

КОНСТРУКЦИИ АРМИРАНИ С ПОЛИМЕРНА АРМИРОВКА (ПРЪТИ)

Иво Дилчев¹, Станислав Цветков²

CONCRETE STRUCTURES REINFORCED WITH FIBER-REINFORCED POLYMER BARS

Ivo Diltchev¹, Stanislav Tsvetkov²

Abstract:

The report examines some of the main legal frameworks, provides a historical overview of the development of the material and its application. A comparison of the characteristics of different types of polymer reinforcement is made. Questions related to the durability and field of application of the material are considered. The main checks and design features in the design and implementation of structures reinforced with polymer bars according to the Eurocodes are also given.

Keywords:

FRP bars, bridges

1. ОБЩИ ПОЛОЖЕНИЯ

При стоманобетонните конструкции, предвид алкалността на бетона, армировъчната стомана е предпазена първоначално от корозия. При конструкции, подложени на агресивни среди, мостове и подпорни стени, кейове в близост до морето, мостове и паркинги обработвани с агресивни соли против замръзване, комбинацията от влага и хлориди намалява алкалността на бетона във времето, вследствие на което, армировката започва да корозира. Тази корозия води до намаляване дълготрайността на съоръжението и в един момент до загуба на експлоатационните си показатели.

Композитните материали са алтернатива на стоманата за конструкциите. Те са немагнитни и не корозират. Механическите характеристики на полимерната армировка се различава от тази на стоманената. Това е предпоставка за промяната на някои проверки и от части философията на подхода към конструкциите. Полимерната армировка се отличава

¹ Иво Дилчев, инж., докторант, катедра „Строителни конструкции“, Строителен факултет, Висше строително училище „Любен Каравелов“ – София, e-mail: ivo_dilchev@abv.bg; Ivo Diltchev, eng. PhD-student, Department of Building Structures, Faculty of Construction, University of Structural engineering and Architecture (VSU) "Lyuben Karavelov" – Sofia, Bulgaria, e-mail: ivo_dilchev@abv.bg

² Станислав Цветков, доцент, д-р, инж., катедра „Строителни конструкции“, Строителен факултет, Висше строително училище „Любен Каравелов“ – София, ул. „Суходолска“ № 175, e-mail: st.cvetkov@vsu.bg; Stanislav Tsvetkov, Associate Professor, eng., PhD, Department of Building Structures, Faculty of Construction, University of Structural engineering and Architecture (VSU) "Lyuben Karavelov" – Sofia, Bulgaria, 175 "Suhodolska" str., e-mail: st.cvetkov@vsu.bg

с анизотропия и висока якост на опън - само по посока на влакната. Това силно ограничава дюбелното действие на армировката и влияе на сцеплението ѝ с бетона. Основна разлика и недостатък е липсата на граница на провлачване – поведението ѝ изцяло еластично. Това налага процедурите по анализ на сеченията да отчитат този недостатък, а именно – крехко поведение на елементите, конструирани със полимерна армировка. Различните региони са изготвили препоръки и насоки за проектиране на такива конструкции (САЩ, Япония, Канада, Германия и др).

В последните десетилетия този материал се развива и навлиза все повече като алтернатива.

2. ИСТОРИЧЕСКО РАЗВИТИЕ

Бележи началото си в годините след Втората световна война. Авиационната индустрия проявява интерес, заради предимствата на материала – лек и с висока якост. По време на Студената война, поради големия интерес, нараства използването им. През 60-те години на XX в., започват първите по-сериозни проучвания за влагането му като армировка в бетона. Първоначално в САЩ, вследствие на бързото разрастване на магистралите и употребата на размразяващи соли, довели до развитие на корозия, вследствие на което - до скъпа поддръжка на съоръженията. Започват експерименти с различни покрития на армировката против корозия, като най-удачно се оказва полимерното. Десетилетие по-късно започва и обмислянето на изцяло полимерна армировка. По-късно започва да се търси електрически непроеводима армировка за помещения със специално оборудване, като тези с ядрено магнитен резонанс (ЯМР). В началото се ползва армировката от стъклени нишки, заради сходното температурно разширение с това на бетона. Тя започва да се употребява и в брегови съоръжения и аеродрумни настилки.

Освен в САЩ, също в: Япония, Канада, Китай и Европа, е внедрена полимерната армировка. След 2000-та година китайците използват полимерната армировка за различни видове конструкции – от мостови пътни плочи до подземно строителство. В Европа, Германия внедрява първа материала.

Канадците внедряват инструкции за употребата на материала в Националните им норми за мостове. През 2006-та година е завършен мостът над Ред Ривър, състоящ се от 16 отвора с дължина 43 метра и пътна плоча с полимерна армировка от стъклени нишки. Също така, още няколко моста са изпълнени в Квебек, с пътна плоча, армирана със стъклени нишки. Някои от тях са: мост Уотон, мост Магог на магистрала 55 Север, мост Кошире Еатон на път 108 и Вал – Алан на магистрала 20 Изток. Част от тези мостове са в експлоатация вече почти 20 години. Последват още над 200 моста, успешно изпълнени – армирани със прави и огънати пръти, вложение в пътните плочи, ограничителните им огради и при някои даже и в гредите. Отделно в Канада, армировка от стъклени нишки е използвана и за: паркинги, бетонови настилки за магистрала. (фиг. 1)



Фигура 1. Полимерна армировка за мостова пътна плоча [1]

В САЩ полимерната армировка също е ползвана за мостови пътни плочи. Употребата на стъклена армировка е вече стандартна за болнични помещения с ЯМР. Използва се значително и за брегови конструкции. Големи проекти са сградата: Гонда в клиника Мейо в Рочестер, Националният здравен институт в Бетесда (в медицинските отделения с ЯМР), моста на RM 1061 в окръг Сиера де ла Круз – за пътната плоча. В Юта 2009, се използвани предварително изготвени панели за пътната плоча, с което е намалено времето за строителство. В Маями през 2011-та год. е направен релсов път 3,9 км, за връзката с летището, като за основата е използвана армировка от стъклени нишки. Изпълнени са пристанищни подпорни конструкции, армирани със стъклени нишки, осигуряващи дълголетие – като бреговата стена, която поддържа част от магистралата Хоноапилани в Мауи. Първоначално изпълнена през 2001 год. със стоманена армировка се налага подмяната със полимерна 11 години по-късно. През 2013-та год. е изпълнен мостът I-635. (фиг. 2 и 3)



Фигура 2. Полимерна армировка за Halls River Bridge, 2017 [3]



Фигура 3. Полимерна армировка за пилот [3]

Използва се и за армировка на шлицови стени, през които в последствие ще премине ТВМ за изпълнение на тунели за метра.

3. СВОЙСТВА

Полимерната армировка е анизотропна. Има различни методи за производството ѝ – с изтегляне, сплитане и тъкане. Много различни фактори влияят върху крайния продукт. Основните са: обема на нишките; типа и ориентацията им; вида на полимера; начина и контрола по време на производство.

На фиг. 4 е показано видово многообразие на асортимент.



Фигура 4. Видове полимерна армировка [1]

Едно от основните предимства на материала, е че не корозира – това го прави силно конкурентен за конструкции в агресивни среди. Друго негово важно качество – не се намагнитизира и е непроводим – това го прави почти незаменяем при изпълнението на специални помещения, като например такива оборудвани с ЯМР. Материалът е много по-лек от стоманата, съответно по-лесен за монтаж. Има висока якост на опън в главното направление и голямо удължение при скъсване. Основен недостатък е линейното му поведение до скъсване. Плътностите, са показани в табл. 1.

Таблица 1. Типични плътности на армировъчни пръти [g/cm^3] [1]

стомана	армировка от стъклени нишки	армировка от въглеродни нишки	армировка от арамидни нишки
7,9	1,6	1,55	1,3

Както се вижда от табл. 2, коефициентът за температурно разширение силно се различава в двете перпендикулярни направления за полимерните армировки. Надлъжните деформации зависят от материала, докато напречните от полимера. Видно, е че свойствата при въглеродните и арамидните нишки силно се различават от тези на бетона, като в надлъжно направление те се свиват при повишаване на температурата. Заради голямата разлика в напречна направление между разширението на полимера и бетона, е необходимо определено минимално бетонно покритие.

Таблица 2. Типични коефициенти на температурно разширение на армировъчни пръти [1]

посока	$\alpha_t, [10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$				
	стомана	армировка от стъклени нишки	армировка от въглеродни нишки	армировка от арамидни нишки	бетон
надлъжно	11,7	8	-5	-4	10,8
напречно	11,7	22	85	70	10,8

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ

Поведението на полимерните материали на опън е изцяло еластично до скъсване. Влияние върху якостта на опън имат: вида на полимера; количеството му; начинът на производство и контрола на качеството. При стъклената армировка, промяната на якостта, се забелязва дори и при промяна в диаметъра на прътите.

В табл. 3 са показани средни якости на опън, при сравнение между армировъчни пръти от стомана и такива – от полимер.

Таблица 3. Средни якости на опън за армировъчни пръти [1]

	стомана	армировка от стъклени нишки	армировка от въглеродни нишки	армировка от арамидни нишки
Граница на провлачане, [MPa]	300-500	-	-	-
Якост на опън, [MPa]	500-1500	500-690	600-3690	1720-2540
Еластичен модул, $\times 10^3$ [GPa]	200	35-50	120-580	41-125
Удължение при провлачане, [%]	0,15 – 0,25	-	-	-
Удължение при скъсване, [%]	6 – 12	1,2 – 3	0,5 – 1,7	1,9 – 4,4

Огъвки в прътите може да се изпълняват само по време на самото производство, но при огъвката се наблюдава значително намаление на якостта на опън до 40%.

4.1. Якост на натиск

Полимерната армировка не работи добре на натиск. Показва ниски якости на натиск и по-ниски стойности на еластичния модул. Механизмът на разрушение зависи от вида и количеството на полимера и технологията на производство. За момента няма стандартизирани тестове, които да определят поведението на този тип армировка на натиск.

4.2. Якост на срязване

Повечето полимерно армирани пръти имат слабо интерламинарно срязване, което е доминирано от поведението на полимера. Посоката на нишките влияе върху носимоспособността на прътите. Якостта на срязване зависи и от начина на производство и съответно производителя, следва да даде резултати от изпитвания и метода по който ги е провел.

4.3. Сцепление с бетона

Сцеплението зависи от: дизайна, вида финиш, оребвяването, технологията на производство, якостта на прътите и условията, в които работи конструкцията. Има три компоненти на връзката между прътите и бетона. Сцеплението се предава през химическа връзка – адхезия, триене между двата материала и зацепване при наличие на оребвяване.

4.4. Пълзене на материала

При продължително натоварване на опън, полимерните пръти могат да се разрушат внезапно, след известен период от време – т.н. период на издръжливост. Това е вследствие статична умора на материала. Това време намалява при нарастване на натоварването, също така при: висока температури на околната среда; при много цикли на омокряне и изсъхване;

излагане на ултравиолетова радиация; цикли на замръзване и размразяване. Най-податлива на пълзене е армировката от стъклени нишки, а най-малко от – карбонови.

4.5. Умора на материала

Има много изследвания, правени в областта на авиацията. Стъклените армировки практически са най-резистентни към умора.

Издръжливостта на пръти, зависи от нивото на средното напрежение и отношението на максималното към минималното циклично натоварване. Условията, в които работи конструкцията също са от важно значение, заради тяхната чувствителност към: влага, алкални и киселинни разтвори.

Изследвано е и поведението на сцепление между прътите и бетона при циклично натоварване.

Поради недостатъчното информация до момента, е препоръчан по-консервативен подход при анализ (проверки) на елементите.

4.6. Поведение при висока температура и пожар

Поведението на елементи, подложени на огъване, армирани с полимерни пръти, е сходно с това на армираните със стоманени. Видът на: армировката, добавъчния материал и бетонното покритие, влияят върху поведението на елемента.

Тъй като полимерните материали са по-чувствителни на високи температури, елементите армирани с тях, показват нарастващо по-лошо поведение от стоманобетонните. Армировката е вбетонирана и затова тя няма толкова голям принос към общото поведение. При температури близки до 100°C, механичните качества на полимера деградират, водейки до влошаване на връзката между: бетона, полимера и нишките.

4.7. Издръжливост на материала

Якостта и коравината на полимерната армировка, зависят от средата преди монтаж и вече в готовия продукт. Тя се влияе, в зависимост от това дали е подложена на: ултравиолетова радиация, силно алкална или силно киселинна среда.

Силно алкална среда влияе негативно върху якостта и коравината на стъклената армировка. Излагането на ултравиолетова радиация и влага, преди влагането на армировката в елемента, води до намаляване на якостта на армировката, произтичащо от деградацията на полимера. Различни видове добавки могат да притъпят този ефект. При някои тестове се наблюдава редукция в силата, от порядъка на 20 % и повече, като най-добре се представят стъклените, а най-слабо – карбоновите пръти.

4.8. Издръжливост на сцеплението с бетона

Сцеплението се дължи на предаването на срязване и зацепване, между: прът, бетон и отделните нишки от пръта. Изследванията са провеждани с цел да се види най-вече как се представя материала във влажната и алкална среди, в която е положен – а именно тази на бетона. Поведението на полимера е водещо при сцеплението, което предава усилията от бетона на нишките.

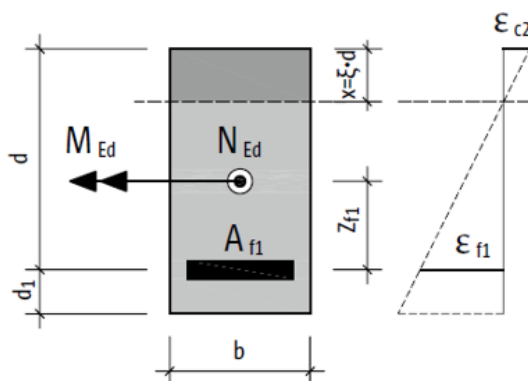
5. СЪОБРАЖЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ

До момента в България няма нормативни документи, относно употребата (и анализ) на полимерна армировка в конструкциите.

Разгледана е Германия, като е една от страните, която има **препоръки и нормативи** за използването на армировка от полимерни материали, тъй като Германия е имала и продължава да има силно влияние в проектирането и строителството в България.

Документите са на базата на Еврокодовете, и в частност на Еврокод 2. Дадени са препоръки за проверки по Експлоатационно гранично и Крайно гранично състояние, и за конструиране на елементите. За сега в Германия, за разлика от: САЩ, Канада и Азия, употребата е силно ограничена и консервативна, като не се допуска употребата на стремена и пръти с огъвки, както и влагане на армировката в конструкции изискващи напречна армировка. [2, 4]

На фиг. 5 може да се види напречно сечение и диаграма на деформациите, за проверки по ULS.



Фигура 5. Основни параметри при равновесно състояние, при Крайно гранично състояние [5]

5.1. Характеристики на материала

Характеристиките на бетона са идентични с тези в Еврокод 2, виж табл. 4.

Таблица 4. Основни характеристики на бетоните [5] в [MPa]

	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck} , [MPa]	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$	25	30	37	45	50	55	60
f_{cd} (с $\gamma_c=1,5$)	11,3	14,2	17,0	19,8	22,7	25,5	28,3
E_{cm}	30000	31000	33000	34000	35000	36000	37000

В таблиците по-долу (табл. 5, 6 и 7), са дадени характеристиките на пръти от производител на полимерни армировки.

Таблица 5. Характеристики за прави пръти, с одобрение в Германия с DIBt AbZ Z-1.6-238 [5]

		Статически определими системи	Статически неопределими системи
Характеристична дългосрочна якост на опън	f_{fk}	580 [MPa]	480 [MPa]
Изчислителна дългосрочна якост на опън (с $\gamma_s=1,3$)	f_{fd}	445 [MPa]	370 [MPa]
Еластичен модул при опън	E_f	60000 [MPa]	60000 [MPa]
Максимална деформация за ULS	ϵ_{fd}	7,4‰	6,1‰

Видно от таблицата, че се работи с по-ниски характеристики при статически неопределимите конструкции – заради очакваното преразпределение на усилията в конструкциите, се работи консервативно с оглед на крехкото разрушение на сеченията.

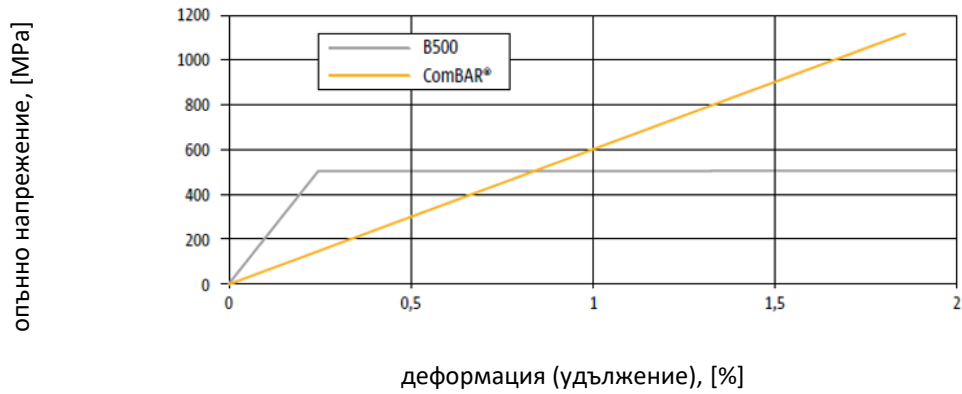
Таблица 6. Характеристики за огънати пръти, дадени от Производител – нямат одобрение в Германия [5]

		Статически определими системи	Статически неопределими системи
Характеристична дългосрочна якост на опън	f_{fk}	250 [MPa]	208 [MPa]
Изчислителна дългосрочна якост на опън (с $\gamma_s=1,3$)	f_{fd}	192 [MPa]	160 [MPa]
Еластичен модул при опън	E_f	50000 [MPa]	50000 [MPa]
Максимална деформация за ULS	ϵ_{fd}	3,8‰	3,2‰

Таблица 7. Необходимо минимално бетонно покритие, данни от Производител [5]

Номинално бетонно покритие c_{nom} , [mm] за пръти „Combar“						
ϕ , [mm]	8	12	16	20	25	32
молитни конструкции	18	22	26	30	35	42
сглобяеми елементи	13	17	21	25	30	37
Минимално бетонно покритие за пожароустойчивост						
R30	30 mm - за всички диаметри					
R60	50 mm - за всички диаметри					
R90	65 mm - за всички диаметри					
R120	85 mm - за всички диаметри					

На фиг. 6 може да се сравнение в работните диаграми (зависимост: „напрежение-деформация“) за полимерна и армировъчна стомана:



Фигура 6. Сравнение на работна диаграма на полимерен прът, с тази на армировъчна стомана B500 [5]

Проверка за елементи, които не изискват армировка за срязване:

$$V_{Rd,ct} = \frac{0,138}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{E_f}{E_s} \cdot f_{ck} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

Проверка за минимално количество армировка за правоъгълно сечение (минимален процент на армиране):

$$A_{f,min} = \frac{M_{cr}}{\sigma_f \cdot Z} = \frac{f_{ctm} \cdot W_c}{\sigma_f \cdot Z} \quad (2)$$

$$\sigma_f = 0,83 \cdot f_{fk} = 481 \text{ MPa} \quad (\text{съгласно Немско одобрение AbZ, различно от EC2}) \quad (3)$$

Изчислителна дължина на закотвяне:

$$\ell_{b,rqd} = \frac{\phi \cdot \sigma_f}{4 \cdot f_{bd}}, \quad (4)$$

където $f_{bd} = 445 \text{ MPa}$.

Таблица 8. Напрежения на сцепление f_{bd} ,
съгласно Немско одобрение (AbZ Z -1.6-238) - [5]

	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
Добри условия	1,45	1,77	2,03	2,26	2,33	2,39	2,45	2,51	2,58
Лоши условия	1,09	1,32	1,53	1,78	2,01	2,23	2,34	2,46	2,58
	$f_{bd}, [\text{MPa}]$								

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За момента в Европа няма единен Стандарт за проектиране, който може да се ползва от различните страни-членки, в това число и България. Някои от държавите в Евросъюза имат различни номенклатури, позволяващи употребата на полимерна армировка на местно ниво. В много развити страни, като: САЩ, Канада, Китай, Япония и други, този тип армировка се използва и продължава да навлиза все повече в тяхната практика и норми, като за някои съоръжения: при брегови зони, подземно строителство и такива, съхраняващи специални оборудвания и най-специалното е, че полимерната армировка замества все повече конвенционалната армировка.

Предимствата ѝ, като по-ниска цена (само за тази със стъклени нишки) и това, че не корозира, и е по-лека и лесна за монтаж, както и непроводимостта ѝ на електричество, са безспорни. България силно изостава в тази област на развитие, респ. приложение. Нашата страна и строителният бранш само ще спечелят от развитието и внедряването на този тип армировка. Това изисква ясни планове и инвестиции, които в бъдеще време многократно ще се възвърнат.

С цел изясняване на някои основни параметри при армиране с полимери, се подготвят експериментални образци за лабораторни тестове.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ACI 440.1R-15 Guide for the design and Construction of structural Concrete with Fiber-Reinforced Polymer Bars. 2015.
- [2] DIBT, Zulassungsstelle fuer Bauprodukte und Bauarten, Bautechnisches Pruefamnt. 8/06/2019.
- [3] AASHTO GFRP-Reinforced Concrete Design Training
- [4] Technische Information – Schoeck Combar, 03/2017
- [5] Design Guideline for Combar reinforced concrete acc. to Eurocode 2 04/2016.