

Получена: 15.09.2017 г.

Приета: 27.11.2017 г.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА УСИЛЕНИ ЗИДАНИ АРКИ, ЧРЕЗ GFRP

Е. Абдулахад¹, Й. Ценкова²

Ключови думи: зидани дъги, усилване, GFRP

РЕЗЮМЕ

Дъговите зидани елементи са характерен конструктивен елемент за много черкви, манастири и други зидани конструкции на територията на Р България. Поради различни причини, представители на дъговите конструкции се компрометират и са застрашени от разрушение. Това налага да бъдат взети адекватни и навременни мерки за тяхното укрепване. Актуален и лесно приложим метод за усилване на тези елементи е усилването с композитни материали.

Настоящата статия представя резултатите от експериментално изследване на поведението на дъгов, зидан елемент, преди и след усилване с композитен материал (GFRP).

1. Въведение

Употребата на дъгови зидани елементи е характерна за много сгради и исторически и културни центрове не само в България, а също и в Италия и Европа [1]. Някои от тях са изградени, без да бъдат правени предварителни изчисления за тях или пък не са предвидени за подобен род натоварвания. Това диктува необходимостта от изследване на възможностите за конструктивно усилване на тези елементи.

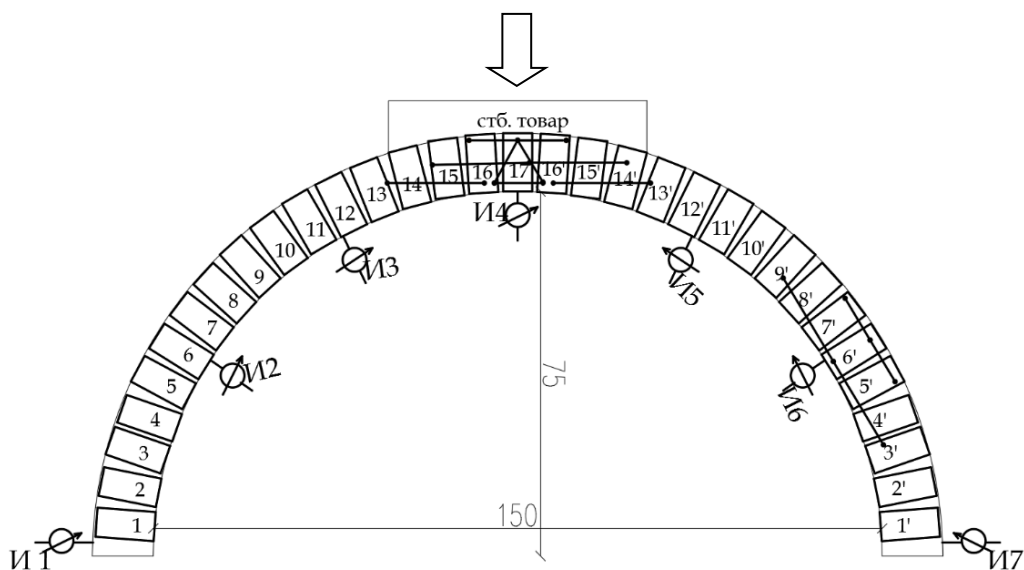
¹ Емад Абдулахад, доц. д-р инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: georgosing@gmail.com

² Йолина Ценкова, инж., УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: jolina_cenkova@abv.bg

Предимствата на композитните материали (FRP) – малко тегло, голямата опънна якост, технологичност на изпълнение, както и търсенето на нови ефективни и алтернативни варианти за усиление на зидани дъгови елементи, довеждат до провеждането на много експериментални и научни изследвания, касаещи поведението на усилените посредством FRP зидани дъги. Изследванията доказват, че тези елементи могат да бъдат успешно усилявани с композити, които увеличават няколко пъти носещата способност и предотвратяват типичното за тях крехко разрушение, проявяващо се в следствие на образуване на механизъм от пластични стави [1].

2. Опитна постановка, изпитвателна схема и измерително оборудване

За тухлените опитни образци е избрана типичната за римските дъгови конструкции форма полуокръжност (фиг. 1). Избраната статическа схема на експерименталния модел е запъване в двата края. Опорното устройство на зиданата арка е реализирано чрез метални ъглови профили, които са замонолитени посредством силен разтвор на Мегакрет. Деформациите на елемента се контролират чрез механични часовникови индикатори Mitutoyo – 7 бр. с точност 0,01 mm, разположени по схема на фиг. 1, а деформациите между отделни тухлени блокчета се контролират посредством метални марки, разположени в характерни места и деформометър.



Фиг. 1. Геометрични характеристики на експерименталния модел и схема на разположението на измерителната апаратура по време на опитното изпитване

Чрез хидравличен крик е реализирано опитното натоварване, приложено в средата на отвора и равномерно разпределено посредством стоманобетонна разпределителна шапка и метална планка, разположени върху седемте най-горни зидарийни тела. Между опитния образец и стоманобетонната разпределителна шапка умишлено е поставена изолация, за да бъде избегнато съвместното им действие.

3. Резултати от опитното изследване на тухлена арка

3.1. Характеристики на вложените материали

Подготвени са стандартни експериментални тела за определяне на якостта на натиск на зидарийните тела (фиг. 2) – 23,7 МПа, както и за якостта на натиск на вароциментовия разтвор (фиг. 3) – 4,15 МПа.



Фиг. 2. Опитни образци за определяне на опитните характеристики на зидарийни тела



Фиг. 3. Опитни образци за определяне на характеристиките на разтвора

Избраната усилована система е композитен материал на база стъклени нишки, импрегнирани с двукомпонентна епоксидна смола. Характеристиките на усиловащата система са посочени в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики на усиловащата система

Стъклени нишки		Епоксидна смола	
Якост на опън f_{fib}	2200 МПа	Модул на еластичност при натиск (EN 13420)	2600 N/mm ²
Модул на еластичност на нишките E_{fib}	73 GPa	Якост на опън (ASTM D638)	44,6 МПа
Гранична деформация	3,5%	Удължение до разрушаване	1,7%
		Якост на натиск (ASTM D695)	90 МПа
		Модул на еластичност (ASTM D790) E_{fib}	2500 МПа

3.2. Преди усиловане

Натоварването е реализирано на степени през 50 kg, без отчитане на теглото на стоманобетонната разпределителна възглавница. В началните степени деформациите в елемента са малки и не се наблюдава поява на дефекти.

При товар от 300 kg в ляво се отваря пукнатина в разтвора между 7 и 8 тухла и две пукнатини в разтвора около тухли 13' и 14', т.е. около края на разпределения товар. При товар от 350 kg тухли 7' и 8' се отделят по разтвора между тях, образува се и пукнатина в зоната на опората. Механизмът на разрушение е симетричен.



Фиг. 4.
Пукнатина между тухли 7' и 8'

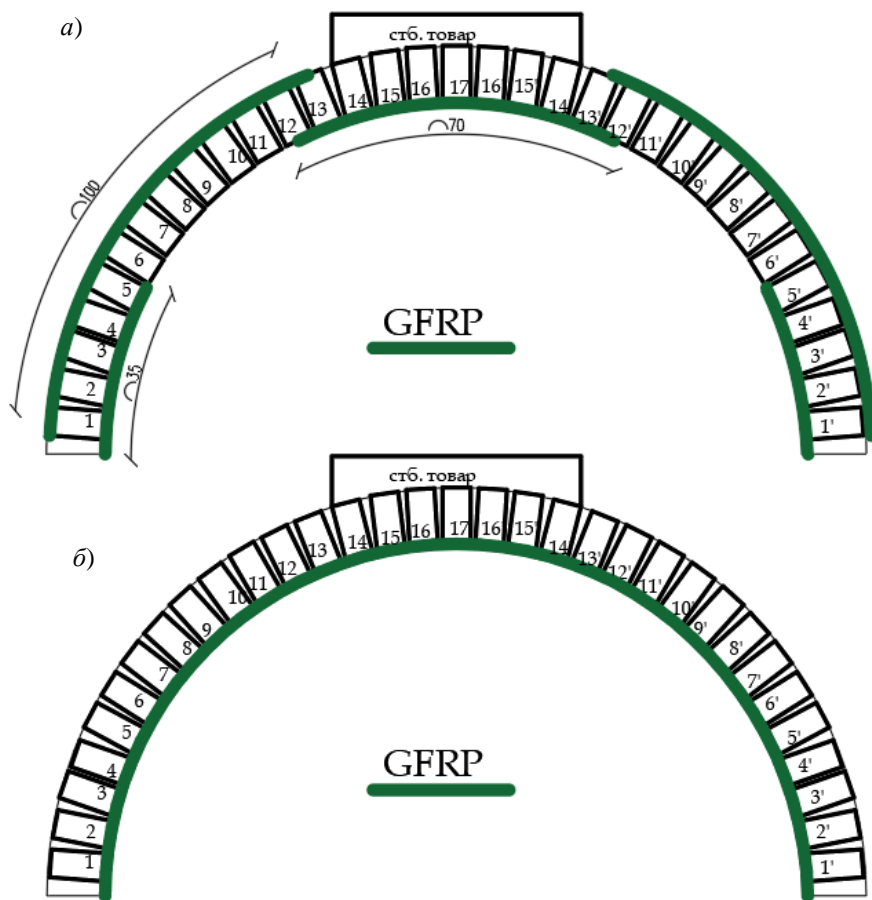


Фиг. 5.
Пукнатина в опора

3.3. След усилване

В съответствие с критериите за минимално увеличаване на собственото тегло на усилвания елемент е взето решение дъговият елемент да бъде усилван чрез GFRP (влакнесто армиран полимер, армиран със стъклени нишки).

За усилване на елемента са избрани две системи на усилване, показани на фиг. 6.



Фиг. 6. Схеми на усилване на зиданата дъга:
 а) Схема 1; б) Схема 2

3.3.1. Резултати от експерименталното изследване на поведението на зидана дъга, усилена по схема 1

Разположението на усилващия плат в първата система е избрана в съответствие с моментова диаграма на елемента, а при втората схема е избрано по-лесно приложимото едностранно апликиране на усилващата система от вътрешната страна.

Отворилите се пукнатини след първоначалното изпитване на неусиления елемент са почистени и инжектирани с епоксидна смола, за да се създаде връзка между разделените се зидарийни тела. Повърхността на елемента е обработена с шпакловка на база двукомпонентна епоксидна смола за отстраняване на неравности. Характерно свойство за нея е, че прониква дълбочинно в зидарията, което осигурява освен добрата връзка между усилвания елемент и усилващата система, но и отлична връзка между зидарийните тела и разтвората.

При експерименталното изследване на усилен по схема 1, елементът е натоварен на степени от 50 и 100 kg до 5 t. При втория етап от изследването на елемента се наблюда-

дава значително увеличаване на приложеното натоварване и не се наблюдават признаци на поява на дефекти на усиления елемент.

Усилващата система GRFP поема изцяло опънните напрежения, породени от огъващите моменти и води до приближаване на натисковото усилие към ядрото на сечението, това равновесие на вътрешните сили позволява неколkokратно увеличаването на приложеното натоварване.

Опънните напрежения се поемат изцяло от усилящата система, при нарастване на натоварването се увеличава и осовата сила в елемента и сечението работи на натиск, поради добрата съвместна работа на усилящата система и усиления елемент.

3.3.2. Резултати от експерименталното изследване на поведението на зидана дъга, усиlena по схема 2

Изпълнен е втори вариант на усиляне на зидания елемент, в който е отстранен усилящият плат в зоната на разтвора между зидарийните тела, от изпъкналата част на елемента, това е направено с цел да се редуцира действието на усилящата система от изпъкналата част на дъговия елемент. Вдлъбнатата част на елемента е изцяло шпаклована и е усиlena с усилящ плат от еднопосочни стъклени нишки.

Проведено е експериментално изследване на поведението на усиления елемент като е избрана стъпка на натоварване 100 kg. При натоварване от 2,200 t се отваря малка пукнатина в разтвора в опънна зона (изпъкнала част) между тухли 5' и 6' в зоната около 1/4 от отвора на дъговия елемент. При следващите степени на натоварване се наблюдава отваряне на микропукнатини в зоната под концентрирания товар, а също и в зоната на 1/4 от отвора (тухли 5 и 6) от другата страна на първообразувалата се пукнатина отново в зоната на разтвора между зидарийните тела. Признак на разрушение на усиления елемент се проявява при реализиран товар от 3,100 t, когато пукнатината по разтвора между тухли 5' и 6' преминава непрекъснато по цялата дължина на фугата (фиг. 7).



Фиг. 7. Признак на разрушение



Фиг. 8. Отлепване на GRFP системата

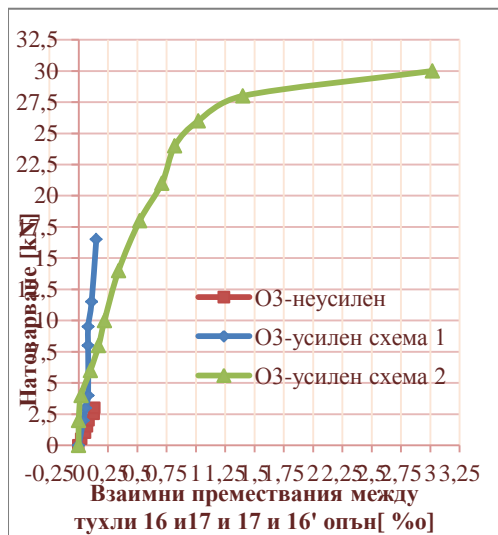
Натоварването на дефектирания елемент продължава, като целта е да бъде проучено поведението на дъговия елемент след признак на разрушение, да бъде установен механизъм на разрушение и дали има риск от внезапно/крехко разрушение на конструкцията. Натоварването продължава до степен 3,950 t, когато усилящият плат в средната зона напълно се отлепя (в зоната на тухли 15, 16, 17, 15' и 16') (фиг. 8). Дъговият елемент не се разрушава внезапно, а се задържа благодарение на усилящата система.

3.3.3. Сравнение и анализ на получените резултати отпреди и след усилване на елемента по двете различни схеми

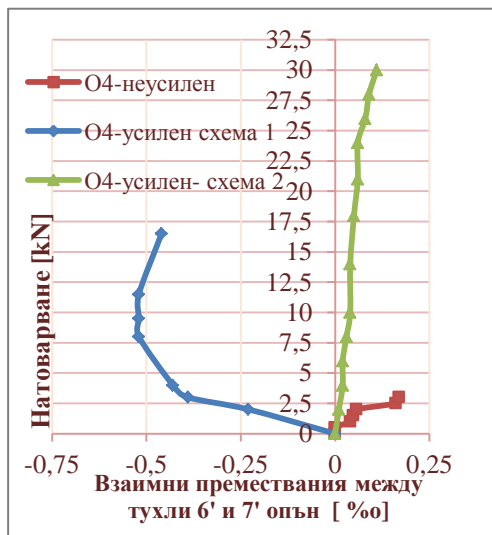
Сравнителните графики показват, че и двете усилващи системи значително намаляват преместванията на характерни точки от елемента, в сравнение с неусиления елемент.

При първата усилваща система се наблюдава еластично поведение на елемента. Усилващата система поема опънните напрежения, а зидарията остава да работи на натиск (фиг. 10).

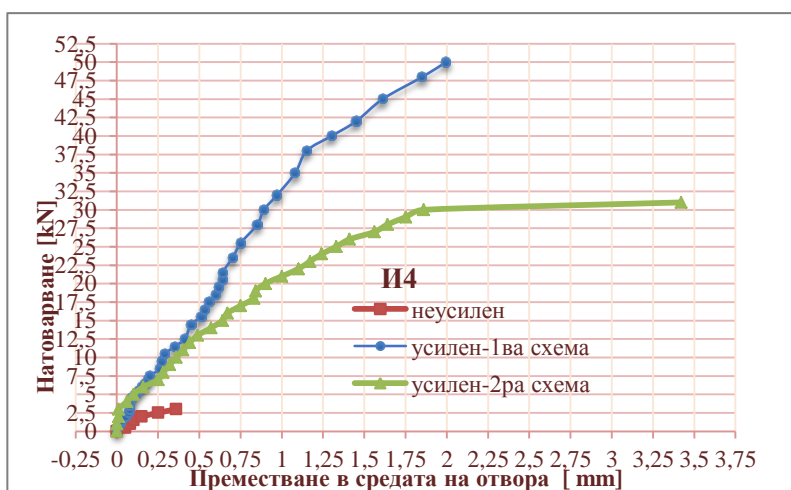
След прилагане на усилващата система по схема 2 се наблюдава преместване в зоната над опорите, особено от едната страна, което не се наблюдава в при предходните етапи на изпитване. Развиват се несиметрични деформации.



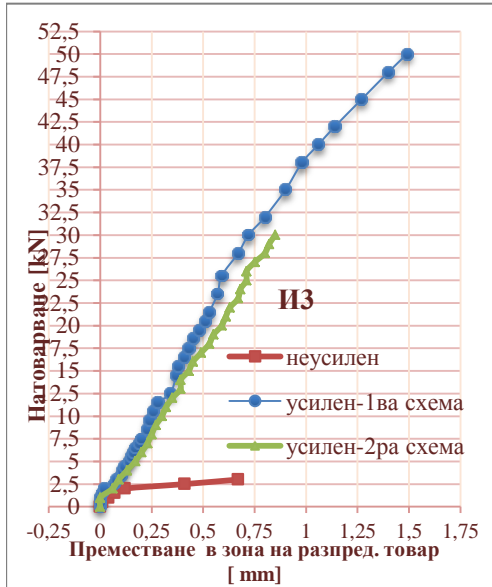
Фиг. 9. Относителни деформации в опънна зона в среда



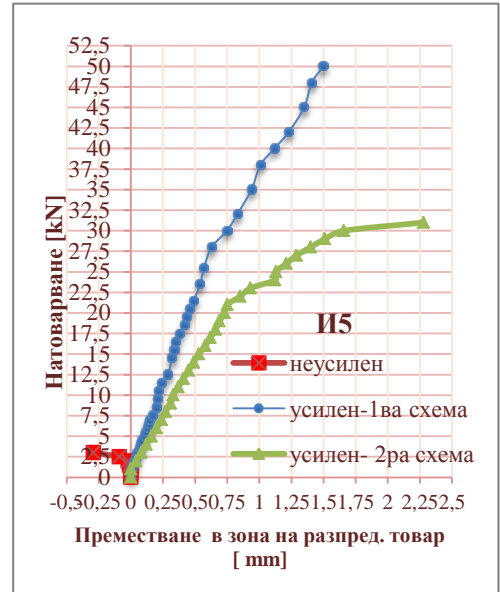
Фиг. 10. Относителни деформации в опънна зона в зоната на 1/4 от отвора



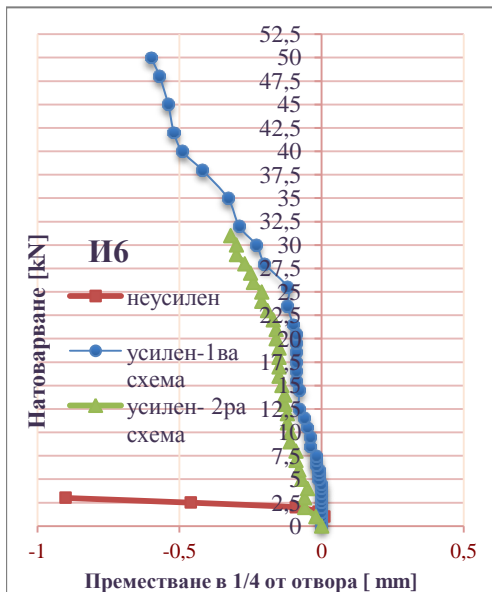
Фиг. 11. Сравнителна графика на преместване в средата на отвора



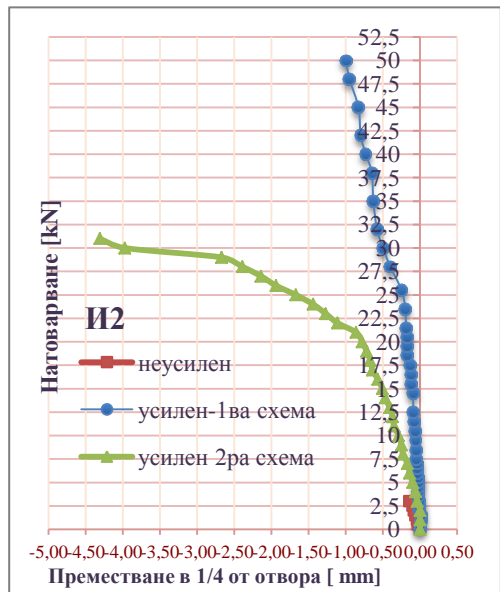
Фиг. 12. Сравнителна графика на преместване, напречно на оста на елемента под разпределения товар



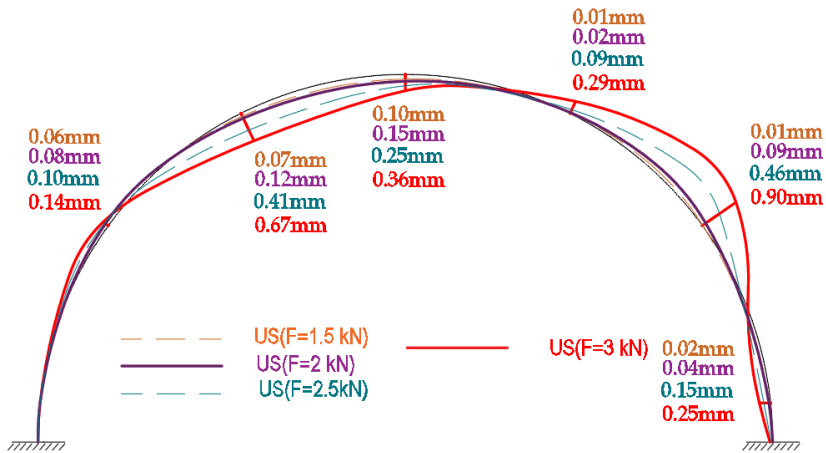
Фиг. 13. Сравнителна графика на преместване, напречно на оста на елемента под разпределения товар



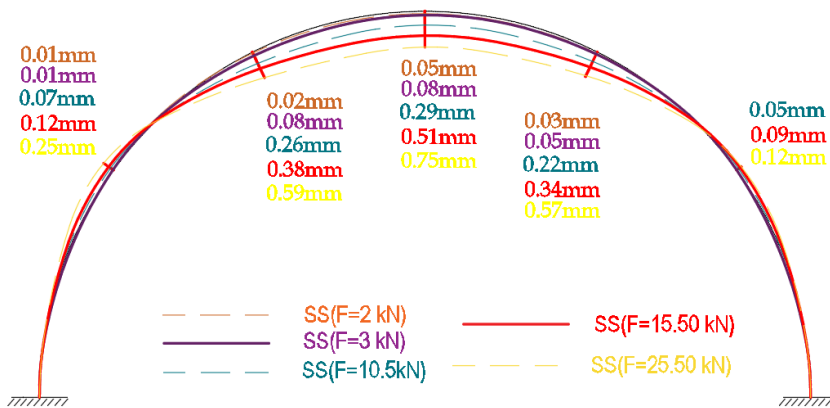
Фиг. 14. Сравнителна графика на преместване на 1/4 от отвора



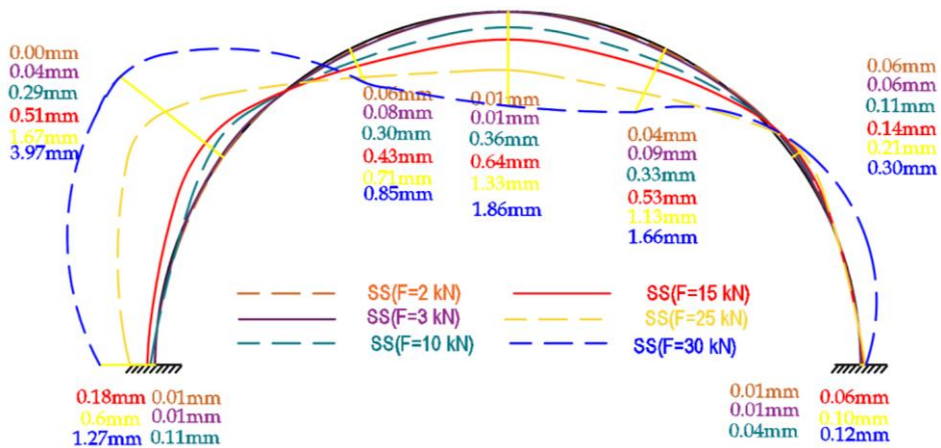
Фиг. 15. Сравнителна графика на преместване на 1/4 от отвора



Фиг. 16. Деформирана схема на неусилен елемент



Фиг. 17. Деформирана схема на дъговия елемент, усилен по схема 1



Фиг. 18. Деформирана схема на дъговия елемент, усилен по схема 2

4. Заключение

В статията е описано експериментално изследване на поведението на зидани арки, усилены с GFRP. В заключение, от проведения анализ могат да бъдат обобщени следните изводи:

- Двете усиляващи системи успяват да възстановят първоначалната носеща способност на елемента.
- При схема 1 на усиляване възникващите опънни напрежения се поемат изцяло от усиляващата система, а натисковата линия се намира около осовата линия на елемента. При увеличаване на приложеното натоварване това равновесие на вътрешните сили се запазва и, поради големите якостни характеристики на усиляващата система, позволява дъгата да бъде натоварена на степени до 5,000 t без появата на дефекти или разрушение.
- Схема две е надеждна от практична гледна точка, увеличава носимоспособността на елемента около 10 пъти.
- При степен на натоварване 3,100 t се появява признак на разрушение в зоната на $\frac{1}{4}$ от отвора (фиг. 7) след което експерименталният образец, продължава да бъде натоварван до 3,900 t когато се отлепва усиляващата система в средата на елемента (фиг. 8), следователно схема 2 за усиляване е надеждна и възпрепятства крехко разрушение и след появата на признак на разрушение.
- Разрушението е вследствие на отлепване на усиляващия плат в средна зона, дължащо се на развиването на пукнатини в двата края на приложеното натоварване.
- Приложената шпакловка от двукомпонентна епоксидна смола прониква дълбочинно в тухлата и разтвора, с което се постига много добро сцепление между усиляващата система и усиления елемент.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Borri, A., Castori, G., Corradi, M.* Mechanical behaviour of brick masonry arches strengthened by GFRP sheet and CFRP plates. 8th International Masonry Conference Dresden 2010.

2. *Димов, Д.* Обследване и изпитване на конструкции и мостове. Издателска къща „ДЛ & М“, София, 2016.

3. *Valluzzi, M. R., Valdemarca, M, Modena, C.* Behavior of Brick Masonry Vaults Strengthened By Frp Laminates. J. Compos. Constr., vol. 5, no. AUGUST, pp. 163–169, 2001.

4. *Sanchez, I. B.* 2007. Strengthening of arched masonry structures with composite materials Refor co de estruturas de alvenaria em arco com materiais compostos. Civil, Engenharia.

5. *Beuerman, T.* “Inventory of Repairing and Strengthening Techniques for Masonry Arch Bridges”. PhD Thesis, 2009.

6. *Rashadul, I.* “Inventory of FRP strengthening methods in masonry structures”. Master’s Thesis, 2008.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTHENING MASONRY ARCHES USING GFRP

E. Abdulahad¹, J. Tsenkova²

Keywords: *arches, masonry, strengthening, Glass fiber reinforced polymers*

ABSTRACT

Arch structures are characteristic structural elements in churches and monasteries in Bulgaria. Due to various reasons, many representatives of these elements are compromised and at risk of destruction. This requires adequate and timely measures for their strengthening. A modern and easy-to-use strengthening method for these elements is the strengthening with composite materials. This paper presents the results from experimental research on the behavior of an unstrengthened and strengthened masonry arch with Glass fiber reinforced polymers (GFRP).

¹ Emad Abdulahad, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: georgosing@gmail.com

² Jolina Tsenkova, Eng., UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: jolina_cenkova@abv.bg