



Получена: 28.10.2021 г.

Приета: 04.02.2022 г.

ДОПУСТИМИ НАПРЕЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ В УСИЛВАЩИ ИВИЦИ ОТ ФИБРОУСИЛЕНИ КОМПОЗИТНИ МАТЕРИАЛИ, ПРИЛОЖЕНИ ЗА УСИЛВАНЕ НА ТУХЛЕН ЗИД

А. Гороломов¹, А. Хандрулева², П. Греков³

Ключови думи: фиброусилени композитни материали, FRP материали, допустими напрежения, допустими деформации, зидани конструкции

РЕЗЮМЕ

Допустимите деформации в ленти от фиброусилени композитни материали (fiber reinforced polymers – FRP), усилващи зид, са един от най-важните въпроси, свързани с проектиране на усилващата система. В настоящата публикация е направено сравнение на експериментални данни от цял свят и получените по теоретичен път спрямо наличните няколко световни стандарта в тази област – италианския CNR-DT 200, неговата преработка CNR-DT 200/R1 и американския ACI 440.7R-10.

1. Въведение

Един от най-важните проблеми при проектиране на усилване с фиброусилени композитни материали (наричани накратко FRP материали от английското наименование fiber reinforced polymers) е определяне на допустимите напрежения в ивица от FRP, захваната към зида. На база на тези напрежения се изчислява силата, която може да поеме всяка FRP ивица и оттам се определят нормалната, срязващата сила и огъващият момент във и извън равнината, които може да поеме зидът, усилен с FRP материали.

¹ Антон Гороломов, ас. инж. арх., ВСУ „Любен Каравелов“, ул. „Суходолска“ № 175, 1073 София, e-mail: tonyngor@gmail.com

² Анита Хандрулева, доц. д-р инж., ВСУ „Любен Каравелов“, ул. „Суходолска“ № 175, 1073 София, e-mail: anita_handruleva@vsu.bg

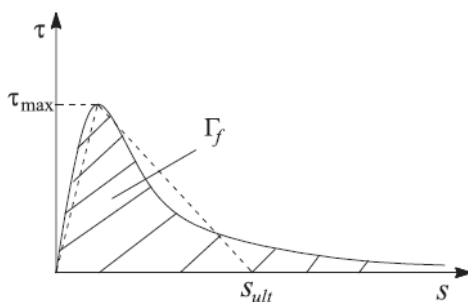
³ Петър Греков, доц. д-р инж., ВСУ „Любен Каравелов“, ул. „Суходолска“ № 175, 1073 София, e-mail: petargrekov@gmail.com

Допустимите напрежения в ивицата от FRP материали са свързани предимно с разлепването (debonding) на ивицата от основния материал. Това се дължи на големите опънни якости и съответно невъзможността за разрушение вследствие на скъсване на ивицата от FRP материали. Това разлепване понякога е съпроводено и от разкъсване на тъканта на усилващата лента и други форми на разрушение, но в почти всички случаи е водещо като критерий за настъпване на крайно гранично състояние. Това важи както за стоманобетонните, така и за зиданите конструкции, усилвани с FRP материали, като при зиданите е още по-ясно изразено – поради малките якости на основата допустимите напрежения при загуба на усилващата система са значително по-малки.

Правени са множество експериментални изследвания по света, свързани с усилване на зид с FRP материали, включително няколко и у нас. В настоящата публикация са цитирани опити, целящи единствено определяне на допустимата сила на опън в ивица от FRP, а не по-сложни и комплексни постановки, касаещи усилване на цели елементи и изследване на тяхното поведение, за да може да се изключи влиянието на странични фактори. Подобни сравнения между теоретични и експериментални резултати съществуват, но те са съсредоточени по-скоро върху конкретен фактор, влияещ на изследваните допустими напрежения и деформации и предложения за подобрене на някои коефициенти във формулите в някой стандарт или предлагане на нови изчислителни постановки. Целта на настоящата публикация е да направи сравнение между съществуващите стандарти, да даде насоки към проектантите относно близостта на теоретичните с експерименталните резултати и консервативността на различните стандарти.

2. Теоретични основи на предаването на напрежения между FRP ивица и усилвания елемент

Крайно гранично състояние, свързано със загуба на усилващата система, настъпва обикновено с срязване от срязване на основата, върху която се залепва FRP ивицата, а не в слоя адхезив (лепило), защото той е с по-големи якости, нито по границата на лепилния слой с FRP ивицата или основата, защото адхезията е достатъчно голяма. Напреженията на срязване са разпределени по силно криволинеен закон по дължина на FRP ивицата като след определено разстояние, представляващо дължината на закотвяне, са много малки и могат да се пренебрегнат. Това е показано схематично на фиг. 1.



Фиг. 1. Диаграма на разпределение на тангенциалните напрежения при залепена ивица от FRP [1]

Максималната сила, която може да поеме ивицата от FRP, е [1]:

$$F_{\max} = b_f \int_0^{\infty} \tau(x) dx, \quad (1)$$

където b_f е широчината на FRP ивицата;

τ – тангенциалните напрежения по дължината с променлива координата x на предаване на усилията.

Специфичната енергия на разрушение Γ_f (в дименсия енергия/единица площ) [2]:

$$\Gamma_f = \int_0^{\infty} \tau(s) ds, \quad (2)$$

където s е приплъзването на FRP ивицата спрямо основата.

След преработка на тези изрази, и след приемане на билинейната апроксимация на диаграмата на срязващите напрежения до s_{ult} , се стига до формулите в стандарта CNR-DT 200 за определяне на допустими напрежения и деформации в FRP ивиците.

3. Определяне на допустима сила във FRP ивиците чрез използване на методиката на CNR-DT 200/2004 и CNR-DT 200-R1/2013

3.1. Документ CNR-DT 200/2004

Формулите за определяне на енергия на разрушение и оттам на допустими напрежения във FRP ивиците са дадени в стандарта. Тук те ще бъдат записани, за да се направи коментар на коефициентите, участващи в тях и да се изведе израз за допустимата опънна сила в ивица от FRP, за да може тази сила да се сравни с експерименталните резултати.

Този стандарт работи със специфичната енергия на разрушение и другите общи предпоставки, описани в точка 2.

Специфичната енергия на разрушение се дава с израза [3]:

$$\Gamma_{fk} = c_1 \sqrt{f_{mk} f_{mm}}, \quad (3)$$

където $c_1 = 0,015$ е експериментално установен коефициент;

f_{mk} – натискова якост на зидарията, определя се съгласно Еврокод 6, [N/mm²];

f_{mm} – опънна якост на зидарията, според [3] може да се приеме като $0,1f_{mk}$.

Допустимите напрежения във FRP, при предпоставка, че закотвящата дължина е достатъчна, се дават с [3]:

$$f_{fd} = \frac{1}{\gamma_{fd} \sqrt{\gamma_M}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{fk}}{t_f}}, \quad (4)$$

където γ_{fd} е частен коефициент на сигурност на FRP, взима се съгласно таблица 3,2 на CNR DT-200/2004 [3];

γ_M – частен коефициент за сигурност на зидарията, взима се съгласно Еврокод 6;

E_f – модул на еластичност на FRP, дава се от производителя;

t_f – дебелина на FRP.

От заместването на двете формули и като отчитаме факта, че изчислителната максимална сила в усилващата ивица е $F_{cnr-dt,d} = f_{fd} b_f t_f$, получаваме следната формула:

$$F_{cnr-dt,d} = \frac{1}{\gamma_{fd} \sqrt{\gamma_M}} b_f \sqrt{2 E_f t_f f_{mk} \sqrt{0,1.0,015}} . \quad (5)$$

Тази сила, съгласно изискванията на стандарта за максимални деформации във FRP материала, не трябва да е по-голяма от:

$$F_{cnr-dt,d,max} = \eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} E_f t_f b_f , \quad (6)$$

където ε_{fk} са допустимите деформации при скъсване на FRP, задават се от производителя;

η_a – фактор на конвертиране (conversion factor) – взима се от таблица 3,4 на CNR DT 200/2004 и за външни ивици от FRP е за стъклени нишки 0,65, за арамидни нишки 0,75, за въглеродни нишки 0,85;

γ_f – частен коефициент на сигурност, взима се съгласно таблица 3,2 на CNR DT-200/2004 и е със стойност 1,1 за сертифицирани системи и апликация тип А), съгласно точка 2,5 на CNR DT-200/2004 и 1,25 за несертифицирани системи (апликация тип В).

Оттам характеристичната стойност, без отчитане на коефициентите за сигурност, се получава:

$$F_{cnr-dt,k} = b_f \sqrt{2 E_f t_f f_{mk} \sqrt{0,1.0,015}} \leq \eta_a \varepsilon_{fk} E_f t_f b_f . \quad (7)$$

По тази формула могат да бъдат изчислени силите, които се сравняват с експерименталните.

3.2. Документ CNR-DT 200/R1/2013

През 2013 г. е публикувана ревизия на стандарта, в която основните идеи и основните постановки са запазени, но са променени някои коефициенти.

Специфичната енергия на разрушение се дава с израза, различен от (3) по коефициента c_1 , който тук се заменя с няколко коефициента [4]:

$$\Gamma_{fd} = \frac{k_b k_c}{FC} \sqrt{f_{mb} f_{btm}} , \quad (8)$$

където k_c е експериментално установен коефициент, който има стойност 0,031 за тухлене на зидария и други стойности за каменни зидарии;

f_{mb} – натискова средна якост на зида;

f_{btm} – опънна якост на зидарията, според [4] може да се приеме като $0,1 f_{mb}$;

FC – коефициент за сигурност, тъй като става въпрос за усилване на тухлен зид, е логично да се приеме коефициента γ_M от Еврокод 6, макар да не е дадена нужната конкретика;

k_b – коефициент, отчитащ геометрията [4]

$$k_b = \sqrt{\frac{3-b_f/b}{1+b_f/b}}, \quad (9)$$

където b е широчината на усилвания елемент, ако той е с размер повече от една тухла, до края на тухлата, върху която е закрепена FRP ивицата, b_f е изяснено по-горе.

Допустимите напрежения във FRP, при предпоставка, че закотвящата дължина е достатъчна, се дават с [4]:

$$f_{fd} = \frac{1}{\gamma_{fd}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{fd}}{t_f}}. \quad (10)$$

От заместването на двете формули и като отчитаме факта, че изчислителната максимална сила в усилващата ивица е $F_{cnr-dt-R1,d} = f_{fd} b t_f$, получаваме следната формула:

$$F_{cnr-dt-R1,d} = \frac{1}{\gamma_{fd} \sqrt{FC}} b_f \sqrt{2E_f t_f f_{mb} \sqrt{0,1k_c} \sqrt{\frac{3-b_f/b}{3-b_f/b}}}. \quad (11)$$

Тази сила, съгласно изискванията на стандарта за максимални деформации във FRP материала, не трябва да е по-голяма от дадената по формула (6).

Характеристичната стойност, без отчитане на коефициентите за сигурност, се получава:

$$F_{cnr-dt,k} = b_f \sqrt{2E_f t_f f_{mb} \sqrt{0,1k_c} \sqrt{\frac{3-b_f/b}{3-b_f/b}}} \leq \eta_d \varepsilon_{fk} E_f t_f b f. \quad (12)$$

По тази формула могат да бъдат изчислени силите, които се сравняват с експерименталните.

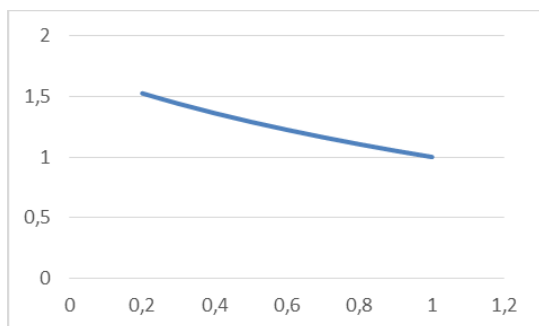
3.3. Коментар и сравнение между CNR-DT 200 и CNR-DT 200/R1

Допустимите усилия, получени по редакцията CNR-DT 200/R1 са значително по-големи от получените по първоначалния вариант на стандарта, поради няколко съществени различия:

Първо, в редакцията на стандарта се използва средната, а в първоначалния вариант характеристичната стойност (5% фрактил) на натисковата якост на зида. Като имаме предвид, че якостта на зид е случайна величина с голямо разсейване от средната стойност (за разлика от тази на стоманата, например), това ще доведе до сериозни разлики.

Второ, коефициентът c_1 при определяне на специфичната енергия на разрушение е заменен с k_c . Този коефициент за тухлен зид е 0,031, което е над два пъти повече от стойността на $c_1 = 0,015$.

Трето, добавен е коефициент k_b . Нека изследваме стойностите на този коефициент от случая, когато широчината на FRP ивицата е равна на широчината на усилвания елемент (такъв случай е почти невъзможен в практиката) до стойности около 1/5 на отношението на ефективната широчината на FRP ивицата към широчината на усилвания елемент (5 cm ивица върху зид от тухли 25 cm, например).



Фиг. 2. Стойности на k_b

Вижда се, че той е по-голям от 1, като за често срещаните в практиката случаи има стойности 1,2 – 1,4.

4. Определяне на допустима сила във FRP ивиците, чрез използване на методиката на ACI 440.7R-10

Този стандарт използва значително по-опростена методика, която се основава на емпирични зависимости. Допустимите деформации на усилващата ивица се дават с различни формули в зависимост от това дали се изследва разрушаване от огъване или от срязване. Тъй като при разрушаване от огъване се достига до по-ясно и чисто напрегнато състояние, доста подобно на това, което се реализира в експериментите за определяне на сила при разлепяне, тук ще бъде използвана именно тази методика за изчисляване на допустимата сила в усилваща лента.

$$\varepsilon_{fe} = k_m \varepsilon_{fu}^* \leq C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (13)$$

където $k_m = 0,45$ за залепени по повърхността на стената FRP и други стойности за други начини на залепяне на FRP;

C_E – коефициент, зависещ от вида на FRP;

ε_{fu}^* – допустими деформации във FRP.

Ако разрушаването от срязване има различна и по-усложнена методика за изчисление на допустимите напрежения, разликата е в замяна на коефициента k_m с k_v , като k_v има стойности от 0,2 до 0,4 в зависимост от физико-механичния коефициент на армиране с FRP.

Допустимата сила в ивица от FRP при отчитане, че $F_{aci,k} = \varepsilon_{fe} E_f b_f t_f e$:

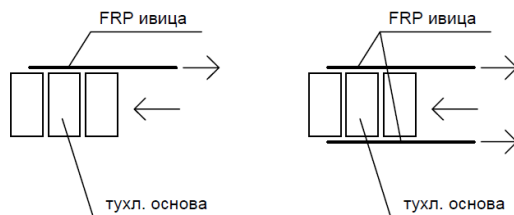
$$F_{aci,k} = k_m \varepsilon_{fu}^* E_f b_f t_f \leq C_E \varepsilon_{fu}^* E_f b_f t_f \quad (14)$$

По тази формула може да се изчисли сила, която да се сравни с експерименталната.

5. Експериментални резултати и сравнението им с теоретичните

Експерименталните данни, които се използват, са от опитни постановки, целящи определяне на максимална опънна сила в ивица от FRP, залепена външно за тухлена основа. Тестът подлага зоната на контакт между FRP ивицата и тухлената основа на сряз-

ване. Целта е да се изключат други фактори, влияещи върху разрушението на усиления елемент, и затова опитните постановки са максимално опростени. Схематично опитните постановки са представени на следващата фигура.



Фиг. 3. Схематично представяне на опитните постановки на експериментите, използвани за сравнението – два варианта (едностранен и двустранен)

В представените резултати, където експериментът е двустранен, са дадени силите на срязване за едната ивица, т.е. половината от експериментално измерените. Резултатите от изпитванията, при които разрушението не е от нарушаване на връзката между FRP ивицата и зида (debonding), а друг тип, например разрушение на тухлата, не са включени, като непоказателни за допустимата сила във FRP ивицата.

Таблица 1. Експериментални резултати за въглеродни нишки, залепени външно за тухлен зид

N	E_{fs} , MPa	t_f , mm	f_m , MPa	b_f , mm	b , mm	ϵ_{max} , %	Experiment, N min-max		Забележка	Публикувано
1	230000	0,165	17,4	40	120	1,7	10030	10960	$l_c = 150-200$ mm, 3×6 експер.	[6]
2	230000	0,165	17,4	60	120	1,7	12480	13670	$l_c = 160-220$ mm, 4×3 експер.	[6]
3	230000	0,165	17,4	80	120	1,7	14630	19000	$l_c = 160-240$ mm, 5×3 експер.	[6]
4	240000	0,17	7,3	50	120	1,45	13000		$l_c = 250$ mm, 1 експеримент	[7]
5	200000	0,097	7,3	50	120	1,45	11500		$l_c = 250$ mm, 1 експеримент	[7]
6	230000	0,165	42,3	50	120	1,5	18100		$l_c = 200$ mm, 1×5 експеримента	[8]
7	215000	0,117	8,8	25	130	1,7	4340		$l_c = 150$ mm, 1×3 експеримента	[9]
8	132200	0,172	16,4	50	120	1,87	4540		$l_c = 200$ mm, 1×2 експеримента	[10]
9	132200	0,172	18,3	50	120	1,87	5780		$l_c = 200$ mm, 1×2 експеримента	[10]
10	132200	0,172	31,8	50	110	1,87	7360		$l_c = 200$ mm, 1×2 експеримента	[10]
11	132200	0,172	30,2	50	130	1,87	6850		$l_c = 200$ mm, 1×2 експеримента	[10]
13	233000	0,17	19,8	50	120	1,26	5870	9070	$l_c = 160$ mm, 5×5 експеримента	[11]
14	240000	0,165	19,2	50	120		6810		$l_c = 200$ mm, 1×3 експеримента	[1]*
15	240000	0,17	9,9	50	120		6280	8970	$l_c = 200$ mm, 2×5 експеримента	[12]
16	240000	0,17	24,9	50	140		17050	18040	$l_c = 250$ mm, 4×1 експеримента	[13]
17	240000	0,17	40,9	50	140		14800	20400	$l_c = 250$ mm, 4×1 експеримента	[13]
18	230000	0,17	33,5	50	250	1,6	15940	20150	$l_c = 200$ mm, 1×5 експеримента	[14]

*University of Sannio, вътрешен доклад

В табл. 1 са събрани експериментални данни от различни публикации за максимална опънна сила във FRP ивици с въглеродни нишки, а в табл. 2 са направени и изчисления за получените резултати по трите нормативни документа. Експериментите са публикувани на серии от авторите, където има максимална и минимална стойност се има предвид най-ниската и най-високата стойност, поучена във всяка серия от експерименти. Когато се изпитва една серия или един експеримент, разбира се, стойността е една.

Аналогично е направено и в табл. 3 и 4 за стъклени нишки върху тухлен зид.

При направата на изчисленията при липса на данни е приемана деформация при скъсване 1,7%, която е характерна за повечето въглеродни FRP ленти.

За по-голяма яснота е давана и изчислителна, и характеристична стойност на силата при разрушение по CNR-DT 200 и CNR-DT 200-R1.

Таблица 2. Експериментални и изчислителни резултати за въглеродни нишки, залепени външно за тухлен зид

E_{fs} MPa	t_{fs} mm	f_m , MPa	b_{fs} mm	b , mm	F_{cnr-ds} N	$F_{cnr-dt,ds}$ N	$F_{cnr-dt-R1}$ N	$F_{cnr-dt-R1,ds}$ N	F_{aci-M} N	Experiment, N min-max	
230000	0,165	17,4	40	120	3165,93	1865,54	5412,45	3189,32	10400	10030	10960
230000	0,165	17,4	60	120	4748,89	2798,31	7756,93	4570,81	15600	12480	13670
230000	0,165	17,4	80	120	6331,86	3731,08	9901,44	5834,48	20800	14630	19000
240000	0,17	7,3	50	120	2657,80	1566,12	4440,03	2616,31	13000	13000	
200000	0,097	7,3	50	120	1832,71	1079,93	3061,66	1804,10	6329,25	11500	
230000	0,165	42,3	50	120	6170,31	3635,89	10307,90	6073,99	12808,1	18100	
215000	0,117	8,8	25	130	1145,66	675,08	2040,23	1202,22	4810,89	4340	
132200	0,172	16,4	50	120	2973,94	1752,41	4968,16	2927,52	8952,05	4540	
132200	0,172	18,3	50	120	3141,49	1851,14	5248,07	3092,45	9567,18	5780	
132200	0,172	31,8	50	110	4141,18	2440,21	6847,29	4034,81	8697,44	7360	
132200	0,172	30,2	50	130	4035,66	2378,03	6801,44	4007,79	8697,44	6850	
233000	0,17	19,8	50	120	4312,86	2541,38	7204,92	4245,54	13000	5870	9070
240000	0,165	19,2	50	120	4247,58	2502,91	7095,86	4181,28	13000	6810	
240000	0,17	9,9	50	120	3095,13	1823,82	5170,61	3046,81	13000	6280	8970
240000	0,17	24,9	50	140	4908,63	2892,44	8336,00	4912,03	13000	17050	18040
240000	0,17	40,9	50	140	6291,04	3707,03	10683,65	6295,40	13000	14800	20400
230000	0,17	33,5	50	250	5573,67	3284,32	9903,09	5835,45	13000	15940	20150

Таблица 3. Експериментални резултати за стъклени нишки, залепени външно за тухлен зид

N	E_{fs} , MPa	t_{fs} , mm	f_m , MPa	b_{fs} , mm	b , mm	ε_{max} , %	Experiment, N		Забележка	Публику- вано
							min	max		
1	73000	0,12	7,3	50	120	2,2	5250		$l_c = 250$ mm, 1 експеримент	[7]
2	65000	0,23	42,3	50	120	2,8	13340		$l_c = 200$ mm, 1×5 експеримента	[8]
3	80000	0,149	8,8	25	130	1,7	4750	4910	$l_c = 150-200$ mm, 2×3 експер.	[9]
4	84251	0,12	19,8	50	120		3880	5090	$l_c = 160$ mm, 6×5 експеримента	[7]
5	83397	0,14	19,2	50	120	1,7	6810	4930	$l_c = 200$ mm, 1×2 експеримента	[11]
6	73000	0,12	7,25	50	120	1,7	10500		$l_c = 250$ mm, 1×3 експеримента	[1]*
7	80200	0,15	15,7	25	235		3170	5460	$l_c = 150-200$ mm, 26×1 експер.	[15]
12	84251	0,12	19,8	50	120	1,69	4300	5765	$l_c = 160$ mm, 5×5 експеримента	[11]

*University of Sannio, вътрешен доклад

Таблица 4. Експериментални и изчислителни резултати за стъклени нишки, залепени външно за тухлен зид

E_{fs} , MPa	t_{fs} , mm	f_m , MPa	b_{fs} , mm	b , mm	F_{cnr-dt} , N	$F_{cnr-dt,d}$, N	$F_{cnr-dt-R1}$, N	$F_{cnr-dt-R1,d}$, N	F_{aci-M} , N	Experiment, N min-max	
73000	0,12	7,3	50	120	1231,53	725,68	2057,35	1212,30	3350,7	5250	
65000	0,23	42,3	50	120	3872,77	2282,05	6469,71	3812,31	5718,38	13340	
80000	0,149	8,8	25	130	788,64	464,71	1404,45	827,58	2279,7	4750	4910
84251	0,12	19,8	50	120	2178,92	1283,94	3640,03	2144,91	3867,12	3880	5090
83397	0,14	19,2	50	120	2306,39	1359,06	3852,98	2270,39	4465,91	6810	4930
73000	0,12	7,25	50	120	1227,30	723,20	2050,29	1208,14	3350,7	10500	
80200	0,15	15,7	25	235	1058,24	623,57	1934,65	1140,00	2300,74	3170	5460
84251	0,12	19,8	50	120	2178,92	1283,94	3640,03	2144,91	3867,12	4300	5765

6. Изводи

Ако приемем експерименталните резултати за единица, то получаваме следните стойности за теоретично получените:

Таблица 5. Сравнение на теоретични и експериментални резултати за въглеродни нишки, залепени външно за тухлен зид

N	F_{cnr-dt} N	$F_{cnr-dt-R1}$ N	F_{aci-M} N
1	0,32	0,54	1,04
2	0,38	0,62	1,25
3	0,43	0,68	1,42
4	0,20	0,34	1,00
5	0,16	0,27	0,55
6	0,34	0,57	0,71
7	0,26	0,47	1,11
8	0,63	1,06	1,97
9	0,54	0,91	1,66
10	0,56	0,93	1,18
11	0,59	0,99	1,27
13	0,73	1,23	2,21
14	0,62	1,04	1,91
15	0,49	0,82	2,07
16	0,29	0,49	0,76
17	0,43	0,72	0,88
18	0,35	0,62	0,82

Таблица 6. Сравнение на теоретични и експериментални резултати за стъклени нишки, залепени външно за тухлен зид

N	F_{cnr-dt} N	$F_{cnr-dt-R1}$ N	F_{aci-M} N
1	0,23	0,39	0,64
2	0,29	0,48	0,43
3	0,17	0,30	0,48
4	0,56	0,94	1,00
5	0,34	0,57	0,66
6	0,12	0,20	0,32
7	0,33	0,61	0,73
8	0,51	0,85	0,90

На база на направения сравнителен анализ на експериментални и теоретични резултати може да се направят следните изводи:

Резултатите, получени по първата редакция CNR-DT 200, са твърде консервативни и се различават чувствително от експериментите.

Резултатите, получени по втората редакция CNR-DT 200/R1, са по-близки до експерименталните, и в почти всички случаи са в полза на сигурността. Тъй като често се оказват доста консервативни, би било икономически изгодно да се използва подходът на „проектиране чрез изпитване“ при по-големи обекти за намаляване на количеството вложени материали за усилването.

Американските норми ACI440.7R-10 дават най-близки до експерименталните резултати, макар изчислителната постановка да е несравнимо по-проста и отчитаща много по-малко входни данни. Проблемът е, че често получените резултати не са в полза на сигурността.

Като заключение може да се каже, че най-подробен и с най-надеждни резултати се оказва CNR-DT 200/R1.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ceroni, Fr., Ferracuti, B. Pecce, M., Savoia, M.* Assessment of a bond strength model for FRP reinforcement externally bonded over masonry blocks. *Composites Part B: Engineering*, Volume 61, 2014, pp. 147–161, ISSN 1359-8368.

2. *Mansouri, I., Kisi, O.* Prediction of debonding strength for masonry elements retrofitted with FRP composites using neuro fuzzy and neural network approaches. *Composites Part B: Engineering*, Volume 70, 2015, Pages 247–255, ISSN 1359-8368.

3. CNR-DT 200/2004 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. National research council, Advisory committee on technical recommendations for construction, Rome, 2013.

4. CNR-DT 200-R1/2013 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. National research council, Advisory committee on technical recommendations for construction, Rome, 2013.

5. ACI 440.7R-10 Guide for the design and construction of externally bonded fiber-reinforced polymer systems for strengthening unreinforced masonry structures. American concrete institute, 2010.

6. *Briccoli Bati, S., Fagone, M.* An analysis of CFRP-brick bonded joints. XVIII GIMC conference, Siracusa; 2010 September 22–24.

7. *Capozucca, R.* Experimental FRP/SRP–historic masonry delamination. *Compos Struct* 2010; 92(4):891–903.

8. *Panizza, M., Garbin, E., Valluzzi, M. R., Modena, C.* Bond behaviour of CFRP and GFRP laminates on brick masonry. D’Ayala, Fodde, editors. VI Int conf on structural analysis of historical constructions, Bath (UK), July 2–4 2008; 2008, p. 763–70.

9. *Oliveira, D. V., Basilio, I., Lourenço, P. B.* Experimental bond behavior of FRP sheets glued on brick masonry. *J Compos Constr* 2011; 15(32):32–41.

10. *Mazzotti, C., Ferracuti, B., Bellini, A.* Experimental bond tests on masonry panels strengthening by FRP. Proc of CICE 2012, 6th international conference on FRP composites in civil engineering, 13–15 June 2012, Rome, Italy, CD ROM; 2012.

11. *Valluzzi, M. R., Oliveira, D. V., Caratelli, A., Castori, G., Corradi, M., de Felice, G., et al.* RILEM TC 223-MS: round robin test for composite to brick shear bond characterization, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 45, no. 12; 2012. pp. 1761–91.

12. *Kwiecien, A.* Stiff and flexible adhesives bonding CFRP to masonry substrates investigated in pull-off test and Single-lap shear test. *Arch Civ Mech Eng* 2012;12:228–39.

13. *Capozucca, R.* Behaviour of CFRP sheets bonded to historical masonry. In: Smith ST, editor. Proc of Asia-Pacific conference on FRP in structures. APFIS 2007. International Institute for FRP in Construction, 2006.

14. *Kashyap, J., Willis, C. R., Griffith, M. C., Ingham, J. M., Masia, M. J.* Debonding resistance of FRP-to-clay brick masonry joints. *Eng Struct* 2012;41:186–98.

15. *Oliveira, D. V., Basilio, I., Lourenço, P. B.* Experimental bond behavior of FRP sheets glued on brick masonry. *J Compos Constr* 2010;15(1):32–41.

ADMISSIBLE STRESSES AND STRAINS IN FRP STRIPES, APPLIED TO STRENGTHEN MASONRY ELEMENTS

A. Gorolomov¹, A. Handruleva², P. Grekov³

Keywords: FRP materials, admissible stresses, admissible strains, masonry structures

ABSTRACT

The admissible strains in FRP (fiber reinforced polymers) stripes, applied to masonry, is one of the most important issues, related to the design of the strengthening system. The present paper makes a comparison between the experimental data from all over the world and the theoretical calculations according to three standards – the Italian CNR-DT 200, its newer version CNR-DT 200/R1 and the American ACI 440.7R-10.

¹ Anton Gorolomov, Assist. Prof. Eng. Arch., USEA (VSU) “Luben Karavelov”, 175 Suhodolska St., Sofia 1373, e-mail:tonyngor@gmail.com

² Anita Handruleva, Assoc. Prof. Dr. Eng., USEA (VSU) “Luben Karavelov”, 175 Suhodolska St., Sofia 1373, e-mail: anita_handruleva@vsu.bg

³ Petar Grekov, Assoc. Prof. Dr. Eng., USEA (VSU) “Luben Karavelov”, 175 Suhodolska St., Sofia 1373, e-mail: petargrekov@gmail.com