са прекъснати под формата на ленти. При правоъгълни колони обвиването може да се извърши с използване на FRP армировка с правоъгълна форма, като ълите ѝ се закръглят преди поставянето ѝ. Трябва да се отбележи, че обвиването с правоъгълна армировка е по-малко ефективно (но все пак възможно), тъй като въздействието на обвивката е локализирано главно в ълите и трябва да се прилагат обшивки със значително по-голяма дебелина, за да се ограничат напречните деформации или деформациите на армировката.

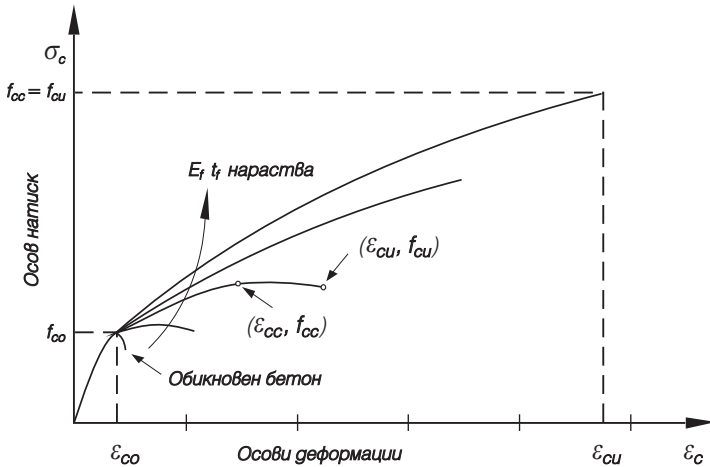
Диаграмата на зависимостта между напрежение и деформация при бетон, обвит с FRP композитен материал е показана схематично на фиг. 5.5. Графиката се доближава до права линия със закръглени върхове и с преходна зона в зона-



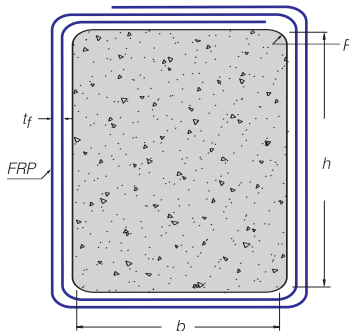
та на напреженията, които са близки до съпротивлението на бетон без FRP покритие  $f_{co}$ . След тази зона правите леко се изкривяват, докато бетонът достигне граничната си якост  $f_{cc}$ , а FRP обшивката се разруши при опънно напрежение  $f_{f,e}$  и съответстваща деформация  $\epsilon_{fu,e}$ , която в общия случай е по-малка от едноосната опънна якост  $\epsilon_{fu}$ .

Тази редукция се обяснява с няколко фактора, включващи: (а) триосното разпределение на напреженията във FRP материала (дължащо се на натоварването по оста и действието на обшивката, а също така и на огъването, например при ъглите с малки радиуси); и (б) качеството на изпълнение (евентуалната неефективна работа на някои нишки поради неправилното им разположение и претоварването на други нишки, повредени нишки при острите ъгли, локални издатини и други).

Construction



Фиг. 5.5 Крива на зависимостта на деформациите от напрежението за прост (необвит) бетон и бетон, обвит с FRP материал.



За правоъгълни напречни сечения с размери  $b$  и  $h$  ( $b \geq h$ ), фиг. 5.6, ефектът от FRP обвиването може да се изчисли на базата на следващите изрази при якост на обвит бетон  $f_{cc}$  и съответстваща деформация  $\epsilon_{cu}$ .

Фиг.5.6 Правоъгълно напречно сечение с ъгли, закръглени с радиус R.



$$f_{cc} = E_{\text{sec},u} \varepsilon_{cu} \geq f_{co} \quad (5.1.22)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5(\alpha_1 \alpha_2 - 1) \right] \left[ \frac{E_{cc} (E_{co} - E_{\text{sec},u})}{E_{\text{sec},u} (E_{co} - E_{cc})} \right]^{-\frac{E_{cc}}{E_{co}}} \quad (5.1.23)$$

където:

$$E_{\text{sec},u} = \frac{E_{co}}{1 + 2\beta \varepsilon_{fu,e}} \quad (5.1.24)$$

$$\beta = \frac{E_{co}}{f_{co}} - \frac{1}{\varepsilon_{co}} \quad (5.1.25)$$

$$E_{cc} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 f_{co}}{\varepsilon_{co} [1 + 5(\alpha_1 \alpha_2 - 1)]} \quad (5.1.26)$$

$$\alpha_1 = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{\sigma_{1,b}}{f_{co}}} - 2 \frac{\sigma_{1,b}}{f_{co}} - 1.254 \quad (5.1.27)$$

$$\alpha_2 = 1 - \left[ 0.6 \left( \frac{h}{b} \right)^2 - 1.4 \frac{h}{b} + 0.8 \right] \sqrt{\frac{\sigma_{1,b}}{f_{co}}} \quad (5.1.28)$$

$$\sigma_{1,b} = \frac{2t_f}{h} k_e f_{f,e} \quad (5.1.29)$$

$$k_e = 1 - \frac{(b - 2R)^2 + (h - 2R)^2}{3A_g} \quad (5.1.30)$$

(Коефициент на ефективност на FRP обвивката)

$E_{co}$  = първоначален еластичен модул на бетона,  $\varepsilon_{co}$  = 0.002 (при деформация, отговаряща на  $f_{co}$ ),  $A_g$  = брунтното напречно сечение на бетона =  $bh - (4 - \pi)R^2$ .

Следва да се отбележи, че при кръгло напречно сечение с диаметър  $D$ , обвито с ленти с ширина  $b_f$  при разстояние между тях  $s_f$ ,  $k_e$  се изчислява както следва:

$$k_e = \left[ 1 - \frac{(s_f - b_f)}{2D} \right]^2 \quad (5.1.31)$$

## 6.2. Използуване на програмата за изчисление на Carbodur FRP материалите

### 6.2.1. Обща част

Software пакетът за изчисление на FRP материалите представлява една удобна, проста и сигурна програма за определяне на размерите на FRP материалите с цел да се осигури необходимото усилване на конструкциите по отношение на огъване и срязване, както и да се определи необходимата обвивка (кожух) на дадени части от стоманобетонните елементи.

По принцип software-ът е разделен на две части:

Първата се отнася за определянето на входящата информация, възможните решения и възможностите за отпечатване, а втората част разглежда представянето на резултатите, избора на подходящ брой от FRP ленти или слоеве и отпечатването на информацията. Освен тези две процедури е даден и алгоритъм за числово решаване на конкретни задачи.



При стартирането на програмата потребителят е необходимо да въведе данни: „Data input“ за един от следните случаи: *Усилване по отношение на огъването (при Гранично състояние по носеща способност и Гранично състояние по експлоатационни изисквания), усилване по отношение на срязването и обвиване на елемента с FRP материали.* Когато въведе всички данни, потребителят може да премине към „Solutions“ или отново да въведе входящите данни, използвайки опцията за ново въвеждане „New Input“. По време на въвеждането на входящите данни програмата проверява валидността на входящите параметри и предупреждава, ако данните не са коректно зададени. Програмата дава възможност за дефиниране на информацията за отпечатване чрез серия от опции „Options“, както и за промяна на приетите по подразбиране стойности на коефициентите за безопасност за FRP материалите. Командите „Open“ и „Save“ дават възможности на потребителя да проследи различните случаи на усилване чрез FRP материали, чиито входни данни са въведени и съхранени в програмата.

Процедурата по решаването на задачата започва с натискането на бутона "Solutions", което представлява същността на програмата.

След завършването на операцията резултатите се представят по отношение на напречното сечение на композитния материал FRP (при усилване по отношение на огъването) или като обща дебелина на FRP материала, който е необходим за решаване на проблема (при усилване по отношение на срязването или при обвиване на конструктивния елемент). В случай на усилване на огъване се дава допълнителна информация, отнасяща се за степента на усилване (възможността за поемане на огъващи моменти след усилването, разделена на тази преди усилването), диаграма на деформациите (като разстоянието до неутралната ос, деформациите на бетона, стоманата и FRP материала) по време на усилващите операции, както и след това, дуктилността на материала, приетият модел на разрушаване, моментът, действащ преди усилването (за *Гранично състояние по експлоатационни изисквания*) и максималният момент, който може да се постигне в конструктивния елемент (за *Гранично състояние по експлоатационни изисквания*). Освен това потребителят има възможността да въведе размерите на действителния FRP материал (дебелина и ширина на лентите при усилване по отношение на огъването или дебелина на всеки пласт при усилване на срязване или при обвиване на конструкцията), като програмата изчислява броя на лентите или пластове, както и постигнатия капацитет при огъване, срязване или при обвиване на елемента.

### 6.2.2. Усилване на конструкцията по отношение на огъване

#### **ВЪВЕЖДАНЕ НА ДАННИТЕ**

Потребителят въвежда данните в следния рег:

#### **Тип на напречното сечение**

Опцията „Т-beam“ се избира за Т-образно напречно сечение, а „Rectangular beam“ - за правоъгълно напречно сечение. Втората опция се отнася също така и за участъци от плочи.

#### **Геометрия на напречното сечение**

- Width  $b$ :** въвежда се ширината на напречното сечение в метри
- Height  $h$ :** въвежда се височината на напречното сечение в метри
- Effective width  $b_{eff}$ :** въвежда се приведената ширина в метри (само за случай на Т-образно напречно сечение).
- Slab thickness  $h_f$ :** въвежда се дебелината на плочата в метри (само за случай на Т-образно напречно сечение).

#### **Данни за бетона**

Потребителят има възможност да въведе данни за **якостта на бетона според класа му** (ако е известен) или да въведе **средна якост ( $f_{cm}$ )** в  $N/mm^2$ . Между двата вида якост се приема следната връзка:  $f_{ck} = f_{cm} - 1.64 \times 5$ . Освен това потребителят има възможност да въведе коефициента на пластична деформация (пълзене), който се определя в съответствие с Еврокод 2. Този коефициент се използва при проверката по Гранично състояние по експлоатационни изисквания за Полезно натоварване. Стойността на този коефициент тук е приета (по погрязване) = 2.5.

### Композитни материали

Със натискане на бутона „Sika CarboDur Properties“ се извеждат характеристиките на различни CarboDur системи с цел извършване на консултация.

**Elastic modulus  $E_s$**  (Еластичен модул): Въведете еластичния модул на FRP материала в  $kN/mm^2$  (този модул се дава от производителя).

**Limiting strain  $\epsilon_{f,lim}$**  (Гранична деформация): Въведете граничната деформация на FRP материала (това са данни без дименсия!). Извън тези стойности FRP материалът може да се отлепи в зоните с голям огъващ момент (пукнатини от огъване). Предлагана стойност (по подразбиране) = 0.008.

### Стоманена армировка

**Elastic modulus  $E_s$**  (Еластичен модул): Въведете еластичния модул на надлъжната стоманена армировка в  $kN/mm^2$ . Стойността по подразбиране е  $200 kN/mm^2$ .

**Characteristic yield stress  $f_{yk}$**  (Нормативно напрежение на провлачване): Въведете нормативното напрежение на провлачване на надлъжната стоманена армировка в  $N/mm^2$ , например 500 за стомана S 500.

**Top  $A_{s2}$**  (Горна армировка): Въведете общата площ на напречното сечение на стоманената армировка в натисковата зона (ако има такава) в  $mm^2$ .

**At distance  $d_2$**  (На разстояние): Въведете разстоянието от центъра на тежестта на  $A_{s2}$  до най-крайната точка на натисковата зона на напречното сечение (в метри).

**Bottom  $A_{s12}$**  (Долна армировка): Въведете общата площ на напречното сечение на втория ред (ако има такъв) на стоманената армировка в опънатата зона (в метри).

**At distance  $d_{I2}$**  (На разстояние): Въведете разстоянието от центъра на тежестта на  $A_{sI2}$  до най-крайната опънна точка от напречното сечение (в метри).

**Bottom  $A_{sII}$**  (Долна армировка): Въведете общата площ на напречното сечение на първия рег стоманена армировка от опънната зона (в метри).

**At distance  $d_{II}$**  (На разстояние): Въведете разстоянието от центъра на тежестта на  $A_{sII}$  до най-крайната опънна точка на напречното сечение (в метри).

### **Огъващи моменти**

**Bending moment during strengthening  $M_o$**  (Огъващ момент по време на усилването): Въведете огъващия момент, който действа в напречното сечение по време на усилващите операции (експлоатационен момент). Това е моментът, който се получава под въздействието на собственото тегло на конструкцията, когато се извършва процесът по усилването ѝ (в  $kNm$ ).

**Required design moment after strengthening  $M_{sd}$**  (Необходимият огъващ момент след усилващите операции): Въведете проектната стойност на огъващия момент след усилването (в  $kNm$ ) за проверка за Гранично състояние по носеща способност.

**Acting moment - Rare load  $M_{ser,r}$**  (Действащ момент - Особено натоварване): Въведете огъващия момент, който действа в критичното напречно сечение под въздействие на комбинация Особени товари при Гранично състояние по експлоатационни изисквания (в  $kNm$ ).

**Acting moment - Quasi-permanent load  $M_{ser,q-p}$**  (Действащ момент - Полезно натоварване): Въведете огъващия момент, действащ в критичното напречно сечение под въздействие на комбинация от Полезни товари при Гранично състояние по експлоатационни изисквания (в  $kNm$ ).

### **Команди**

**Solution:** Програмата проверява за грешки във въвеждането и дава решението.

**New Input:** С тази команда входящите данни могат да бъдат заданени отново.

**Help:** Активира помощните функции.

**Options:** Активира опциите, описани в част 5.2.5.

**Save:** Съхранява всички входящи данни във файл.

**Open:** Осигурява достъп до файла с данните, където се съхранява входящата информация.

**About:** Отваря се прозорец за представяне на програмата.

**Exit:** Излизане от програмата.

### **Информационен рег**

Показана е следната информация: Проект; Име; Фирма; Дата; Време  
Първите три елемента от информацията се въвеждат от потребителя чрез „Options“ и „General“, докато последните два елемента - датата и времето автоматично се въвеждат от програмата.

### **\*\*\*Общи бележки\*\*\***

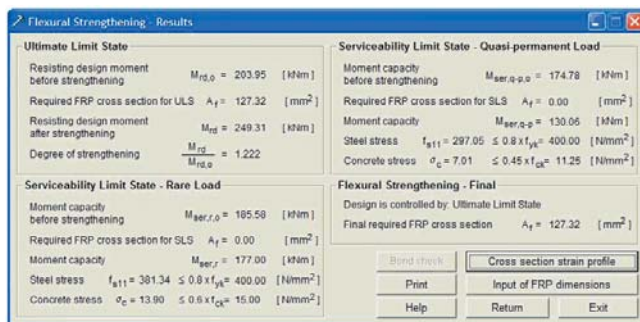
За всяка въведена от потребителя стойност програмата извършва проверка за валидност (например да не е прекалено висока или прекалено ниска) и предупреждава ако има нередност. Програмата предупреждава също ако потребителят въведе грешни характеристики (например буква вместо цифра) или пропусне да попълни дадена клетка. Програмата извършва допълнителни про-

верки и предупреждава, ако комбинацията от стойности е нереална (например съдействащата ширина на плочата не може да бъде по-малка от ширината на ерегата).

Когато се избере опцията „Solutions“, програмата извършва определен брой проверки и предупреждава, ако търсения съпротивителен момент след усилването е твърде голям (тъй като тогава тази част от строителния елемент не би могла да бъде усилена, независимо какво количество FRP материал се приложи) или прекалено малък (когато е по-малък от съпротивителния момент преди усилването).

## РЕЗУЛТАТИ

След завършване на процеса на изчисление, прозорецът „Resultats“ се появява на екрана.



### Гранично състояние по носеща способност

**Resising design moment before strengthening  $M_{rd,0}$**  (Съпротивителен момент преди усилването): Тази стойност на съпротивителния момент е изчислена без използването на композитни материали FRP.

**Required FRP cross section for ULS  $A_f$**  (Необходимото напречно сечение на FRP материала за проверка по Гранично състояние по носеща способност): Общата площ на напречното сечение на FRP материала се добавя към площта за проверка на опън по Гранично състояние по носеща способност.

**Resising design moment after strengthening  $M_{rd}$**  (Съпротивителният момент след усилването): Това е стойността на съпротивителния момент, който отговаря на горното напречно сечение  $A_f$  на FRP материала. Трябва да се отбележи, че тази стойност е възможно да бъде малко по-различна от въведената от потребителя, поради закръгляне на резултатите.

**Degree of strengthening  $M_{rd}/M_{rd,0}$**  (Степен на усилването): Отношението на съпротивителния момент след усилването към същия преди усилването.

### Гранично състояние по експлоатационни изисквания - Особени товари

**Moment capacity before strengthening  $M_{ser,r,0}$**  (Възможност за поемане на момент преди усилването): Това е стойността на момента, който е изчислен без употребата на FRP материали. Програмата предупреждава потребителя ако

огъващият момент по време на усилването  $M_o$  е по-голям от момента преди усилването  $M_{ser,r,o}$ .

**Required FRP cross-section for SLS  $A_f$**  (Необходимо напречно сечение на FRP материала за проверка по Гранично състояние по експлоатационни изисквания): Общата площ на напречното сечение на FRP материала трябва да се добави към площта за изчисление на опън, за да се извърши проверка по Гранично състояние по експлоатационни изисквания за комбинация от Особени натоварвания.

**Moment capacity  $M_{ser,r}$**  (Възможност за поемане на момент): Стойността на този момент съответства на горното напречно сечение  $A_f$  на FRP материала. Трябва да се отбележи, че тази стойност е възможно леко да се отличава от въведената от потребителя, поради закръгляне на размерите.

**Steel stress  $f_{s,II}$**  (Напрежение в стоманата): Напрежението в най-силно натоварената опънна стоманена армировка за проверка по Гранично състояние по експлоатационни изисквания при комбинация от Особени натоварвания.

**Concrete stress  $\sigma_c$**  (Напрежение в бетона): Проверката за максимални напрежения в бетона за Гранично състояние по експлоатационни изисквания се извършва при комбинация от Особени натоварвания.

Трябва да се отбележи, че за проверка за комбинация от Особени товари при Гранично състояние по експлоатационни изисквания, напреженията или в стоманата или в бетона достигат съответните си гранични стойности. За стоманата граничната стойност е  $0.8 f_{yk}$ , а за бетона граничната стойност на напрежението е  $0.6 f_{ck}$ . Ако  $M_{ser,r}$  е по-малко от  $M_{ser,r,o}$ , то употреба на FRP материал не е необходима за проверката по Гранично състояние по експлоатационни изисквания при Особено натоварване и в този случай никои от горните материали не достига своите гранични стойности на напрежението.

#### **Гранично състояние по експлоатационни изисквания - Полезно натоварване**

**Moment capacity before strengthening  $M_{ser,q-p,o}$**  (Възможност за поемане на момент преди усилването): Тази стойност на момента е изчислена без употребата на FRP материал. Програмата предупреждава потребителя, ако огъващият момент по време на усилването  $M_o$  е по-голям от  $M_{ser,q-p,o}$ .

**Required FRP cross-section for SLS  $A_f$**  (Необходимото напречно сечение на FRP материала за проверка по Гранично състояние по експлоатационни изисквания): Общото напречно сечение на FRP материала трябва да се добави към площта, необходима за изчисление на опъна при извършване на проверка по Гранично състояние експлоатационни изисквания при комбинация от Полезни товари.

**Moment capacity  $M_{ser,q-p}$**  (Възможност за поемане на момент): Стойността на този момент отговаря на горното напречно сечение  $A_f$  на FRP материала. Трябва да се отбележи, че тази стойност може да се различава леко от въведената от потребителя, поради закръгляне на стойностите.

**Steel stress  $f_{s,II}$**  (Напрежение в стоманата): Напрежението в най-силно натоварената опънна армировка при проверка по Гранично състояние по експлоатационни изисквания при действието на Полезно натоварване.

**Concrete stress  $\sigma_c$**  (Напрежение в бетона): Максималното напрежение в бетона при проверка по Гранично състояние по експлоатационни изисквания при действието на Полезно натоварване.



Трябва да се отбележи, че за проверката по Граничното състояние по експлоатационни изисквания при действие на Полезни товари напрежението или в бетона, или в стоманата достига своите гранични стойности. За стоманата граничната стойност на напрежението е  $0.8 f_{yk}$ , а максималното напрежение в бетона е на стойност  $0.45 f_{ck}$ . Ако  $M_{ser,q-p}$  е по-малко от  $M_{ser,q-p,0}$ , то не е необходимо да се прилага FRP материал за проверка по Гранично състояние по експлоатационни изисквания под въздействието на Полезно натоварване и в този случай нито един от горните материали не достига своите гранични стойности.

#### **Усилване по отношение на огъването - окончателни стойности**

Design controlled by: Проектирането се извършва на базата на Граничните състояния на материала, като се търси максималната от трите  $A_f$  стойности, изчислени за Гранично състояние по носеща способност, Гранично състояние по експлоатационни изисквания - Особено натоварване, Гранично състояние по експлоатационни изисквания - Полезно натоварване.

(Final required FRP cross section  $A_f$  (Необходимо напречно сечение на FRP материала - окончателна стойност): Това е максималната от трите  $A_f$  стойности, изчислени за Гранично състояние по носеща способност, Гранично състояние по експлоатационни изисквания - Особено натоварване, Гранично състояние по експлоатационни изисквания - Полезно натоварване.

#### **Команду**

**Cross section strain profil** (Диаграма на деформациите на напречното сечение): Отваря се прозорец, на който са показани деформационните характеристики на напречното сечение, както с графики, така и с цифри.

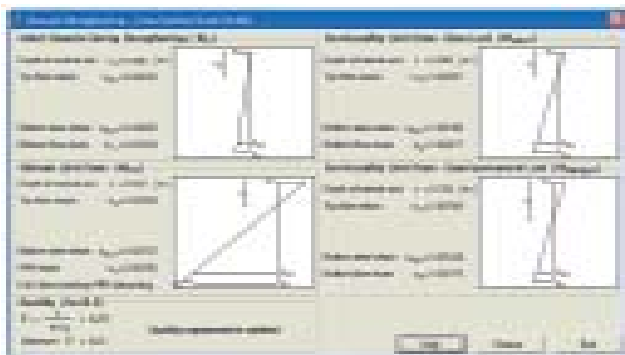
#### **Първоначално състояние по време на усилването ( $M_0$ )**

- Depth of neutral axis (Разстояние до неутралната ос): разстоянието до неутралната ос в метри по време на усилването (под въздействието на  $M_0$ ).
- Top fibre strain (Деформация в горната част): деформацията в най-крайната натискова точка на бетона по време на усилването (под въздействието на  $M_0$ ).
- Top steel strain (Деформация на горната армировка): деформацията в горната стоманена армировка по време на усилването (под въздействие на  $M_0$ ).
- Bottom steel strain (Деформация в долната армировка): деформацията в долната стоманена армировка по време на усилването (под въздействието на  $M_0$ ).
- Bottom fibre strain (Деформация в долната част на сечението): деформацията в най-крайната опънна зона на бетона по време на усилването (под въздействие на  $M_0$ ).

#### **Гранично състояние по носеща способност ( $M_{rd}$ )**

- Depth of neutral axis (Разстояние до неутралната ос): разстоянието до неутралната ос в метри, когато е достигнат момент равен на  $M_{rd}$ .
- Top fibre strain (Деформация в горната част на напречното сечение): деформацията в най-горната натискова зона на бетона, когато моментът е равен на  $M_{rd}$ . Ако тази стойност е равна на 0.0035, то бетонът се смачква под въздействие на натиска.

- Top steel strain (Деформация в горната армировка): деформацията в горната стоманена армировка при стойност на момента равна на  $M_{rd}$ .
- Bottom steel strain (Деформация в долната армировка): деформацията в долната стоманена армировка, при стойност на момента равна на  $M_{rd}$ .
- FRP strain (Деформация в FRP материала): Деформацията във FRP материала, когато моментът е равен на  $M_{rd}$ . Ако тази стойност е равна на граничната деформация  $\epsilon_{f,lim}$  (по подразбиране = 0.008), то настъпва отлепване на FRP материала.
- Fail (Разрушаване): Програмата съобщава за разрушение по модел, свързан с Граничното състояние по носеща способност .



### **Дуктилност (плащичност) при проверка по Гранично състояние по експлоатационни изисквания**

Разстоянието до неутралната ос се изчислява и се сравнява с максималната му стойност по ЕВРОКОД 2. Дава се отговор дали дуктилността отговаря на изискванията.

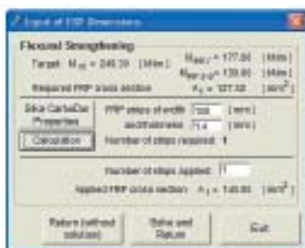
### **Гранично състояние по експлоатационни изисквания- Обособени товари ( $M_{ser,r}$ )**

- Depth of neutral axis (Разстояние до неутралната ос): разстоянието до неутралната ос в метри, отговарящо на момент  $M_{ser,r}$ .
- Top fibre strain (Деформация в най-горната част на напречното сечение): деформацията в най-горната част на натисковата зона на бетона, отговаряща на момент  $M_{ser,r}$ .
- Top steel strain (Деформация в горната армировка): деформацията в горната стоманена армировка, отговаряща на момент  $M_{ser,r}$ .
- Bottom steel strain (Деформация в долната армировка): деформацията в долната стоманена армировка, отговаряща на  $M_{ser,r}$ .
- Bottom fibre strain (Деформация в най-долната част на напречното сечение): деформацията в най-долната опънна зона на бетона, отговаряща на  $M_{ser,r}$ .
- FRP strain (Деформация във FRP материала): деформацията във FRP материала, отговаряща на  $M_{ser,r}$ .

### Гранично състояние по експлоатационни изисквания - Полезно натоварване ( $M_{ser,q-p}$ )

- Depth of neutral axis (Разстояние до неутралната ос): разстоянието до неутралната ос в метри, отговарящо на момент  $M_{ser,q-p}$ .
- Top fibre strain (Деформация в най-горната част на напречното сечение): деформацията в най-горната част на натисковата зона на бетона, отговаряща на момент  $M_{ser,q-p}$ .
- Top steel strain (Деформация в горната армировка): деформацията в горната стоманена армировка, отговаряща на момент  $M_{ser,q-p}$ .
- Bottom steel strain (Деформация в долната армировка): деформацията в долната стоманена армировка, отговаряща на  $M_{ser,q-p}$ .
- Bottom fibre strain (Деформация в най-долната част на бетона): деформацията в най-долната опънна зона на бетона, отговаряща на  $M_{ser,q-p}$ .
- FRP strain (Деформация в FRP материала) : деформацията във FRP материала, отговаряща на  $M_{ser,q-p}$ .

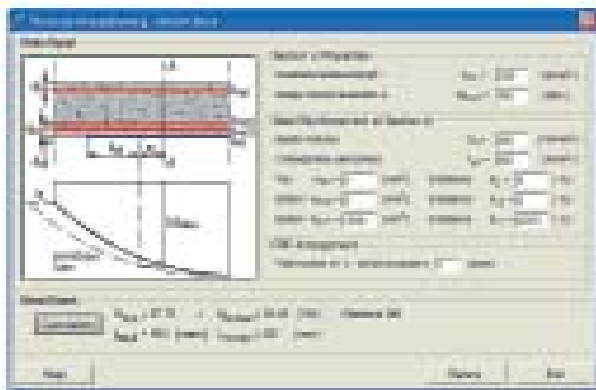
**Input of FRP dimentions** (Въвеждане на размерите на FRP материала): Отваря се прозорец, в който потребителят може да въведе размерите на FRP материала, който ще се използва за конкретния проект за усилване (широчина и дебелина в *mm*). Въвежданите стойности се отнасят за една лента. При натискане на бутонна „Sika CarboDur Properties“ се появяват характеристиките на различни CarboDur системи, които могат да се използват за консултация. Като се натисне „Calculation“ се изчислява броя на лентите и необходимото напречно сечение на FRP материала - окончателно сечение. Потребителят има възможността да оптимизира бройките ленти и да ги разположи по подходящ начин на съответните полета.



**Бутонът „Solve and return“:** Прозорецът „Results“ се активира с обновената информация, базирана на нововъведеното напречно сечение на FRP материала. Трябва да се отбележи, че всички стойности са обновени (например, ако изчислението се отнася за Гранично състояние по експлоатационни изисквания, то се обновяват и стойностите за Гранично състояние по носеща способност и обратно). Сега напречното сечение на FRP материала се нарича „applied“ - прилагано напречно сечение.

**Бутонът „Return (without solution)“** - (Обратно без решение): Прозорецът „Results“ се активира отново в положението си преди въвеждането на размерите на FRP материала.

**Bond check** (Проверка на залепването): Когато потребителят избере размери на напречното сечение на FRP материала и броя на необходимите ленти (n), този бутон активира прозорец, в който се извършва проверката на залепването.



### Характеристики на сечението

- **Substrate tensile strength  $f_{ctm}$** : Въведете средната стойност на якостта на опън на бетона близо до повърхността му (в  $N/mm^2$ ). Стойността по подразбиране се изчислява на базата на нормативната стойност на якостта на натиск. Обаче по-точни стойности може да се получат чрез методи на изпитване.
- **Design moment at section A  $M_{sd,A}$** : Въведете огъващия момент, който действа в напречно сечение A (в  $kNm$ ). Изчисленията дават необходимата дължина на залепване  $l_{bd}$ , която отговаря на това напречно сечение или с други думи, до какво разстояние от това сечение би следвало да се продължи разполагането на FRP материала, в добавка към хоризонталното разположение, следващо от диаграмата на огъващия момент.

### Стоманена армировка в сечение A

- **Elastic modulus  $E_s$**  (Еластичен модул): Въведете еластичния модул (в  $kN/mm^2$ ) на надлъжната стоманена армировка за напречно сечение A. Стойността по подразбиране е тази, която се използва за проверка на критичното напречно сечение.
- **Characteristic yield stress  $f_{yk}$**  (Нормативно напрежение на провлачване): Въведете нормативното напрежение на провлачване (в  $N/mm^2$ ) на надлъжната стоманена армировка за напречно сечение A. Стойността по подразбиране е същата, която се използва за проверка на критичното напречно сечение.

- **Top  $As_2$**  (Горен край): Въведете общата площ на напречното сечение на стоманената армировка в натисковата зона (ако има такава) на сечение  $A$  ( $\text{в } \text{mm}^2$ ). Стойността по подразбиране е същата, която се използва за проверка на критичното напречно сечение.
- **At distance  $d_2$**  (Разстояние): Въведете разстоянието от центъра на тежестта на  $As_2$  до най-крайната натискова точка от напречно сечение  $A$  ( $\text{в } m$ ). Стойността по подразбиране е същата, която се използва за проверка на критичното напречно сечение.
- **Bottom  $As_{12}$**  (Долна част): Въведете общата площ на напречното сечение на втория ред (ако има такъв) на стоманената армировка в опънната зона на сечение  $A$  ( $\text{в } \text{mm}^2$ ). Стойността по подразбиране е същата, която се използва за проверка на критичното напречно сечение.
- **At distance  $d_{12}$**  (Разстояние): Въведете разстоянието от центъра на тежестта на  $As_{12}$  до най-отдалечената опънна точка от напречното сечение  $A$  ( $\text{в } m$ ). Стойността по подразбиране е същата, която се използва за проверка на критичното напречно сечение.
- **Bottom  $As_{11}$**  (Долна част): Въведете площта на напречното сечение на първия ред стоманена армировка в опънната зона на сечение  $A$  ( $\text{в } \text{mm}^2$ ). Стойността по подразбиране е същата, която се използва за проверка на критичното напречно сечение.
- **At distance  $d_{11}$**  (Разстояние): Въведете разстоянието от центъра на тежестта на  $As_{12}$  до най-крайната опънна точка на напречно сечение  $A$  ( $\text{в } m$ ). Стойността по подразбиране е същата, която се използва за проверка на критичното напречно сечение.

### Подреждане на FRP материалите

**Общия брой  $n$  ивици е разположен в  $m$  пласта:** броят на ивиците  $n$  е изчислен от предишната операция. Въз основа на този брой потребителят определя броя на пластове на композитния материал FRP  $m$ . Например, ако са необходими общо две ленти и те не могат да бъдат подредени една до друга, те следва да бъдат поставени една върху друга, така че  $m = 2$ . Броят на пластове  $m$  тук трябва да бъде въведен от потребителя. Отбележете, че ако  $m$  е по-голямо от 1, общият брой на лентите, разделен на броя на пластове, трябва да бъде цяло число, така че лентите да могат да бъдат разпределени равномерно. Ако това условие не е изпълнено, програмата предупреждава със съобщение и следва да бъде направен нов избор на размери на FRP материала, така че  $n/m$  да е на цяло число.

### Изчисление

С натискане на „**Calculation**“ програмата изчислява общата опънна сила, която се понася от FRP материала в сечение  $A$ ,  $N_{fd,A}$ , съответната стойност на максималната сила  $N_{bd,max}$ , така че отлепването (разрушението в областта на анкерното укрепване) да не се състои, дължината на залепване  $l_{bd,max}$ , съответстваща на  $N_{bd,max}$  и ако проверката за залепване е ОК,

$(N_{fd,A} < N_{bd,max})$ , необходимата дължина на залепване на FRP материала за поемане на силата  $N_{fd,A}$ . Ако проверката за залепване не е ОК, то са налице следните възможности: потребителят може да увеличи напречното сечение на FRP материала (това решение не е най-походящото) и/или да използва механично закотвяне в краищата на FRP материала.

**Help:** Активира помощните функции.

**Return:** Активира прозореца за въвеждане на данни, ако е необходимо да се правят промени във входящата информация.

**Print:** Резултатите се отпечатват.

**Exit:** Излизане от програмата.

### 6.2.3. Усилване по отношение на срязване на елемента

#### ВЪВЕЖДАНЕ НА ДАННИ

Потребителят е необходимо да въведе входящата информация както е описано по-долу.

#### Метод на закотвяне

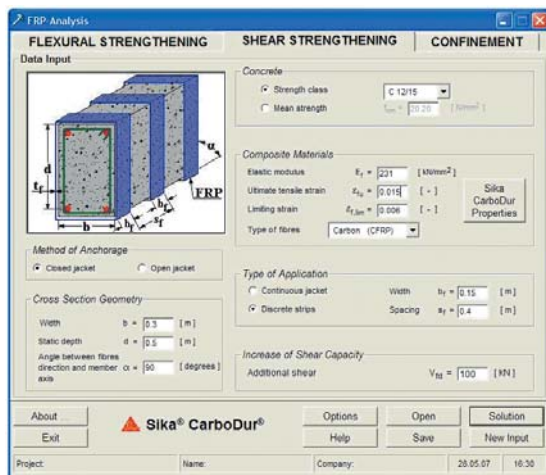
Избира се една от опциите „**Closed jacket**“ (затворена обшивка) или „**Open jacket**“ (отворена обшивка), което зависи от типа на използваната усилваща система. При усилването за срязване на колоните, където и четирите страни са достъпни, най-често се използва затвореният тип обшивки. При усилване по отношение на срязване на *T*-образни греди с механична закотвяща система, което дава максимална сигурност за FRP материала в натисковата зона, може да се приложи също така затворен тип обшивка. Такъв е случаят например с използването на Sika CarboShear елементи, ако е налице достатъчна дължина за закотвяне в плочата. Специално за тези елементи, ако дължината на закотвяне е по-малка от 300 mm, се препоръчва да се приеме решение, изчислено чрез линейна интерполация между резултатите, получени за случаите на „затворена обшивка“ и на „отворена обшивка“. Програмата извършва изчисление и за двата случая, като окончателните стойности за FRP материала се приемат чрез линейна интерполация. Също така може да се извърши консултация относно техническите данни и препоръки за този продукт.

#### Геометрия на напречното сечение

**Width *b*:** Въведете ширината в метри.

**Static depth *d*:** Въведете полезната височина, това е разстоянието от центъра на тежестта на опънатата стоманена армировка до най-крайната натискова точка на бетона в метри.

**Angle between fibres direction and member axis:** Въведете ъгъла (градусите), който се образува между направлението на основните нишки на FRP материала и оста на стоманобетонения елемент. В повечето случаи този ъгъл е 90 градуса.



### Бетон

Потребителят има възможността или да въведе нормативната якост на бетона според неговия клас, (ако е известна) или да въведе средна стойност за якостта в  $N/mm^2$ . Връзката между двата вида якостта е:  $f_{ck} = f_{cm} - 1.64 \times 5$ .

### Композитни материали

При натискане на бутон „Sika CarboDur Properties“ могат да се видят характеристиките на различни CarboDur системи с цел да се извърши консултация.

**Elastic modulus  $E_f$ :** Въведете еластичния модул на FRP материала в  $kN/mm^2$  (този модул се дава от производителя на материала).

**Ultimate tensile strain  $\epsilon_{fu}$**  (нормативна гранична опънна деформация): Въведете нормативната гранична опънна деформация (разрушителната деформация) на FRP материала (тази стойност е без дименсия!). Обикновено тази стойност се дава от производителя на материала.

**Limiting strain  $\epsilon_{f,lim}$**  (гранична деформация): Въведете граничната деформация на FRP материала (тази стойност е без дименсия). Ако тази стойност се надвиши, то може да се получат значителни пукнатини и следователно да се намали приноса на бетона при поемане на срязването, поради намаленото взаимодействие с инертния материал. Използва се стойност по подразбиране = 0.006.

**Type of fibres:** Избира се типа на нишките за композитния материал FRP. Този избор зависи от факторите за сигурност на материала.

### Тип на приложение на FRP материал

Избира се или непрекъсната **обшивка** или **обшивка от прекъснати ленти**. Във втория случай ширината на ленти и разстоянието между тях от ос до ос се въвежда в метри. Разстоянието между лентите трябва да е такова, че евентуалните пукнатини от срязване да пресичат поне една лента. Като общо правило се приема максимално разстояние между лентите от  $0.8 d$  (осо̀во).

### Повишаване на възможността за поемане на срязване

**Additional Shear  $V_{fd}$ :** Допълнителна срязваща сила. Въвежда се срязващата сила (в kN), която трябва да бъде понесена от композитния материал FRP.

### Команди

**Solution:** Програмата проверява за грешки във въвеждането и дава решение.

**New input:** Всички стойности на входящите данни могат да бъдат зададени отново чрез тази команда.

**Help:** Активират се помощните функции.

**Options:** Активират се опциите, описани в част 5.2.5.

**Save:** Съхраняват се всички входящи данни във файл.

**Open:** Отваря файла с данни, където се съхранява цялата входяща информация.

**About:** Отваря се прозорец за представяне на програмата.

**Exit:** Излизане от програмата.

### Ред за информация

Показана е следната информация: Проект; Име; Фирма; Дата; Време

Първите три елемента от данните се въвеждат от потребителя чрез „Options“ и „General“, докато последните два елемента, а именно датата и времето, автоматично се дават от програмата.

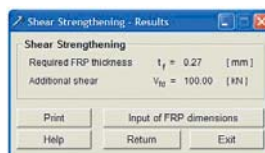
### \*\*\*Общи бележки\*\*\*

За всяко въвеждане на данни от потребителя програмата извършва проверка за валидността на стойностите (например дали не са прекалено големи или прекалено малки) и предупреждава при наличие на проблем. Програмата предупреждава също, ако потребителят въведе неправилни характеристики (например буква вместо цифра) или ако пропусне да попълни клетка. Правят се също така допълнителни проверки за валидността на комбинацията от стойности (например разстоянието между отделните ивици не може да бъде по-малко от тяхната ширина). При наличието на проблем програмата извежда предупреждение.

### РЕЗУЛТАТИ

След завършване на процеса на изчисление

във прозореца „Results“ се дават следните резултати:



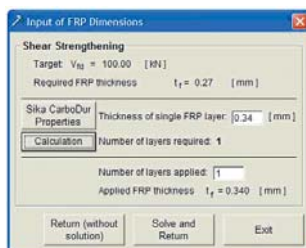


**Required FRP thickness  $t_f$ :** Необходима дебелина на FRP. Извежда се общата дебелина на обшивката от FRP материал.

**Additional shear  $V_{fd}$ :** Допълнителна срязваща сила. Това е стойността на силата, отнасяща се за обшивка от FRP материал с дебелина  $t_f$ . Трябва да се отбележи, че тези стойности могат да се различават от въведените от потребителя поради закръгляне на размерите.

### Команди

**Input of FRP dimentions** (въвеждане на размерите на FRP материала): Отваря се прозорец, където потребителят въвежда дебелината (в милиметри) на един пласт от FRP материала, който ще се използва в дадения проект за усилване. Чрез натискане на бутона „Sika CarboDur Properties“, свойствата на различни CarboDur системи могат да се видят с цел евентуална консултация. Чрез натискане на „Calculation“ се изчислява броя на необходимите пластове от FRP материала. Потребителят има възможност да оптимизира броя на пластове като въведе подходящ брой пластове, разположени в съответната област.



**Solve and return:** Прозорецът „Results“ се отваря с обновената информация, базирана на новата дебелина на FRP материала. Трябва да се отбележи, че сега дебелината на FRP материала се нарича “applied” - „прилагана дебелина“.

**Return (without solution):** Отваря се прозорецът „Results“ във вида си преди въвеждане на размери за FRP материала.

**Help:** Активират се помощните функции.

**Return:** Отваря се прозорец за въвеждане на данни, където могат да бъдат направени промени във входящата информация.

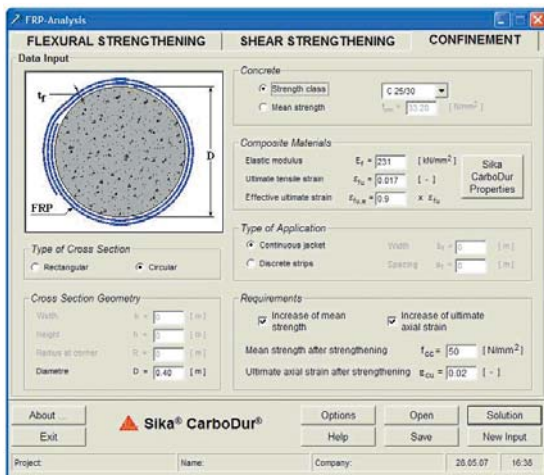
**Print:** Резултатите се отпечатват.

**Exit:** Излизане от програмата.

## 6.2.4 Обвиване с FRP материал

### ВЪВЕЖДАНЕ НА ДАННИ

Необходимо е потребителят да въведе входящата информация, както е описано по-голу.



### Тип на напречното сечение

Опцията „Rectangular“ се избира за правоъгълни напречни сечения, докато „Circular“ се избира за кръгли напречни сечения.

### Геометрия на напречното сечение

**Width  $b$ :** Въвежда се ширината в метри (за правоъгълно напречно сечение).

**Height  $h$ :** Въвежда се височината в метри (за правоъгълно напречно сечение).

**Radius at corner  $R$ :** Въвежда се радиуса на закръгляне в ъглите на напречното сечение в метри (за правоъгълно напречно сечение).

**Diametre  $D$ :** Въвежда се диаметъра в метри (за кръгло напречно сечение).

### Бетон

Потребителят има възможност да избере или **нормативната якост на бетона** (ако е известна) или да въведе **средна стойност за якостта** в  $N/mm^2$ .

Връзката между двете якости се дава с уравнението  $f_{ck} = f_{cm} - 1.64 \times s$ .

### Композитни материали

При натискане на бутона „Sika CarboDur Properties“ свойствата на различни CarboDur системи могат да се видят с цел извършване на консултация.

**Elastic modulus  $E_f$ :** Въвежда се еластичния модул  $E_f$  на FRP материала в  $kN/mm^2$  (обикновено се дава от производителя на материала).

**Ultimate tensile strain  $\varepsilon_{fu}$**  (Гранична деформация на опън): Въвежда се граничната деформация на опън (деформация при разрушаване) на FRP материала (тази стойност е без дименсия!). Обикновено тази стойност се дава от производителя на материала.

**Effective ultimate strain  $\varepsilon_{fu,e}$**  (Действителна гранична деформация): Въвежда се редукиционния фактор (по подразбиране = 0.9), който умножен с граничната деформация на опън на FRP материала дава действителната гранична деформация в кръгово направление. Тази редукция се извършва поради многопосочното разпределение на напреженията в FRP материала и различното качество на изпълнение.

### Тип на приложение на FRP материала

Избира се или непрекъснатата обвивка или обвивка от ивици през разстояние. Във втория случай ширината на ивиците и разстоянието между тях от ос до ос се въвежда в метри. Ако потребителят избере да обвие правоъгълно напречно сечение с прекъснати ивици от FRP материал, програмата дава предупреждение. В този случай ефективността на обвиването е ограничена и следователно не се препоръчва.

### Изисквания

Потребителят има възможност да избере между следните възможности:

- (а) повишаване на якостта на бетона от  $f_{co}$  ( $=f_{cm}$ ) до  $f_{cc}$  или
- (б) повишаване на граничната деформация на бетона до стойност  $\varepsilon_{cu}$  или и двата варианта заедно.

**Mean strength after strengthening  $f_{cc}$**  (Средно съпротивление на бетона след усилването): Въведете съпротивлението на покрития с FRP материал бетон (желаната стойност след усилването) в  $N/mm^2$ .

**Ultimate axial strain after strengthening  $\varepsilon_{cu}$**  (Гранична осова деформация след усилването): Въведете граничната осова деформация на обвития с FRP материал бетон (желаната стойност след усилване), изразена като бездимензионна величина.

### Команди

**Solution:** Програмата проверява за грешки при въвеждането и дава решения.

**New input:** Всички входящи данни могат да бъдат въведени отначало с тази команда.

**Help:** Активира се помощната функция.

**Options:** Активират се опциите, описани в част 5.2.5.

**Save:** Съхранява входящата информация във файл.

**Open:** Отваря файла с данните, където се съхранява входящата информация.

**About:** Отваря се прозорец, който представя програмата.

**Exit:** Излизане от програмата.

### Информационен рег

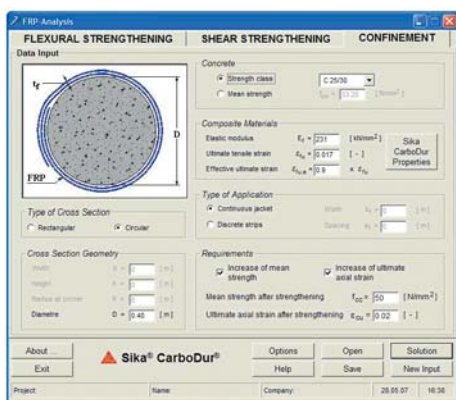
Показва се следната информация: Проект; Име; Фирма; Дата; Време  
Първите три елемента от данните се въвеждат от потребителя чрез „Options“ и „General“, докато последните два елемента, а именно датата и времето автоматично се дават от програмата.

### \*\*\*Общи бележки\*\*\*

За всяко въвеждане на данни от потребителя програмата извършва проверка за валидността на стойностите (например дали не са прекалено големи или прекалено малки) и предупреждава при наличие на проблем. Програмата предупреждава също така, ако потребителят въведе неправилни характеристики (например буква вместо цифра) или ако пропусне да попълни клетка. Правят се допълнителни проверки от програмата за валидността на комбинацията от стойности (например радиусът на закръляване на ъелите на правоъгълно напречно сечение не може да бъде по-голям от половината дължина на по-малката страна на сечението). При наличието на проблем програмата извежда предупреждение.

### РЕЗУЛТАТИ

След като завърши процесът на изчисление се показва следният прозорец:



**Required FRP thickness  $t_f$ :** (Необходимата дебелина на FRP материал): Извежда се общата дебелина на FRP обшивката.

**Mean strength after strengthening  $f_{cc}$ :** Това е стойността на съпротивлението на обвития с FRP материал бетон, която съответства на FRP обшивка с дебелина  $t_f$ . **Забележете, че** тази стойност може леко да се различава от въведената от потребителя поради: (а) закръляване на стойностите (в този случай се получават само малки различия); (б) избрана е опцията „Гранична осова деформация след усилване“ и дебелината на FRP материала е определена според това изискване (тъй като за да се удовлетворят изискванията по отношение на деформацията се изисква по-голяма дебелина на FRP материала, отколкото по отношение на якостта).

**Ultimate axial strain after strengthening  $\varepsilon_{cu}$** : Това е стойността на граничната осова деформация на обвития с FRP материал бетон, която съответства на FRP обшивка с дебелина  $t_f$ . **Забележете, че** тази стойност може леко да се различава от стойността, въведена от потребителя поради: (а) закръгляване на стойностите (в този случай се получават само леки изменения); (б) избрана е опцията „Средна якост след усилване“ и дебелината на FRP материала е изчислена според това изискване (тъй като за да се удовлетворят изискванията по отношение на якостта се изисква по-голяма дебелина на FRP материала, отколкото по отношение на деформацията).

### Команди

**Input of FRP dimentions** (Въведете размерите на FRP материала): отваря се прозорец, където потребителят въвежда дебелината в милиметри на един пласт от FRP материала, който ще се използва за дадения проект за усилване. Чрез натискане на бутона „Sika CarboDur Properties“, свойствата на различни CarboDur системи се показват с цел извършване на консултация. Потребителят има възможност да промени броя на пластове, така че да се получи подходящ брой пластове, разположени на съответните полета.

**Solve and Return:** Прозорецът „Results“ се активира с обновената информация, базирана на новата дебелина на FRP материала. **Отбележете, че** дебелината на FRP материала сега се нарича „applied“ - приложена дебелина.

**Return (without solution):** Отваря се прозорецът „Results“ във вида си преди въвеждането на размерите на FRP материала.

**Help:** Активират се помощните функции.

**Return:** Отваря се прозорец за въвеждане на данни, където могат да бъдат направени промени във входящата информация.

**Print:** Резултатите се отпечатват.

**Exit:** Излизане от програмата.

### 6.2.5 Опции

#### Общи положения

С опцията „General“ опция могат да се видят имената на потребителя, фирмата и проекта. Потребителят може да избере дали да въведе тези подробности при отпечатването на резултатите или не.

#### Отпечатване/Усилване при огъване

Опцията „Print Options“ включва „Print Setup“ (типа на принтера, характеристиките на печата, необходимата хартия и т.н.) и „Fonts“ (шрифт, стил, размер на буквите и цифрите), които могат да бъдат избрани при отпечатването. „Flexural Strengthening“ (Усилване при огъване) : Ако се отбележи клетката „Изчисление само при избран модел на разрушение“ (препоръчва се) програмата ще даде резултат (при проверка по Гранично състояние по носеща способност) само ако, единият от двата възможни модела на разрушение е активиран (проблячване на стоманата + смачкване на бетона или проблячване на стоманата + достигане гранична деформация на FRP материала). Ако това не е възможно

но, програмата предупреждава потребителя, че напречното сечение е свърхармирано. Ако клетката „Изчисление само при избран модел на разрушение“ не е отбелязана, програмата ще извърши изчислението, без да вземе под внимание модела на разрушение (който може да бъде поради смачкване на бетона, без провлачване на опънната стоманена армировка).



### **Коефициенти на сигурност за FRP материала**

Тези коефициенти са описани в част 5.1.2. Стойностите по погрозбяване, които са дадени тук могат да се променят от потребителите.

#### **6.2.6. Отпечатване**

Отпечатването, както на входящите данни, така и на резултатите от изчисленията се получава чрез прозореца „Results“. Като се използва прозореца „Options“ потребителят може да избере опцията отпечатване, да определи характеристиките на отпечатването и видовете шрифтове.

При отпечатването се съдържа следната информация независимо от вида на приложеното усилване (за огъване, за срязване или при обвивка с FRP материал):

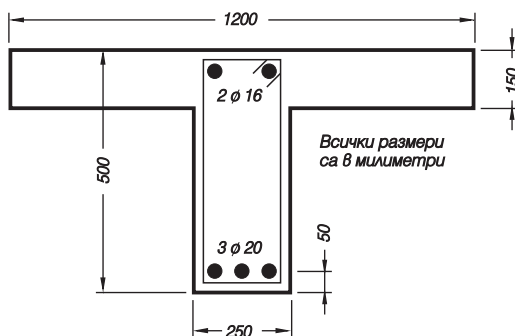
- (а) име на потребителя и на проекта, дата и време (по желание);
- (б) тип на усилването;
- (в) тип и геометрия на напречното сечение;
- (г) свойства на материала (бетон, стомана и композитни материали);
- (д) тип на приложение на FRP материала;
- (е) изисквания, на които приложеното усилване трябва да отговаря;
- (ж) необходимите размери на FRP материалите (площ на напречното сечение или дебелина);

В случаите на усилване по отношение на огъването се отпечатват стойностите на момента, който може да се поеме, съответстващи на всяко гранично състояние, напреженията в бетона и стоманата (съответстващи на Гранично състояние по експлоатационни изисквания), както и избрания модел, по който става разрушението. Освен това се дава информация за диаграмата на деформациите „cross section strain profile“ на напречното сечение за всяко гранично състояние, ако потребителят е избрал такава опция при въвеждане на данните. Накрая, ако потребителят избере опцията „Input of FRP dimentions“ - „въвеждане на размерите на FRP материала“, приложените размери на FRP материала, както и броя на лентите и пластове също се отпечатва, както и ако е направена проверка за залепване „Bond check“, съответните резултати също подлежат на печат.

## 7. ПРИМЕРИ ЗА ИЗПОЛЗУВАНЕ НА ПРОГРАМАТА ЗА ИЗЧИСЛЕНИЕ НА CARBODUR FRP МАТЕРИАЛИТЕ - КОМПОЗИТНИ МАТЕРИАЛИ ЗА УСИЛВАНЕ НА СТРОИТЕЛНИ КОНСТРУКЦИИ, БАЗИРАНИ НА ПОЛИМЕРНИ НИШКИ

### 7.1. Пример за усилване по отношение на огъване

Нека разгледаме 5-метрова стоманобетонова проста греда, детайл на която е показан на фиг. 6.1. Гредата е оразмерена за постоянно натоварване от  $q_d = 15 \text{ kN/m}$  и подвижно натоварване от  $q_d = 30 \text{ kN/m}$ . Усилването се прави с цел да се увеличи носимоспособността на елемента до  $70 \text{ kN/m}$  подвижно натоварване (Бетон C20/25, Стомана S500). Приемаме листове от FRP материал с  $1.2 \text{ mm}$  дебелина и  $80 \text{ mm}$  ширина и с еластичен модул  $E_f = 165 \text{ GPa}$  (Sika CarboDur S812).



Фиг. 6.1. Оразмерено напречно сечение на Т-образна греда.

#### Решение

От **фиг. 6.1.** изчисляваме:  $A_s = 940 \text{ mm}^2$ ,  $A_s' = 400 \text{ mm}^2$ ,  $H = 500 \text{ mm}$ ,  $d = 450 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 40 \text{ mm}$ .

Огъващият момент по време на усилването ( $M_o$ ) е:  $M_o = wL^2 / 8 = 15 \times 5^2 / 8 = 46.9 \text{ kNm}$ . След като решим уравнения 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 и 5.1.4, получаваме:  $\varepsilon_{co} = 0.00012$ ,  $x_o = 76 \text{ mm}$ . След това от уравнение 5.1.7 изчисляваме  $\varepsilon_o = 0.00067$ .

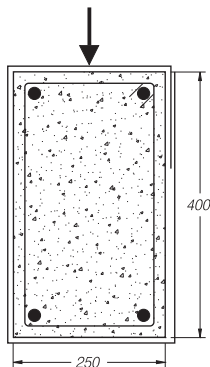
Необходимият проектен момент след усилването ( $M_{Rd}$ ) е:  $M_{Rd} \geq 85 \times 5^2 / 8 = 265 \text{ kNm}$ . Първоначално приемаме, че FRP материалът ще достигне граничната си деформация  $\varepsilon_{f,lim}$ , т.е.  $\varepsilon_f = 0.008$ . Като решим уравнения 5.1.8, 5.1.9, 5.1.10 и 5.1.11, определяме неизвестните  $\varepsilon_c = 0.00150$ ,  $x = 74 \text{ mm}$  и  $A_f = 148.87 \text{ mm}^2$ .

Следователно, за тази схема на усилване ние се нуждаем от FRP материал с обща ширина  $148.87 / 1.2 = 124.06 \text{ mm}$ . Избираме 2 листа материал с ширина на всеки от тях от  $80 \text{ mm}$ . Оттук следва  $A_f = 2 \times 80 \times 1.2 = 192 \text{ mm}^2 > 148.87 \text{ mm}^2$ .

**Забележка:** Първоначалната предпоставка, че материалът достига граничната си деформация (преди смачкването на бетона) не противоречи на резултатите от извършените анализи. Следователно не е необходимо да се извършват изчисления за модел на разрушение, който се характеризира със смачкване на бетона ( $\varepsilon_c = 0.0035$  и  $\varepsilon_f < 0.008$ ).

### 7.2. Пример за усилване на срязване

Да разгледаме правоъгълната стоманобетонова колона,  $250 \times 400 \text{ mm}$  показана на **фиг. 6.2.**, при якост на бетона  $18 \text{ MPa}$ . Колоната е натоварена с допълнителна срязваща сила от  $135 \text{ kN}$ . Приемаме CFRP тъкан с еластичен модул  $E_f = 230 \text{ GPa}$ , гранична опънна деформация  $\varepsilon_{fu} = 0.017$  и дебелина  $t_f = 0.12 \text{ mm}$  (SikaWrap 230C).



**Фиг. 6.2.** Напречно сечение на правоъгълна колона

#### Решение

Нека приемем тъкан от 2 пласта:  $t_f = 2 \times 0.12 = 0.24 \text{ mm}$   
 $\rho_f = 2 \times 0.24 / 250 = 0.0019$

От уравнение 5.1.19а изчисляваме:

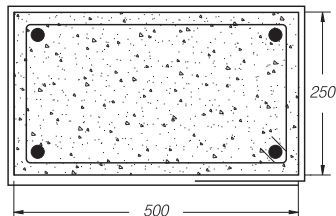
- $[0.8 \times 0.17 \times 0.017 \times (18/230 \times 0.0019)]/1.2 = 0.0053$
- $(0.006/1.25) = 0.0048$

Оттук следва, че е  $f_{d,e} = 0.0048$

След това от уравнение 5.1.18 имаме:  $V_{fd} = 174.43 \text{ kN} > 135 \text{ kN}$ .

### 7.3. Пример за обвиване на елемент

Нека да разгледаме стоманобетоновото напречно сечение  $250 \times 500 \text{ mm}$ , показано на **фиг. 6.3.**, при якост на бетона  $f_{co} = 20 \text{ MPa}$  и еластичен модул  $E_{co} = 27 \text{ GPa}$ .



**Фиг. 6.3** Напречно сечение на правоъгълен елемент



Приемаме, че за обвиването на елемента ще използваме тъкани от два различни материала: а) FRP материал със стъклена нишка и еластичен модул  $E_{fib} = 76 \text{ GPa}$ ,  $f_{fk} = 2300 \text{ MPa}$ ,  $\varepsilon_{fu} = 0.028$  и дебелина  $t_f = 017 \text{ mm}$  (SikaWrap 430G) и б) FRP материал на въглеродна основа с еластичен модул  $E_{fib} = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_{fk} = 4100 \text{ MPa}$ ,  $\varepsilon_{fu} = 0.017$  и  $t_f = 0.12 \text{ mm}$  (SikaWrap 230C). Също така приемаме намаление на якостта на срязване с 5% по отношение на характеристикната опънна якост на нишките.

Изисквания: 1) да се увеличи средната якост  $f_{cc}$  до  $35 \text{ MPa}$  и 2) да се увеличи граничната осова деформация (от 0.0035 - 0.004 при бетон без обвиване с FRP материал), до 0.025.

### Решение

Проектното опънно напрежение е

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_f} \frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}}, \text{ където отношението } \frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}} \text{ обикновено е равно на 1, като дей-}$$

ствителната гранична деформация на FRP материала  $\varepsilon_{fue}$ , която се очаква да се появи при реални работни условия, няма съществено да се различава от средната стойност  $\varepsilon_{fum}$  на деформацията, получена при изпитване с едностранно опънно натоварване. Някои евентуални малки вариации в стойностите се поемат от коефициента на сигурност  $\gamma_f$  на FRP материала.

Следователно за GFRP материала имаме:  $f_{fd} = 0.95 \times (2300/1.5) \times 1 = 1457 \text{ MPa}$

За CFRP материала съответно получаваме:  $f_{fd} = 0.95 \times (4100/1.35) \times 1 = 2885 \text{ MPa}$

Като приемем радиус на закръгляне на ъглите на правоъгълното напречно сечение равен на  $2 \text{ cm}$ , брутно напречно сечение на бетона  $A_g = 1246.5$ , от уравнение 5.1.30 определяме коефициента на ефективност на обвиването = 0.32.

Като заместим горните стойности в уравнения от 5.1.22 до 5.1.29 можем да изчислим следните величини:

$$F_{cc} = 35 \text{ MPa}$$

GFRP материал: Търсената дебелина на FRP материала е равна на  $t_f = 0.75$ , следователно избираме 5 пласта тъкан.

CFRP материал: Търсената дебелина на FRP материала е равна на  $t_f = 0.41$ , следователно избираме 4 пласта тъкан.

$$\varepsilon_{cu} = 0.025$$

GFRP материал: Търсената дебелина на FRP материала  $t_f = 0.08$ , следователно избираме 1 пласт тъкан.

CFRP материал: Търсената дебелина на FRP материала  $t_f = 0.18$ , следователно избираме 2 пласта тъкан.

**Забележка:** От горните резултати става ясно, че за да се увеличи якостта, при употребата на CFRP тъканта са необходими по-малко на брой пластове, отколкото при GFRP материалите. И обратно, за да се увеличи устойчивостта на деформации чрез прилагане на GFRP тъкани, са необходими по-малко на брой пластове, отколкото при прилагане на CFRP материала.

## 8. ПОДРОБНИ ИНСТРУКЦИИ ЗА ПРИЛАГАНЕ НА CARBODUR FRP МАТЕРИАЛИТЕ - КОМПОЗИТНИ МАТЕРИАЛИ ЗА УСИЛВАНЕ НА СТРОИТЕЛНИ КОНСТРУКЦИИ, БАЗИРАНИ НА ПОЛИМЕРНИ НИШКИ

### 8.1. Увеличаване якостта на огъване

Усилването по отношение на огъване се постига чрез:

- Използване на CFRP ламели, или
  - Гъвкави материали (тъкани), поставени по направление на оста на елемента
- Залепването на тези тъкани и вътвърдяването на свързващото вещество се извършват на място, като тъканта се поставя върху повърхностите от опънатата зона на елемента (например при прости греди залепването става върху долната повърхност на гредата, а при греди над вътрешни опори - върху горната част).

В зоната на закомбяване не е необходима допълнителна напречна армировка, при условие, че е осигурена адекватна дължина на закомбяването, като отлепването на тъканта се възпрепятства от опънните напрежения в бетона.

#### 8.1.1. Препоръки

- Максималното разстояние  $s$ , между успоредните ламели или тъкани трябва да бъде  $= \min(0.2l, 5h, 0.4l_c)$  където  $l$  = ширината на отвора,  $h$  = общата дебелина,  $l_c$  = дължината на конзолата.
- Минималното разстояние до края на гредата трябва да бъде = на бетоновото покритие на съществуващата армировка.
- Препоръчително е снаждането на FRP материалите, да се избягва, където това е възможно. В действителност то не е необходимо, тъй като FRP материалите се оставят с дължини, отговарящи на изискванията от конкретния случай. Съединяване се допуска само в случаите на оразмеряване единствено на статичен товар и то на местата, където максималната сила на опън в FRP не превишава 60% от пределната сила на опън.
- Кръстосване на ламелите се допуска, ако се приложи едновременно залепване в зоната на кръстосването.
- Нежеланото отлепване на FRP материала се избягва чрез ограничаване на неравностите по повърхността на бетона. Допустимите стойности на неравностите при предварително изготвени ламели и гъвкави тъкани са дадени в таблица 7.1.

Тип на FRP материала	Допустими неравности при основа от 2.0m (mm)	Допустими неравности при основа от 3.0 m (mm)
Предварително изготвени ламели	10	4
Гъвкави тъкани	4	2

Табл. 7.1 Допустими стойности на неравностите по бетоновата повърхност

### 8.1.2. Многослойно изпълнение на усилването от FRP материали

- За предварително изготвени ламели се препоръчва изпълнение най-много в 3 пласта.
- За гъвкави тъкани, които се монтират по направление на оста на елемента, максималният брой на пластове е  $e = 5$ .
- При предварително напрегнати ламели, разположени в няколко пласта се получава намаление на предварителното налягане поради последователно освобождаване на налягащата сила.

### 8.1.3. Област на анкерно укрепване

- В случаите на укрепване на прости греди разстоянието от края на ламелата до опората трябва да бъде по-малко от 50мм.
- В случаите на усилване на непрекъснати греди или плочи над опорите FRP материалът е необходимо да се закотви в натисковата зона.
- При надлъжно усилване с FRP материал закотвянето може да се извърши с употребата на гъвкави тъкани или предварително изготвени L-образни ламели (Фиг.7.1.). Тези анкери се прилагат под формата на външни стремена, като действието им не се взема предвид при оразмеряването на срязване. Те обаче способстват да се предотврати нежелателното преждевременно отлепване на усилващия материал.



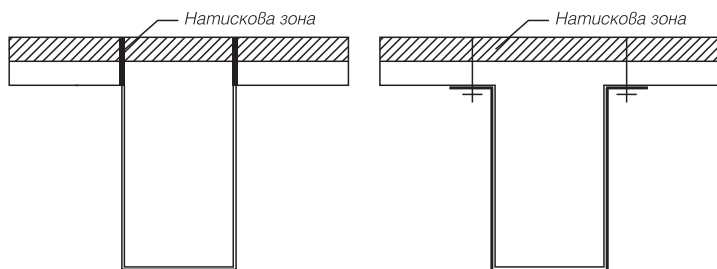
Фиг.7.1 Закотвяне на надлъжно положеня FRP материал чрез предварително изготвени L -образни ламели с въглеродни нишки.

## 8.2. Усилване по отношение на срязване

Усилването на срязване може да се извърши по следните начини:

- Чрез използване на предварително изготвени CFRP L-образни ламели, или
- Чрез гъвкави тъкани, които се полагат по направление на една или две оси на елемента.

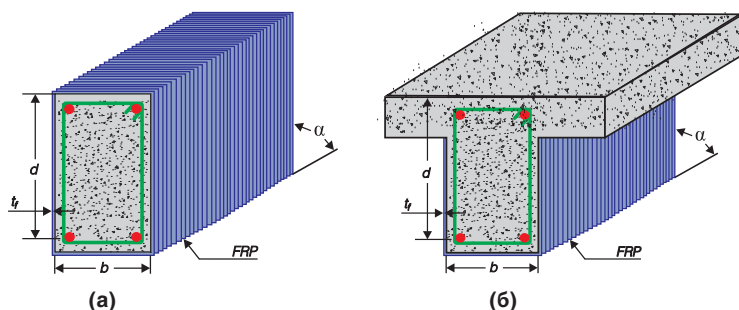
Основно изискване за успешното прилагане на тези техники на укрепване е осигуряването на адекватно закотвяне, както при използването на тъкани, така и при ламели. Правилното закотвяне може да се осъществи чрез пълно обвиване на елемента или чрез използване на система, чието закотвяне се извършва в натисковата зона, така както е показано на Фиг.7.2.



Фиг. 7.2 Закотвяне, извършено в натисковата зона

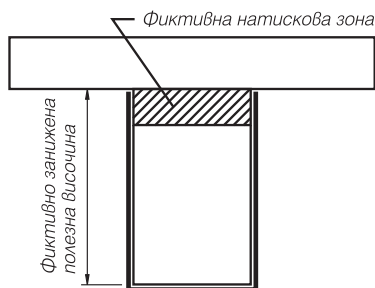
### 8.2.1. Препоръки

Външното усилване на срязване с FRP материали може да се осъществи с покритие върху четирите страни на елемента (пълно обвиване), с покритие на трите страни на елемента (U-образно обвиване) (Фиг. 7.3а, 7.3б) и в някои случаи с покритие само на двете страни (прегварително изготвени листове).

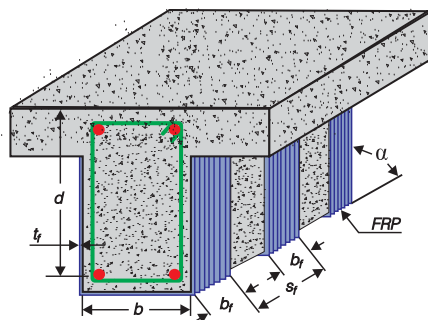


Фиг. 7.3 Усилване по отношение на срязване върху (а) четири и (б) три страни на елемента чрез използване на FRP тъкани

- За постигане на максимален ефект от укрепването там, където е практически възможно се използва цялата височина на натисковата зона.
- Употребата на листове по вертикалните страни на гредите не се препоръчва, тъй като областта на анкерно укрепване не е достатъчна, както в опънатата, така и в натисковата зона.
- В случаите, в които областта на анкерно укрепване в натисковата зона е недостатъчно, полезната височина на напречното сечение при изчислението следва да бъде изкуствено занижена, с цел да се получи фиктивно по-малко гранично съпротивление на огъване на елемента (Фиг.7.4).
- Ефективното действие на FRP материала се увеличава когато направлението на нишките е перпендикулярно на диагоналните пукнатини от срязване.
- В случаите, в които се използват прекъснати ленти с малка ширина (Фиг.7.5), максималното разстояние  $s_f$  между лентите трябва да е равно на  $0.8d$ .



Фиг. 7.4 Без закомване: занижава се полезната височина на сечението при съпротивлението на огъване.



Фиг. 7.5 Усилване по отношение на срязване чрез ивици през разстояние.

### 8.3. Обвиване на елемента

Обвиването с FRP материал обикновено се прилага при елементи, подложени на натиск, като се използват кръгово разположени гъвкава тъкани.

#### 8.3.1. Препоръки

- Острите ъгли на напречното сечение на правоъгълни колони трябва да се закръглят с радиус минимум  $10\text{ mm}$  с цел да се избегне концентрацията на напрежения в тъканта.
- Ефективно обвиване на елемента може да се постигне както с прилагане на FRP материали с хоризонтално разположени, така и със спирално разположени нишки.
- Максималният брой на пластове, които могат да се наслагат един върху друг е  $e = 20-25$

- При елементи с правоъгълна форма, при които отношението между дължините на дългата и късата страна е с голяма стойност (например при стълбове, междинни опори), обвивките от FRP материали е необходимо да се закрепват с дюбели или болтове с цел да се постигне ефективно обвиване.
- В случаите, в които елементът е натоварен с ексцентричен товар с голяма стойност, се прилагат FRP материали с надлъжно разположение на нишките. Препоръчително е да се осигури правилно подходящо закомвяне.
- Когато се извършва усилване на колони, допълнителното съпротивление на огъване в областта на пластичните стави, предизвикано от обвиването с FRP материал може да предизвика нежелани момент и срязващи сили в областта на фундаментите и горните греди. Затова е необходимо да се остави 30-50 мм разстояние между колоната и съответно повърхността на фундамента или горната греда.

#### **8.4. Препоръки при работа във влажна среда**

В общия случай, когато строителните конструкции са разположени в изключително влажна среда или са в директен контакт с вода (например части от пристанищни съоръжения, мостове и язовири), пълното обвиване на конструктивните елементи трябва да се избягва. Обаче при суха околна среда с ниска влажност (например във вътрешността на сгради) цялата повърхност на елементите може да бъде обвита. При всички други случаи са необходими специални предварителни проучвания.

Както вече е отбелязано в 4.7.7, с цел да се избегне просмукването на влага вътре в бетоновите елементи трябва да се спазват следните препоръки:

##### **8.4.1. Препоръки**

- В случаите на усилване по отношение на огъване следва да се оставя малко разстояние между ламелите или тъканите при разполагането им.
- В случаите на усилване по отношение на срязване трябва да се оставя малко разстояние на всеки 300 *mm*.
- В случаите, когато е необходимо да се оставят разстояния между ламелите или тъканите, с цел да се избегне допълнително натоварване на огъване в областта на пластичните стави, тези места следва да бъдат покрити със смеси от епоксидни смоли за да се предотврати просмукването на вода между FRP материала и бетоновата повърхност .

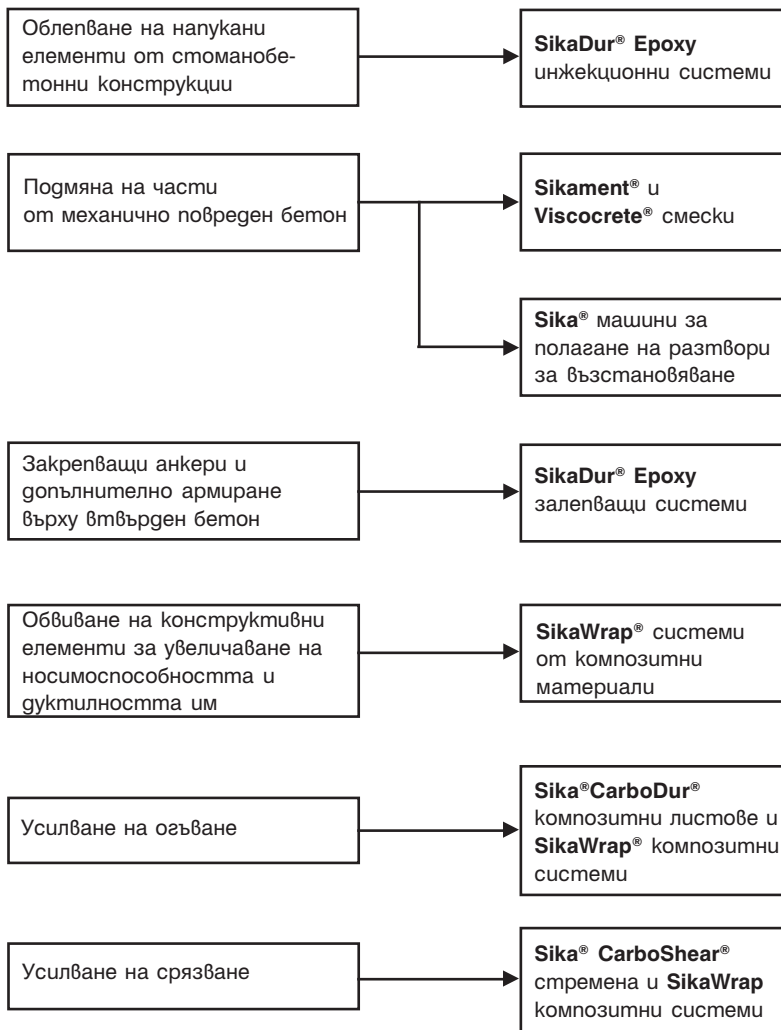
## 9. Sika СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ

### 9.1. Sika технологиите в действие

В следващия инфомационен лист е дадено решение за използването на Sika продуктите за всички случаи на усилване на различни строителни конструкции.

#### Конструктивни изисквания

#### Решения чрез Sika системите



## 9.2. CarboDur FRP системи на базата на полимерни композити, усилен с нишки

През 1994г. Sika въвежда композитните материали FRP в областта на усиляването на строителните конструкции. Съществуват три различни системи в продуктовата гама:

- Sika CarboDur системи
- SikaWrap системи
- Sika CarboShear L системи

Преглед на всичките системи е даден по-долу.

### 9.2.1. Sika CarboDur системи

Sika CarboDur системите се състоят от фабрично изработени ламели на въглеродна основа, които се залепват към повърхността на строителните елементи на място чрез използването на Sikadur 30 конструктивно лепило на епоксидна основа. CarboDur ламелите се произвеждат в номенклатура от различни ширини и дебелини (таблица 8.1) и съответно с четири различни еластични модула, S (XS), M, H и UH (фиг. 8.1 и 8.2).

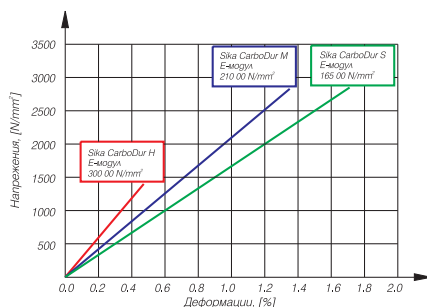
Sika®CarboDur®	Широчина (mm)	Дебелина (mm)	Площ на напречно сечение (mm <sup>2</sup> )
XS514	50	1.4	70
XS1014	100	1.4	140
XS1214	120	1.4	168
S512	50	1.2	60
S612	60	1.2	72
S812	80	1.2	96
S1012	100	1.2	120
S1212	120	1.2	144
S1512	150	1.2	180
S614	60	1.4	84
S914	90	1.4	126
S1014	100	1.4	140
S1214	120	1.4	168
M514	50	1.4	70
M614	60	1.4	84
M914	90	1.4	126
M1014	100	1.4	140
M1214	120	1.4	168
H514	50	1.4	70
UH514	50	1.4	70

Таблица 8.1 Типове Sika CarboDur ламели



	Sika CarboDur Plate				
	Tun XS	Tun S	Tun M	Tun H	Tun UH
Еластичен модул ( $kN/mm^2$ )	165	165	210	300	400
Якост на опън ( $N/mm^2$ )	>2200	>2800	>2800	>1300	>1800
Деформация при разрушение (%)	>1.35	>1.7	>1.35	>0.45	>0.45

Фиг.8.1 Механични свойства на Sika CarboDur ламелите



Фиг. 8.2 Диаграма на отношението напрежения - деформации за Sika CarboDur ламелите S, M и H.

Едно от предимствата на Sika CarboDur ламелите е, че те могат да се напрягат предварително преди залепването им. Това намалява риска от отлепване на ламелите, причинено от деформацията на бетона при срязване в опънната зона, като по този начин увеличават сигурността на конструкцията. Предварително налягащата сила в ламелите намалява напреженията във вътрешната стоманена армировка на конструкцията, както и деформацията и ширината на пукнатините.

### 9.2.2. SikaWrap системи

SikaWrap системите се състоят от гъвкави тъкани, които се изпълняват на слоеве и които се залепват към повърхността на конструкциите на място на строителната площадка, като се използват Sikadur конструктивни епоксидни смоли.

SikaWrap системите могат да се прилагат по два различни метода в зависимост от изискванията на клиента и условията на строителната площадка. Тези методи са известни съответно като „мокр“ и „сух“:

- При **мокрят метод**, SikaWrap тъканта се импрегнира ръчно или в сатурационна машина със Sikadur-300 епоксидна смола (фиг. 8.3) и след това се полага „мокра“ върху основата.

- При **сухия метод**, сухата SikaWrap тъкан се слага направо върху Sikadur-330 смола, която предварително е положена равномерно върху бетоновата повърхност.

Както „сухия“ така и „мокрят“ метод се прилагат с еднакъв успех на строителната площадка. SikaWrap тъканите се произвеждат на базата на въглеродни или стъклени нишки, разположени в едно или две направления. Асортиментът на SikaWrap тъканите е показан в таблица 8.2



Фиг. 8.3 Сатурационна машина за SikaWrap „мокр“ метод.

SikaWrap® тъкани	Обемно тегло (g/m <sup>2</sup> )	Еластичен модул при опън (kN/mm <sup>2</sup> )	Съпротивление на опън (N/mm <sup>2</sup> )	Деформация при скъсване на нишките (%)	Номинална дебелина (mm)	Метод
------------------	----------------------------------	--	--	--	-------------------------	-------

**Тъкани на базата на стъклени нишки**

100G	935	76	2300	2.8	0.36	Мокър
107G	955	76	2300	2.8	0.35	Мокър

**Тъкани на базата на арамидни нишки**

300A	300	100	2880	2.8	0.21	Сух/Мокър
450A	450	100	2880	2.8	0.31	Мокър

**Тъкани на базата на въглеродни нишки**

103C	610	230	3900	1.5	0.34	Мокър
160C0/90	160	230	3800	1.5	0.045	Сух
200C	200	230	3900	1.5	0.11	Сух
Hex230C	220	231	4100	1.7	0.12	Сух
300C	300	230	3900	1.5	0.17	Сух/Мокър
201C	200	230	4900	2.1	0.11	Сух
231C	230	230	4900	2.1	0.13	Сух
301C	300	230	4900	2.1	0.17	Сух/Мокър
200C NW	200	230	3900	1.5	0.11	Мокър
300C NW	300	230	3900	1.5	0.17	Мокра
300C HiModNW	300	640	2600	0.4	0.14	Мокър
400C HiModNW	400	640	2600	0.4	0.19	Мокър

Таблица 8.2

Номенклатура на SikaWrap тъканите

## 9.2.2. Sikadur свързващи вещества и импрегниращи смоли

### Sikadur-30

Sikadur е високомодулно, високоякостно пастообразно конструктивно лепило на епоксидна основа, предназначено за външно залепване на стоманени и CarboDur ленти.

Основните характеристики на Sikadur-30 са следните:

- Температурните граници, в които може да се полага продуктът, варират в диапазона от +10°C до +35°C.
- Не е необходимо предварително полагане на грунд преди залепването, тъй като продуктът изпълнява ролята както на грунд, така и на свързващо вещество.
- Продуктът е устойчив на действието на киселини, основи, масла и нефтени продукти в ниски концентрации.

### Sikadur-330

Sikadur 330 представлява полувискозна импрегнираща смола с доказани качества. Тя се използва за залепване по така наречения „сух“ метод на приложение. Тя не е подходяща за приложение при тъкани с плътен вътък (например 103C, 107G), както и при нетъкани материали (например 300C HiMod NW).

Основните характеристики на Sikadur-330 са следните:

- Температурните граници, в които може да се полага продуктът, варират в диапазона от +10 до +35°C.
- Не е необходимо предварително полагане на грунд преди залепването, тъй като продуктът изпълнява ролята както на грунд, така и на свързващо вещество.
- След втвърдяването на продукта, третираната повърхност на елемента остава лепкава. Затова е необходимо нанасянето на покритие или полагането на следващи пластове от продукта да се извършва внимателно, като се следват технологиите, описани в листа с технически данни на продукта.

### Sikadur-300

Sikadur-300 представлява импрегнираща епоксидна смола с нисък вискозитет, която е специално предназначена за употреба в сатураторна машина или за приложение при „мокрия“ метод на полагане. Поради тази причина, срокът на годност на продукта след смесване варира в границите между 3 и 5 часа в зависимост от температурата. По принцип Sikadur-300 може да се използва за всеки вид SikaWrap тъкан, но се препоръчва употребата му в сатураторни машини за тъкани с плътен вътък или за нетъкани материали.

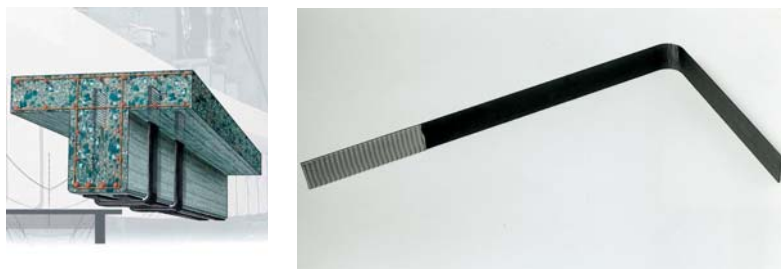
Основните характеристики на са следните:

- Дълъг срок на годност след смесване и бавно втвърдяване.
- Температурните граници, в които може да се полага продуктът, варират в диапазона от +15 до +40°C.
- Продуктът е устойчив на действието на киселини, основи, както и на масла и нефтени продукти с ниски концентрации.

### 9.3. CarboDur гопълнителни системи

#### 9.3.1. CarboShear L системи - системи за усилване на срязване

Sika CarboShear L лентите с L-образна форма (Фиг. 8.4) се произвеждат за употреба като външна усилваща армировка на срязване и представляват едно допълнение към преоварително изготвените CarboDur ламели.



Фиг. 8.4 CFRP L -образни ленти „CarboShear L“

L-образните ленти притежават предимствата на всички CFRP продукти като при тях също за залепване към конструктивния елемент се използва Sikadur 30 свързващо вещество на епоксидна основа. Те се произвеждат в три различни модела, както е показано в таблица 8.3.

Модел	Вертикално рамо (mm)	Ширина (mm)	Дебелина (mm)
4/20/50	200 съответно 500	40	1.4
4/30/70	300 съответно 700	40	1.4
4/50/100	500 съответно 1000	40	1.4

Еластичен модул	Якост на опън
120 kN/mm <sup>2</sup>	126 kN/mm <sup>2</sup>

Таблица 8.3 Модели и механични свойства на CarboShear L лентите

#### 9.3.2. CarboHeater - нагреватели

Sika е разработила специална нагревателна система - CarboHeater System (Фиг. 8.5), която намалява времето, необходимо за втвърдяване на свързващото вещество. Принципът на действие на системата се основава на електрическата проводимост на въглеродните нишки. Използват се специални приспособления, чрез които електрическият ток се провежда през CFRP ламелите по време на процеса на усилване на елемента. Чрез контролен елемент се поддържа необходимата температура при процеса на втвърдяване.



**Фиг. 8.5 Бързо втвърдяване при използване на Sika нагревателно приспособление**

Основните предимства на контролираното втвърдяване са:

- Повишава се температурата при втвърдяването на свързващото вещество.
- Постига се бързо втвърдяване на свързващото вещество при ниски температури.
- Употребата му е възможна дори под въздействието на динамичен товар.

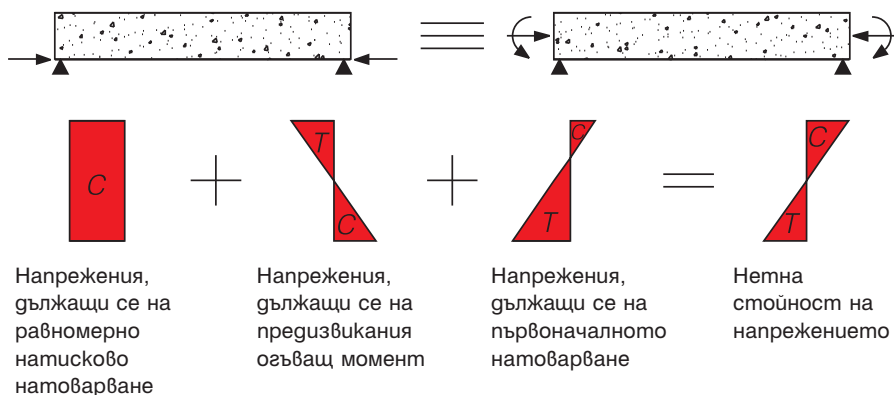
При проведената експериментална програма в изпитателните лаборатории на EMPA е установено опитно, че пълното втвърдяване на Sikadur 30 при температура 70°C се постига за 3 часа.

### 9.3.3. Предварително напрегнати FRP материали

Предварителното налягане на съществуващи стоманобетонни конструкции при употребата на външно залепени CFRP ламели представлява една прецизна авангардна технология за укрепване. При гранична носимоспособност на конструкцията, при оптимални условия на изпитване, използваната големина на деформацията на ламелите е  $\varepsilon_L = 8\%$ . Тази деформация представлява едва 50% от гарантираната еластичност на използваните CFRP ламели. Това ограничение на използването на капацитета на CFRP материалите по отношение на деформациите се дължи главно на ограничената носимоспособност на свързващото вещество и на ограничената опънна якост на пластове бетон близо до повърхността.

Ако трябва да се използва пълната носимоспособност и еластичност на материала, който се подлага на налягане, тоест при деформация по-голяма от 8%, би следвало да се приложи допълнително налягане преди полагането на материала върху конструкцията. Следователно материалът трябва да бъде предварително напрегнат.

Употребата на предварително напрегнати CFRP ламели съчетава предимствата на усилянето с CFRP ламели и тези на обикновеното предварително налягане на елементите. Предварително напрегнатите ламели предизвикват натискови напрежения в опънната зона на напречното сечение, като по този начин намаляват опънните напрежения в стоманената арматура по въздействието на полезното натоварване и следователно намаляват ширината на пукнатините и големината на провисването (Фиг.8.6). При изчисляване на носимоспособността на елемента, опънната сила в предварително напрегнатите ламели се прибавя към опънната сила в стоманената арматура.



Фиг. 8.6 Принципи на прегварителното налягане

Sika в сътрудничество с консултиращите инженери Leonhart, Andro & Partners и StressHead AG е разработила две системи за прегварително налягане. Това са съответно Sika Leoba Carbodur (SLS I и II) и Sika-StressHead (Фиг. 8.6). Характеристиките на двете системи са показани в таблица 8.4.

Вид система	Sika LC II	Sika StressHead
Sika CarboDur ламели	V914	V624
Напречно сечение	126 mm <sup>2</sup>	144 mm <sup>2</sup>
Сила на налягане	200 kN	220 kN
Деформация при прегварителното налягане	9‰	9.5‰
Вид на налягащия анкер	Leoba LC II	StressHead 220

Таблица 8.4 Характеристики на Sika системите за прегварително налягане



Фиг. 8.7 Sika прегварително налягане системи:  
(а) Sika Leoba Carbodur CFRP и (б) Sika StressHead

Предимствата на предварително напрегнатите Sika CarboDur CFRP ламели пред предварителното напрегане на стоманата в конструкциите са:

- Те предлагат един лесен начин за предварително напрегане на съществуващи конструкции.
- Притежават ниско тегло, като по този начин улесняват монтажа и боравенето с тях.
- Ниска загуба на предварителното напрегане, дължащо се на по-голямата първоначална напрегаща сила.
- Притежават компактност, дължаща се на малките размери на секциите, от които са съставени.
- Постигат ниво на напрегането, което е съпоставимо по стойност с обикновеното предварително напрегане на армировката.
- Не съществува риск от образуване на пукнатини от корозия.
- Материалът, подложен на предварително напрегане, е устойчив на корозия.
- Предварителното напрегане може да се приложи на материала преди залепването му върху конструкцията или в експлоатационно състояние след залепването.

Освен това трябва да се отбележат и предимствата на предварително напрегнатите CFRP материали пред тези без предварително напрегане:

- Постига се оптимално използване на високата опънна якост на Sika CarboDur ламелите.
- Постига се намаление от 30 % до 50 % на използваното количество ламели.
- Постига се оптимално съотношение между цената и качеството на усилването при бетоновите конструкции.
- Повишава се експлоатационната надеждност на конструкцията: постига се намаление на размера на пукнатините, намаление на опънните напрежения в стоманената армировка, както и на корозията.
- Постигнатият ефект от усилването е подходящ също така за натоварване от собствено тегло на конструкцията и от постоянни товари.
- Постига се намаление на опънните напрежения в съществуващата армировка.
- Възможно е да се извърши усилване на строителни конструкции при ниски температури и при висока влажност на околната среда без да е необходимо при това да се прилагат специални мероприятия.
- Постига се намаление на дебелината на използваните листове, като максималната използвана дебелина е 2.4 mm.
- Използваните анкери за закомвяне на листовите са с малка дължина.

**10. СЛУЧАИ НА УСИЛВАНИЯ ЧРЕЗ FRP МАТЕРИАЛИ В БЪЛГАРИЯ****10.1. Мост № 2 на р. Марица, по път II-56,  
югоизточен обход на Пловдив - май 2006 г.**

Една от връзките "колона-изливен пилот" на съоръжението, която беше със силна ерозия на бетоновото покритие и оголване на армировката, бе усилена с тъканта SikaWrap-430 G и епоксидно лепило Sikadur-330, като предварително работното сечение на елемента се възстанови с епоксидното лепило Sikadur-31. Постигна се увеличение на сеизмичната устойчивост /дуктилност на елемента/ и възстановяване на монолитността на сечението.



Фиг. 9.1. Изглед на съоръжението.



Фиг. 9.2. (а) Елементът преди усилването. (б) Връзката след усилването.



### 10.2. Пътен наглез над ж.п. линии, гр. Стамболийски - юли 2006г.

Поради причини от комплексен характер, северната и южна връхни конструкции се бяха придвижили на известно минимално разстояние в посока устоите / северен и южен/ и съответно, вследствие на тези усилия, се бяха появили пукнатини по 5 колони при стълбове 2, 5, 14, 15 и 16 при връзката им колона - изливен пилот. Замонолитването на пукнатините по колоните и усиляването беше постигнато чрез шпакловане с епоксидно лепило Sikadur-31 и бинтоване с тъканта SikaWrap-430 G, залепена с лепило Sikadur-330. Използването на стъклената тъкан се продиктува от характеристиките ѝ - еластичен модул - 76 GPa и изчислително съпротивление на опън - 2300 MPa, като същевременно се достига и увеличение на дуктилността на съответните елементи.

Construction



Фиг. 9.4. Изглед на наглеза.



Фиг. 9.5. Бинтоване на елемента с тъканта SikaWrap-430 G.



Фиг. 9.6. Възстановяване на монолитността на връзката колона - изливен пилот и увеличение на дупилността на ѝ.

### 10.3. Търговски център - ГУМ, Ловеч, реконструкция, декември 2006г.

Във връзка с предстояща реконструкция на сградата, включваща и изграждане на нова постройка, се появява необходимостта от премахване на конзолни елементи. При бъдещото отстраняване на цитираните конзоли в 9 стоманобетонени греди се увеличават над допустимото огъващите моменти.

Изискваните огъващи моменти се постигат чрез залепване на Sika CarboDur S1012 ламели с епоксидно лепило Sikadur-30 в опънатата зона на елементите.



Фиг. 9.7. ГУМ Ловеч.



Фиг. 9.8. Залепване в опънната зона на въглеродни ламели за поемане на нов, по-голям положителен огъващ момент в сечението.



Фиг. 9.9. Монтаж на ламели SikaCarboDur S1012.



Фиг. 9.10. Усилена стоманобетонна грега.

#### 10.4. Административна сграда на БТК, София, реконструкция, февруари 2006г.

Проблем: недопустимо провисване на стоманобетонни плоча и греди.

Решение: изискваните положителни огъващи моменти се постигат чрез монтаж на композитни материали в опънатата зона на конструкциите.

Материали: SikaWrap-300 C, Sikadur-330, Sika CarboDur S612, Sikadur-30.



Фиг. 9.8. Усилване на стоманобетонната плоча и греда.

#### 10.5. Търговски център, ул. Капитан Райчо, Пловдив - 37 000 м<sup>2</sup> площ, нова сграда, 4 отделни тела на дилатационни фуги, април - май 2006г.

Проблем: голямо количество пробити отвори в стоманобетонни плочи със скрити греди за прокарване на тръбопроводи; събитията не са координирани с проектанта-конструктор; получила се е загуба на носимоспособността на отделни елементи и загуба на сеизмичната устойчивост на конструкцията в три тела, както и опасност от прогънване при колони - плочи.

Решение: увеличение на носимоспособността и сеизмичната устойчивост, и преодоляване на опасността от прогънване при колони - плочи със залепване на въглеродни ламели и монтаж чрез залепване и анкерирание на стоманени елементи; поемат се както положителни, така и отрицателни огъващи моменти и срязващи усилия.

Материали: SikaCarboDur S512, SikaCarboDur S612, Sikadur-30, Sikadur-31, Sika AnchorFix-1.



Фиг. 9.9. (а) Отвори.

(б) Монтаж чрез залепване и анкерирание на стоманени елементи.

(в) Залепване на въглеродни ламели.

### 10.6. Резидентна сграда в района на Родопската яка, Пловдивско, реконструкция, август - септември 2006г.

Проблем: по желание на инвеститора и съгласно архитектурно решение се премахва колона, носеща 36 т постоянни и подвижни товари.

Решение: съответните усилия се поемат с комбинирано усилване чрез монтаж на въглеродни и стъклени композитни материали и монтаж чрез залепване и анкерирание на стоманени елементи; конструкцията се осигурява и в сеизмично отношение.

Материали - Sika CarboDur M514, Sikadur-30, SikaWrap-430 G, Sikadur-330, Sikadur-31, Sika AnchorFix-1.



Фиг. 9.9. (а) Съществуващата колона.



(б) Временно укрепване и разрушаване на колоната.



Фиг. 9.10. (а) Поемане на усилия чрез въглеродни ламели и стоманен елемент в две направления.



(б) Залепване и анкерирание на стоманения елемент.

(в) Поемане на срязващи усилия със стъклена тъкан.



### 10.7. Усилване на Джумая џамия /1364г./, гр.Пловдив, април - юни 2007г.

Проблеми: 6 вековна конструкция; налични пукнатини по носещи стени, куполи и коритообразни сводове вследствие на земетресения; земна основа - стар насип; "биологични" разрушения; недостатъчна и не добра поддръжка.

Решения: чрез монтаж на въглеродните Sika CarboDur S 512 ламели и въглеродната тъкан SikaWrap 230C с епоксидните лепила Sikadur30 и Sikadur 330 се постига замонолитване на пукнатините, възстановяване на работното сечение и носимоспособността на елементите, както и желаното сеизмично поведение на конструкцията съгласно проекта.

Стоманените детайли се монтират с двукомпонентното бързосъхнещо анкерно лепило Sika AnchorFix-1



Фиг. 9.11. Бинтоване на сводове с въглеродна тъкан.



Фиг. 9.12. Усилени сводове.







Construction

