ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СОФИЯ

Том Volume 56 2023 Брой Issue 3

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY SOFIA

Получена: 23.06.2022 г.
Приета: 10.02.2023 г.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОПОРИ НА ОКАЧЕНИ ФАСАДИ, РАБОТЕЩИ ЧРЕЗ ТРИЕНЕ ПРИ ВЪЗДЕЙСТВИЕ ОТ НАПРЕЧНА СИЛА

В. Милков[1], Цв. Георгиев[2]

Ключови думи: *опори за окачени фасади, сегментни анкери, триене, циклично натоварване*

РЕЗЮМЕ

Към настоящия момент в действащите нормативни документи липсва методика за изчисление на опорни възли със сегментни анкери, която да отчита приноса на силата на триене между опорната стоманена плоча и стоманобетоновата основа. Това е една от причините да бъде планиран, финансиран и реализиран научноизследователски проект, основаващ се на експериментални изследвания и насочен към поставения по-горе проблем.

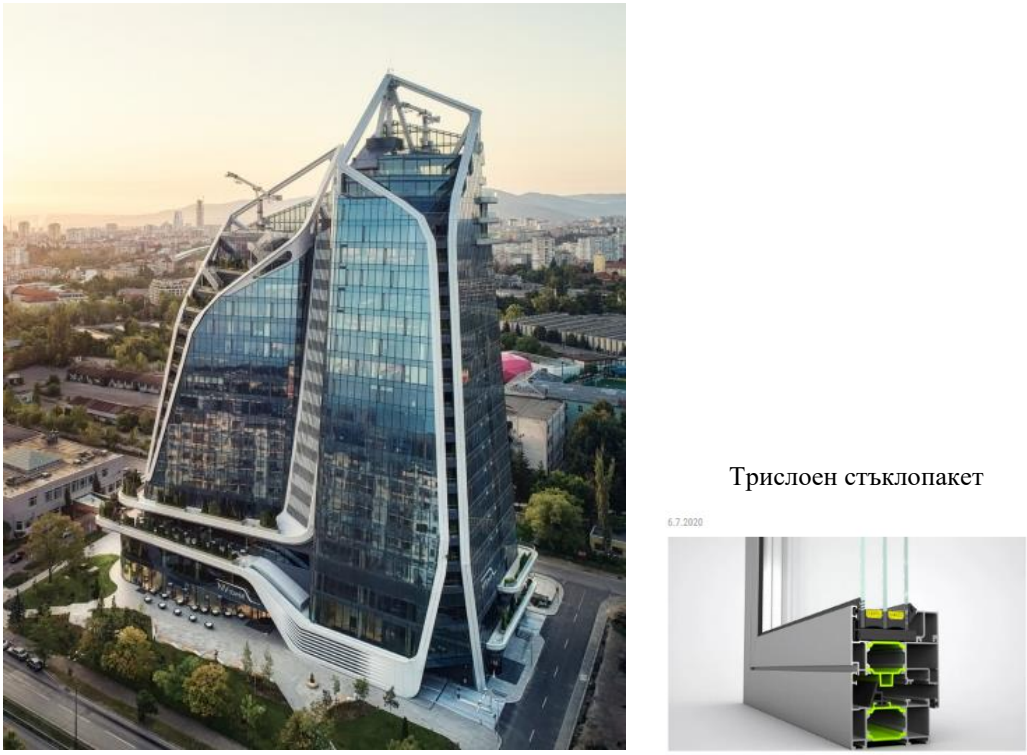
В статията се описват целите и задачите на реализираната експериментална програма, вида на възприетата експериментална постановка, опитните образци на стоманени опори за окачени фасади и техните скрепителни средства, както и получените резултати от експериментите.

Представен е кратък анализ на резултатите, получени по експериментален път. Също така е направено сравнение с резултати, получени по аналитичен път (чрез софтуер от фирма производител). Представени са графики на поведението на фасадните опори. Формулирани са изводи, заключения, както и насоки за следващи подобни изследвания.

[1] Владислав Милков, докторант, кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: vlado_milkov@yahoo.com
[2] Цветан Георгиев, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: cvgeorgiev_fce@uacg.bg

1. Въведение

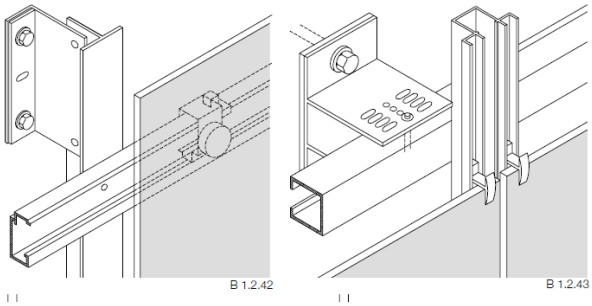
Окачените фасади намират все по-голямо приложение в съвременното градостроителство, като строежите и архитектурните решения стават все по-мащабни и по-сложни. Също така, с повишаването на изискванията за топлоизолация и шумоизолация, стъклопакетите, използвани в окачените фасади, стават по-масивни. В днешно време не е рядкост и прилагането на трислойни стъклопакети. Като резултат фасадите стават по-сложни и по-тежки (вж. фиг. 1), а следователно носещите им профили и техните опори трябва да поемат по-големи вертикални товари.



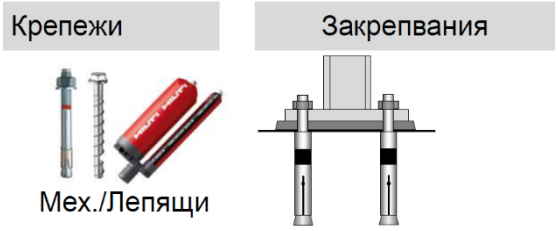
Фиг. 1. Окачена фасада на многофункционална сграда „NV Tower“ в град София [1]

Тази тенденция в развитието на съвременните окачени фасади води до по-големи тегла, респективно сили, които носещите елементи на фасадните конструкции трябва да предадат, посредством фасадните опори, върху носещата стоманобетонна конструкция. Най-често фасадните опори представляват стоманени елементи, съставени от къса конзолна част, опорна стоманена плоча (анкерна плоча) и анкери (вж. фиг. 2). Най-масово прилаганите закрепвания в практиката се основават на съединителни средства от механични или химични анкери, монтирани в предварително пробити отвори в стоманобетонните носещи елементи (плочи, стени, колони).

В практиката, както у нас, така и в Европа, са се наложили решения, разработени от големите инженерингови компании, производители на съединителни средства (крепежи, анкерни закрепвания), каквито се явяват например фирмите „*Hilti*“ и „*Fischer*“ (вж. фиг. 3).



Фиг. 2. Общ вид на масово използвани в практиката опори за окачени фасади [2]

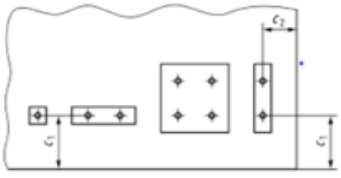


Фиг. 3. Видове анкери и принципна скица на анкерно закрепване [3]

Като е изходено от опита на първия автор от множество проекти в Европа, е изразено становището, че голяма част от т.нар. „утвърдени“ в практиката решения са доста консервативни и не отчитат влиянието на редица съществени фактори. Така например все още не се отчита силата на триене между опорната стоманена плоча и бетона в резултат от предварителното напрягане на анкерите. Предизвикателство в практиката, но също така и поле, което трябва да се изследва, са случаите на анкериране върху стоманобетонни елементи с ограничена достъпност и малки размери (съответно малки ръбови разстояния на анкерите).

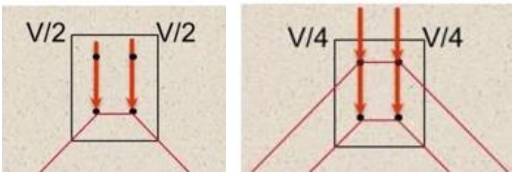
2. Мотивация за изследването

За да се конкретизира нуждата от нови изследвания по проблемите, засегнати в точка 1, е направен детайлен анализ на действащите водещи документи за оразмеряване на анкерни съединения. Предмет на анализа са БДС EN 1992-4 [4] , ETAG 001 [5] Annex C, както и стандарти за проектиране на стоманени елементи БДС EN 1993 [6] и на алуминиеви елементи БДС EN 1999 [7].



Фиг. 4. Базови конфигурации по ETAG 001 за изчисляване на анкери [4]

ETAG 001 [5] е документ (ръководство), който предлага решение за 4 базови конфигурации на анкери (фиг. 4), независимо дали луфтът между анкера и металната плоча е запълнен или не. В случай че анкерната група се намира в близост до ръб на стоманобетонния елемент, при натоварване от напречна сила, тя се поема само от най-близкия до ръба ред анкери. Такова опростяване е много консервативно и често специалистите от практиката прибягват до използване на т.нар. „*Sofa*“ метод, базиран на собствени изследвания на фирма „*Hilti*“. При него луфтът между анкера и металната плоча е запълнен и силата се разпределя поравно между всички анкери, като се правят проверки на разрушение на бетона както за външния ред, така и за вътрешния (фиг. 5). По този метод може и да се оразмеряват и други комбинации анкерни групи.



Фиг. 5. Схеми за разпределяне на напречна сила при проверка за разрушение на бетона близо до ръб, съгласно ETAG 001 и „Sofa“ метод [13]

БДС EN 1992-4 [4] е стандарт, част от групата на Еврокод 2, който от скоро влезе в сила и предлага по-голям обхват за конфигуриране на анкерни съединения. Съединения без запълване на луфта се оразмеряват в познатите 4 конфигурации от фигура 4. Такива в произволна конфигурация (различна от четирите базови конфигурации) и в близост до ръб на стоманобетонената основа се оразмеряват само при запълнени луфтове (между анкера и металната плоча). БДС EN 1992-4 разширява диапазона на якостите на бетона, в сравнение с ETAG 001.

От направения анализ е видно, че и в двата технически документа (БДС EN 1992-4 и ETAG 001) не се отчита силата на триене в резултат от предварителното натягане на анкерите. И двата документа не дават указания за работата на съединението при използване на овални отвори (позволяващи по-големи разместванията на анкерната плоча при монтаж). По тази причина са потърсени сходни изследвания. В по-голямата част от тях се разглежда поведението на открити бази на стоманени колони при натоварване от напречни сили, като съответно анкерите са предварително заложени в стоманобетонния фундамент [8 – 10]. Например в [9] е направено подробно аналитично и експериментално изследване на подобно съединение, където е отчетено триенето между анкерната плоча и подливката. Поведението на фасадните опори с последващ монтаж на крепежи, при наличие на сила на триене, не е добре изследвано и ще бъде тема на настоящия научен труд.

От практическа гледна точка прилагането на овални отвори би улеснило монтажа на опорите при трудно достъпни места от конструкцията, като би позволило да се изберат по-подходящи места за направа на отворите в бетона за монтажа на анкерите. Последното би рефлектирало върху съкращаване на времето за монтаж и е от съществено значение за фирмите изпълнители на фасади.

3. Изследователска задача

На база на анализа от точка 2 е дефинирана изследователска задача, която е насочена към оценка на влиянието на триенето между опорната стоманена плоча и

стоманобетоновата повърхност и особеността от прилагане на овални отвори. Цел в тази задача е получаването по експериментален път на зависимостта сила-преместване (поведението на съединението) и установяването на носимоспособността и коравината на опората. Поради факта, че в опорната плоча има овални отвори, предмет на интерес е поведението на съединението преди и след приплъзването.

Като критерий за експлоатационно гранично състояние е необходимо да бъде дефинирано допустимото преместване на опората. В практиката при проектиране на окачени фасади е прието максималното вертикално преместване на опората в точката на окачване на фасадата да бъде: $Uz = 2L/250 = L/125$, където L е разстоянието от точката на прилагане на силата (мястото на окачване на фасадата) до стоманобетонната основа. Именно подобен критерий е възприет при методиката за експериментално изследване на образците. При L = 130 mm, Uz = 130/125, като с цел улеснение преместването е закръглено на 1 mm.

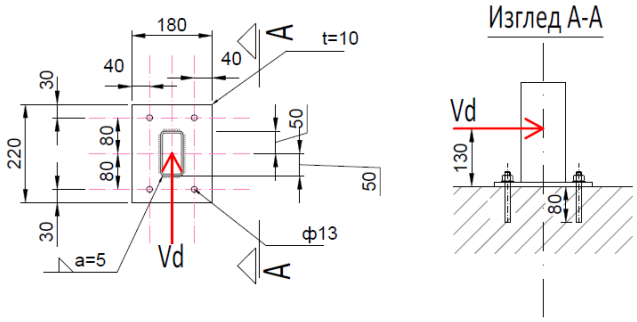
Друг изследователски акцент при експерименталното изследване е прилагането на циклично натоварване за някои образци, за да бъде установено дали има остатъчни премествания при разтоварване на закрепванията.

Също така е подбрана определен вид фасадна опора, която числено е моделирана, за да бъде направено сравнение с резултатите от експериментите.

4. Числено моделиране на анкерно закрепване със специализиран софтуер

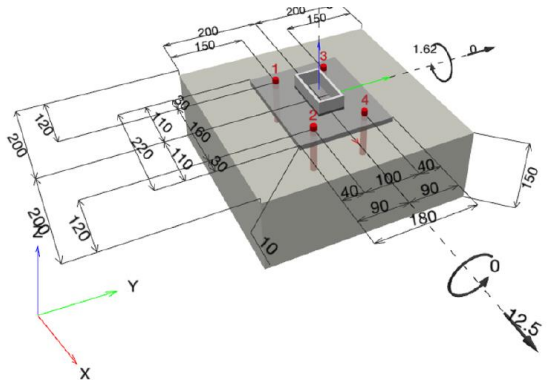
Проектирана е фасадна опора от стомана S235, която представлява конзола (кутиеобразен профил 100×50×5 mm), свързана посредством ъглов заваръчен шев към анкерна плоча 10×180×220 mm. Опората е свързана с 2×2 механични анкера към слабоармиран бетонен елемент с размери 400×400×150 mm (фиг. 6). Бетонът е клас C25/30 и е приет за ненапукан. Приложена е напречна сила V_d = 12,5 kN в точка, намираща се на 130 mm над опорното сечение. По този начин се симулира окачване на фасадата, отдалечено на 130 mm от повърхността на бетона. Огъващият момент в опорното сечение е M_d = 12,5.0,13 ≈ 1,6 kNm. В случая V_d и M_d са изчислителни стойности на опорните реакции в опората от въздействия за крайно гранично състояние ($V_d = \gamma_Q \psi_i V_k$) [11].

Избрани са механични сегментни анкери HST3 M12, с ефективна дълбочина на закотвяне в бетона h_{eff} = 80 mm. Анкер HST3 M12 е аналог на болт с клас на якост 8.8, т.е. стоманата, от която е изработен анкерът, има номинална якост на опън 800 MPa и граница на провлачане 640 MPa [12].



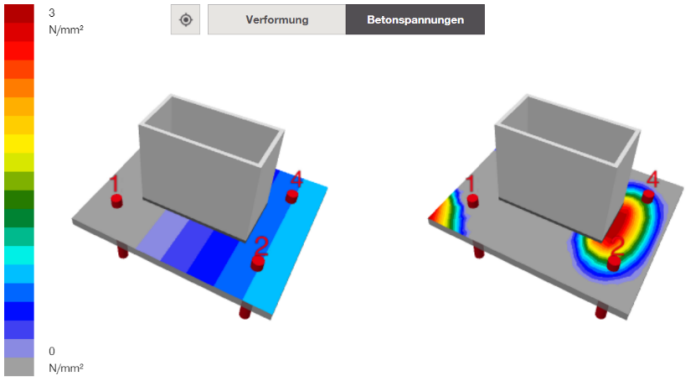
Фиг. 6. Схема на анкерното закрепване и схема на натоварването

Подбраната фасадна опора е моделирана посредством приложно ориентиран софтуер на фирма „Hilti“ [13], където за анкерните плочи и конзола е използван методът на крайните елементи. Стоманобетоновата основа е приета за еластично тяло според БДС EN 1992-4, т. 6.2, с модул на еластичност 30 000 N/mm^2. При натоварване от огъващ момент се формират т.нар. опънна и натискова зона. Силите в опънната зона се поемат от реда анкери 1 и 3 (фиг. 7), които са моделирани като неподвижни ставни опори и съответно напрягащата сила в тях не се отчита. С получените опорни реакции са направени оразмерителните проверки на опората по изчислителните методи на БДС EN 1992-4 и БДС EN 1993.



Фиг. 7. Изчислителен модел на фасадното закрепване

Изчислени са усилията в анкерите и натисковото напрежение в бетона под натисковата зона на анкерната плоча. Представени са резултатите от изчислението с безкрайно корава анкерна плоча, като и такава, която отчита реалната огъвна коравина по МКЕ (фиг. 8).



Анкер N°	∞ корава анкерна плоча	Анкерна плоча с реална коравина, моделирана чрез МКЕ
1	6,1 kN	8,0 kN
2	0	0
3	6,1 kN	8,0 kN
4	0	0

Фиг. 8. Напрежения в бетона и опънни усилия в анкерите

Резултатите от оразмерителни проверки на анкерите (проверки за изтръгване, опън и срязване на стоманата), разрушение на бетона (конусовидно, близо до ръб) по БДС EN 1992-4 и БДС EN 1993-1-8 са представени в таблица 1. Както се вижда от резултатите, проверките за опън (55 % < 100 %) и напречна сила (71 % < 100 %) са удовлетворени, а при проверката за комбинираното действие на силите (опън и напречна сила) е достигнат коефициент на използваемост 1,0 (т.е. 100 %).

Таблица 1. Оразмерителни проверки, получени със софтуер [11]

Вид натоварване	**Вид разрушение / изчерпване на якост**	**Процент на използваемост при крайно гранично състояние**
Опън	стоманен анкер (проверка на сечението на якост)	25 %
	бетон (конусно разрушение около анкер)	35 %
	изтръгване на анкер	43 %
	бетон (разцепване около анкер)	55 %
Напречна сила	стоманен анкер (проверка на сечението на якост)	12 %
	бетон (обрушване на ръб по посока на силата)	71 %
Комбинация (опън + напречна сила)	стоманен анкер (проверка на сечението на якост)	8 %
	бетон	100 %

По-подробно тази проверка е разгледана в т. 6, където е изчислено приведеното външно натоварване за най-подходящо сравнение на числените и експерименталните резултати.

5. Експериментални изследвания и анализ на резултатите

5.1. Предварителни изпитвания

Проведени са някои експериментални изпитвания в „Лаборатория по строителни материали“ на катедра „Строителни материали и изолации“, като подготовка за планирането на основните експерименти в рамките на [14]. Целта на тези тестове е да се избере подходящ вид анкери и също така да се определи точната якост на бетона използван за производството на стоманобетоновите елементи за основните експериментални изследвания.

Направени са изпитвания (фиг. 9) с механичен анкер HST3 M10 на чист опън в стандартни кубчета от бетон (които бяха налични в лабораторията) 15×15×15 cm, бетон клас C 50/60, дълбочина на анкериране h_{eff} = 55 mm. Поради сравнително лесния монтаж и добрите резултати, доказани от изпитването (в случая разрушението е разцепване на бетона и изтръгване на анкер), се реши основните изпитвания да бъдат с механични анкери тип HST3.

Фиг. 9. Изпитване на механичен анкер HST3 M10 на чист опън в стандартно кубче от бетон

За целите на основни експериментални изследвания (вж. т. 5.2) са проектирани, изпълнени и доставени стоманобетонни елементи с размери 400×400×150 cm (фиг. 10), които са използвани за основа на стоманените конзолни закрепвания.

От бетона за тяхната изработка са взети стандартни кубчета (15×15×15 cm) и получените резултати от тестовете за якост на натиск на 28-ия ден на са следните:

- Образец 1: m_1 = 8000 g, $F_{ck,1}$ = 37,2 MPa.
- Образец 2: m_2 = 8030 g, $F_{ck,2}$ = 36,0 MPa.
- Образец 3: m_3 = 8000 g, $F_{ck,3}$ = 36,3 MPa, където m е масата, а F_{ck} кубовата якост на съответния образец.

Стандартни кубчета за зпитване на якост на натиск

Фиг. 10. Производство (кофраж и армировка) на стоманоб. образци от бетон C25/30

5.2. Основни експериментални изследвания

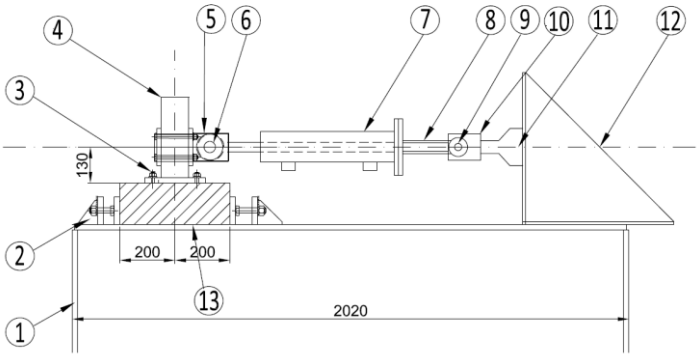
Въз основа на числено моделиране (т. 4) и предварителните изпитвания (т. 5.1) са планирани основните експериментални изследвания, които се провеждат в „Учебната

и научноизследователска лаборатория“ (УНИЛ) на катедра „Метални, дървени и пластмасови конструкции“ към СФ на УАСГ. За целта е проектирана експериментална постановка (фиг. 11), състояща се от стенд, натоварваща система, експериментален образец и система от датчици за регистриране и записване на данните от експериментите.

Натоварващата система представлява хидравлично бутало, свързано неподвижно към опората на стенда (стоманена греда с 2Т сечение). Експерименталният образец (стоманобетонов елемент + анкерирано фасадно закрепване) е свързан също неподвижно за стенда чрез система от ребра и шпилки. Буталото е свързано с металната конзола на фасадното закрепване посредством съединителен елемент (система от плочи и шпилки). Натоварването се получава чрез увеличаване на налягането в хидравличния цилиндър посредством ръчна помпа. Следва да се отбележи, че бе отчетен опитът от подобни експерименти на подобен стенд за друг научен проект [15] за изследване на анкерни устройства за катерещи се кофражи по методика на ETAG 001, Annex A [16].

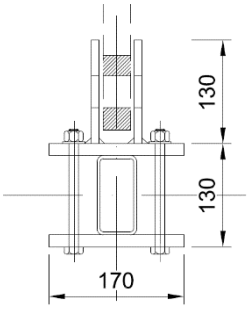
Предмет на измерване са: хоризонталното преместване в точката на прилагане на натоварването, хоризонталното преместване на анкерната плоча, вертикалното преместване в анкерите и стойността на приложената сила. Експериментът се провежда до пълно разрушение на анкерното съединение. За тази цел са монтирани 4 датчици за преместване (фиг. 12) и един датчик, който измерва налягането (посредством което се пресмята силата) в хидравличния цилиндър. Датчиците са свързани към регистрираща система за запис и обработка на данните и компютър със специален софтуер.

При експеримент № 4 е измервана и силата в опънните анкери посредством два допълнителни датчика (т. 5.3.2).

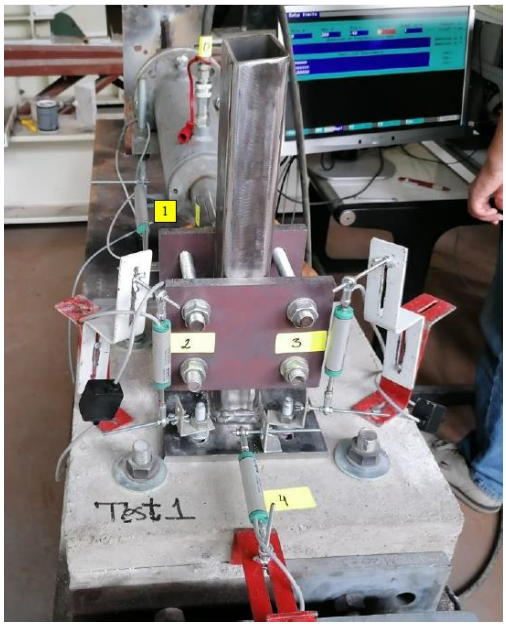


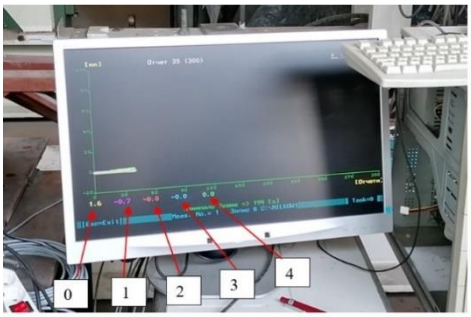
	Легенда
1	Стенд - Стоманена греда, Фланш t=20mm
2	Система от ребра и болтове за стабилизиране на стоманоб. образец
3	2x2 Механични анкери HST3 M12
4	Фасадно конзолно закрепване - експериментален образец
5	Съединение "експериментален образец - бутало"
6	Щифт d=40mm
7	Хидравличен цилиндър (Натоварваща система)
8	Фланец + щифт с резба + ставно съединение
9	Щифт d=26mm за ставно съединение
10	Съединение "Хидравличен цилиндър - Опора"
11	Метална плоча + щифт с резба
12	Опора на стенд
13	Стоманонетонен образец 400 x 400 x 150 мм

5. Съединение
Конзола – Бутало
Хоризонтален Разрез



Фиг. 11. Експериментална постановка



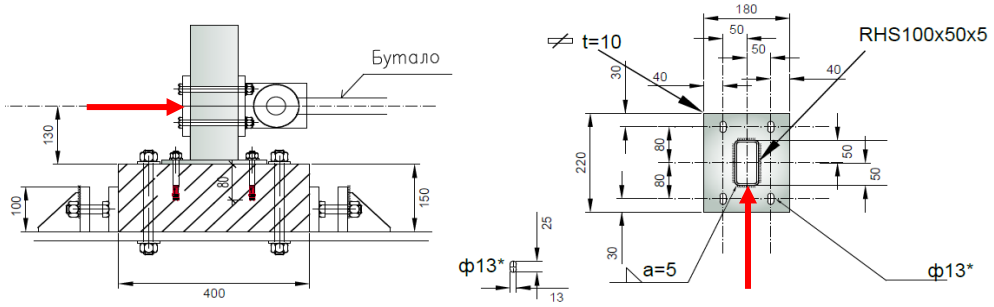


Фиг. 12. Датчици и измервателна система

5.3. Експериментални изследвания и резултати

5.3.1. Фасадно закрепване с овални отвори – Експеримент № 1 и № 2

Изследвано е поведението на две идентични стоманени опори с 4 анкера с овални отвори в анкерната плоча с дебелина 10 mm преди и след приплъзване (фиг. 13). Използвани са анкери 2×2 Hilti HST3 – M12; h_{eff} = 80 mm. Приложен е въртящ момент на натягане (затягане с динамоментричен ключ) на анкерите по каталог от производителя: T_{inst} = 60 Nm.

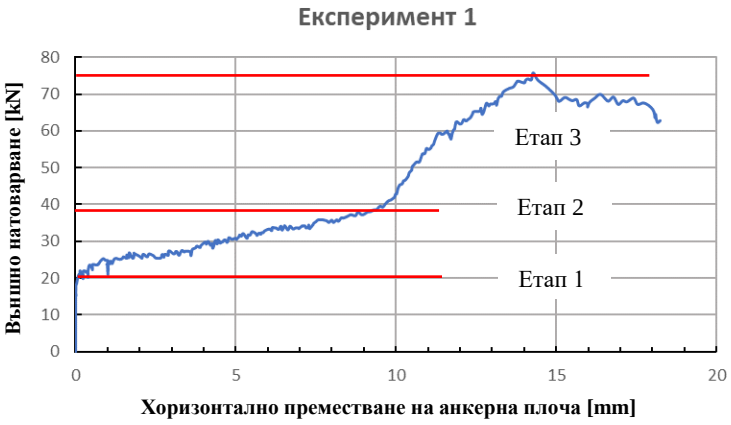


Фиг. 13. Експериментален образец с овални отвори в анкерната плоча

Експериментите са проведени веднага след натягане на анкерите и не е отчетено известно намаляване на опънните сили в тях, което е изследвано в следващите експерименти.

Приложено е монотонно увеличаване на силата (чрез плавно увеличаване на налягането в хидравличния цилиндър). Регистрирани са стойностите на хоризонталното преместване на върха на буталото и анкерната плоча, както и вертикалното преместване в анкерите и стойността на приложената сила. Получените зависимости (сила – преместване) от Експеримент № 1 са показани на фиг. 14 и 15.

Фиг. 14. Хоризонтало преместване на елемент (в точката на натоварване) в зависимост от приложената сила



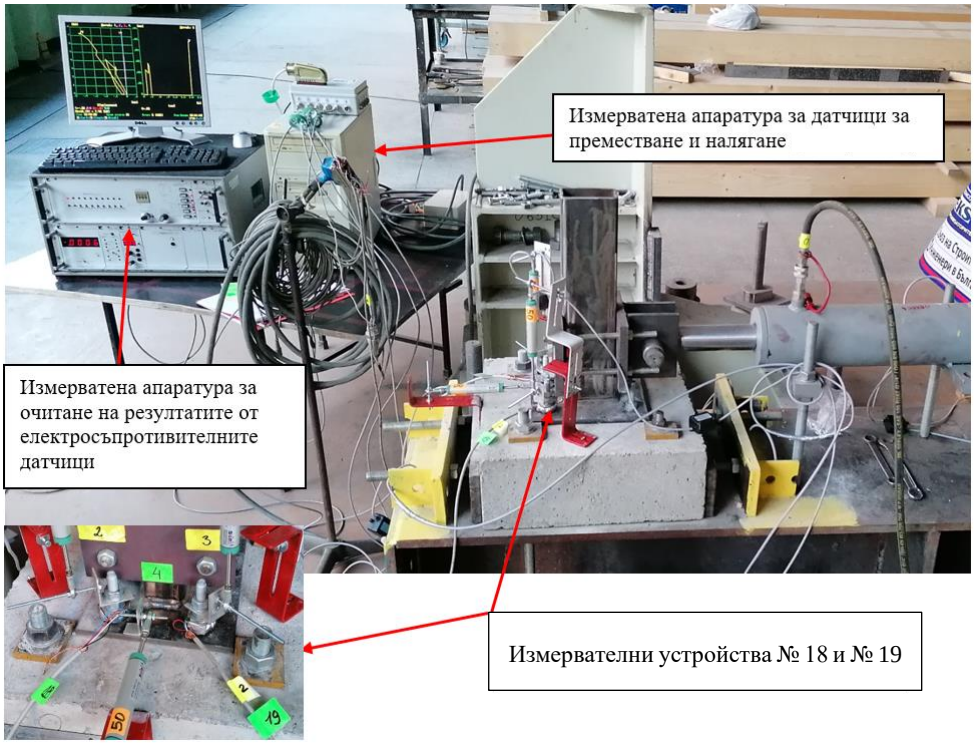
Фиг. 15. Хоризонтално преместване на анкерна плоча в зависимост от приложена сила

Дефинираното гранично преместване в точката на прилагане на силата (вж. т. 4) от 1 mm се достига при външна сила $V = 20$ kN (фиг. 14), а в същия момент анкерната плоча има преместване $U_x = 0{,}23$ mm. До достигане на тази стойност на силата анкерната плоча може да се приеме за неподвижна (силата на триене уравновесява външното въздействие). В следващия етап на натоварване в диапазона от 20 kN до 39 kN анкерната плоча се премества по линеен закон (фиг. 15), до изчерпване на луфта в продълговатите отвори. $U_{x,\max,1} \cong 9$ mm. В третия етап на натоварване от 39 kN до 75 kN анкерната плоча се премества по нелинеен закон, наблюдава се изтръгване на опънните анкери и напукване на бетона.

5.3.2. Фасадно закрепване с нормални (кръгли) отвори – Експеримент № 3 и Експеримент № 4

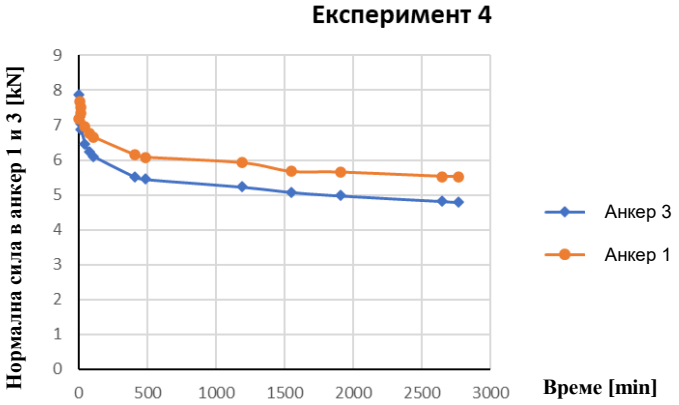
Изследвано е поведението на други две идентични стоманени опори с 4 анкера. Анкерната плоча е с дебелина 10 mm (както при експериментите от т. 5.3.1), но вместо овални отвори са предвидени стандартни (кръгли) отвори с диаметър d = 13 mm. Използвани са отново анкери 2×2 Hilti HST3 – M12; h_{eff} = 80 mm и е приложен въртящ момент за натягане (с динамоментричен ключ) на анкерите по каталог от производителя: T_{inst} = 60 Nm.

Цел на тези експерименти е дефиниране на носимоспособността и коравината на опорите и сравнението на зависимостта „сила-преместване“ с подобните опори от Експеримент № 1 и № 2, които са с овални отвори. Следва да се отбележи, че при Експеримент 4 са монтирани още две измервателни устройства с електросъпротивителни датчици № 18 и № 19 (фиг. 16).



Фиг. 16. Експериментална постановка за експеримент № 4

Анкерите са натегнати с проектния въртящ момент T_{inst} = 60 Nm, а датчиците от дозите измерват в продължение на 45 часа големината на опънните сили в тях. Приложеният въртящ момент, непосредствено след прилагането му, генерира опънна сила в анкерите от около 8 kN, която намалява с времето (фиг. 17). След 45 часа (почти 2 денонощия) опънните сили в болтовете от натягането са $N_{inst,1}$ = 4,8 kN и $N_{inst,2}$ = 5,6 kN и съответно образецът все още не е натоварен с напречна сила. Това означава, че се реализира загуба на опънна сила, като трайната стойност на опъна в анкерите е между 60 % и 70 % от първоначалния.

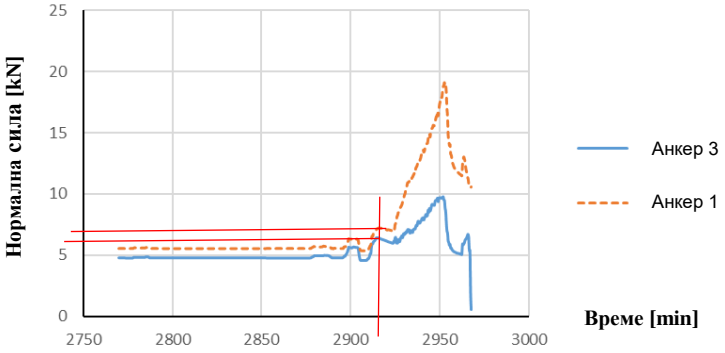


Фиг. 17. Нормална сила в опънни анкери във функция на времето

След като са изчакани първоначалните 45 часа, е приложено циклично натоварване в буталото при следните 4 цикъла на натоварване и разтоварване (фиг. 18).

Фиг. 18. Циклично натоварване на образеца във функция на времето

Същевременно са измерени силите в опънните анкери 1 и 3 отново във функция на времето, изобразени на фиг. 19.



Фиг. 19. Нормална сила в опънните анкери 1 и 3 във функция на времето

Представено е хоризонталното преместване на буталото (фиг. 20) и анкерната плоча (фиг. 21) във функция на приложената сила до пълно разрушение на анкерното съединение.

Фиг. 20. Хоризонтало преместване на бутало в зависимост от приложената сила

От получените графики може се установи, че за разлика от експериментите в т. 5.3.1 (фасадно закрепване с овални отвори) няма изразени етапи преди и след приплъзване на анкерна плоча. Въпреки това, преместване от 1,0 mm в точката на прилагане на силата се получава при 20,5 kN (фиг. 20). За това натоварване са отчетени усилията в Анкер 1 и 3, като са сравнени графиките натоварване-време (фиг. 18) и опънна сила в анкерите-време (фиг. 19): $N_{1,k,eksp.}$ = 7,09 kN, $N_{3,k,eksp.}$ = 6,42 kN.

Фиг. 21. Хоризонтало преместване на анкерна плоча в зависимост от приложената сила в буталото

6. Сравняване на резултати от експериментално и аналитично изследване

Параметрите, които са използвани в сравнителния анализ между експериментално и аналитично изследване, са следните:

✓ Външното натоварване V_k = 20 kN, което предизвиква достигането до гранично преместване (Ux = 1,0 mm) в точката на неговото прилагане (от експеримент № 1). Трябва да се има предвид, че изпитването е направено непосредствено след предварително напрягане на анкерите с проектния въртящ момент.

✓ Външното натоварване V_k = 20,5 kN, което предизвиква достигането до гранично преместване (Ux = 1,0 mm) в точката на неговото прилагане (от експеримент № 4). Уместно е да се припомни, че изпитването е направено 45 часа след предварително напрягане на анкерите с проектния въртящ момент.

✓ При аналитичното решение, максималното външно натоварване, при което е достигнато крайно гранично състояние е V_d = 12,5 kN (от аналитичното изследване по БДС EN 1992-4 [4]). Трябва да се вземат предвид и частните коефициенти за сигурност за определяне на изчислителната якост на бетона ($\gamma_{m,c}$ = 1,5) и стоманата ($\gamma_{m,i}$ = 1,25), защото те влияят върху определяне на носимоспособността на анкерите.

От таблица 1 (т. 3) се вижда, че при проверката за комбинираното действие на опън и срязване при бетона е достигнато крайно гранично състояние: $(\beta N)^{\alpha} + (\beta V)^{\alpha} = 1{,}0$. Това е интерактивният критерий, в който участват носимоспособността на разцепване на бетон около анкер (или анкерна група) при опънно натоварване $N_{Rd,sp}$ (форм. 1, 2 и 3) и носимоспособността за ръбово разрушение на бетона по посока на напречната сила $V_{Rd,c}$ (форм. 5, 6 и 7). С цел яснота оразмерителните проверки по [4] за тези две форми на разрушаване са показани в по-детайлен вид.

$$N_{Ed} \le N_{Rd,sp} = \frac{N_{Rk,sp}}{\gamma_{M,sp}}, \tag{1}$$

$$N_{Rk,sp} = N^0_{Rk,sp} \cdot \frac{A_{c,N}}{A^0_{c,N}} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec1,N} \cdot \psi_{ec2,N} \cdot \psi_{h,sp}, \tag{2}$$

$$N^0_{Rk,sp} = \min\left(N_{Rk,p},\ N^0_{Rk,c}\right), \tag{3}$$

където $N_{Rk,p}$ е характеристичната носимоспособност на изтръгване на анкер, а $N^0_{Rk,c}$ е характеристичната носимоспособност на конусовидно разрушение около анкер;

$A_{c,N}$ – действителна площ на конусно разрушение около анкер (отчита влиянието на група от анкери);

$A^0_{c,N}$ – идеалната площ на конусно разрушение около единичен анкер (фиг. 22).

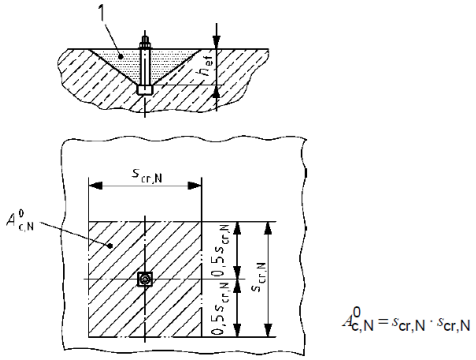
$\psi_{s,N}, \psi_{re,N}, \psi_{ec1,N}, \psi_{ec2,N}, \psi_{h,sp}$ са коефициенти, които отчитат:

$\psi_{s,N}$ – напреженията в бетона в близост до ръб;

$\psi_{re,N}$ – гъстота на армировката;

$\psi_{ec1,N}, \psi_{ec2,N}$ – влиянието на опънното натоварване на цялата фасадна опора върху отделните анкери;

$\psi_{h,sp}$ – влиянието на действителната дълбочина на анкериране.



Фиг. 22. Идеална площ на конусно разрушение около единичен анкер [1]

В случая за анкерна група (анкери 1 и 3):

$$\beta_N = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd,sp}} = 15{,}91/29{,}04 = 0{,}55. \quad (4)$$

Аналогична е проверката за напречна сила:

$$V_{Ed} \le V_{Rd,c} = \frac{V_{Rk,c}}{\gamma_{M,c}}, \quad (5)$$

където $V_{Rk,c}$ е характеристичната носимоспособност на анкерната група при ръбово разрушение на бетона по посока на напречната сила

$$\beta_V = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,c}} = 12{,}5/17{,}746 = 0{,}704. \quad (6)$$

Съответно в комбинираната проверка са заместени гореполучените стойности:

$$\left(\beta_N\right)^{\alpha} + \left(\beta_V\right)^{\alpha} = 0{,}55^{1{,}5} + 0{,}704^{1{,}5} = 1{,}00 \le 1. \quad (7)$$

От представените формули (1) и (5) се вижда, че изчислителната носимоспособност за двете форми на разрушение са в пряка зависимост от стойностите на частните коефициенти за сигурност $\gamma_{m,sp} = \gamma_{m,c} = 1{,}5$. Поради тази причина полученото външно натоварване от аналитичното изследване може да бъде коригирано с $\gamma_m = 1{,}5$, за да може да има съпоставимост за сравнение с експерименталното изследване.

Тогава $V_{d,an.} = 12{,}5.1{,}5 = 18{,}75$ kN (аналитично приведено натоварване). Резултатите от това сравнение са обобщени и представени в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение на критерия за експлоатационна пригодност на фасадно закрепване при експериментално и аналитично изследване

N°	1	2	3
Вид изследване	Експериментално	Експериментално	Аналитично (приведено)
Критично натоварване $V_{kr.}$ (в точка на окачване на фасадата)	20 kN	20,5 kN	18,75 kN

От сравнените резултати в табл. 2 може да се види, че дефинираното гранично преместване U_x = 1,0 mm, което е приетият критерий за експлоатационна пригодност, се достига при сила 20,0 kN и 20,5 kN при експерименталните изследвания и при приведена сила 18,75 kN при аналитичното. Разликата е съответно 7 % и 9 %.

Може да се направи сравнение (табл. 3) между опънните сили в анкери 1 и 3, получени по експериментален начин (Експеримент № 4) за дефинираното гранично преместване от 1 mm и тези от аналитичното решение (т. 4, фиг. 8).

Трябва да се отбележи, че $N_{1,d,an.} = N_{3,d,an.}$ = 8,0 kN са изчислителните стойности на усилията в двата анкера. Разликата с опънните усилия, измерени експериментално, е съответно 13 % и 24 %.

Таблица 3. Опънни усилия в анкери от аналитично и експериментално изследване

Анкер N°	**Опънни усилия ($N_{i,eksp.}$) от екперим. изследване**	**Опънни усилия ($N_{i,d,an.}$) от числено моделиране**
1	7,09 kN	8,0 kN
2	0	0
3	6,42 kN	8,0 kN
4	0	0

7. Изводи и заключения

В рамките на научноизследователския проект [11] подробно е изследвано поведението (зависимостта сила-преместване) и е установена носимоспособността и коравината на стандартен тип фасадно закрепване (с 4 анкера), работещо на триене. Както е описано в изложението на статията, липсва методика за проектиране на подобни съединения в действащите документи ETAG 001 и EN 1992-4, която да отчита триенето. Липсва и решение в наличния специализиран софтуер на фирмите производители на крепежни съединения.

Може да се установи от т. 6, че изследваното фасадно закрепване работи добре на триене. Получената гранична сила от експериментите надвишава силата, получена от числено изследване (софтуер на фирмата производител) със 7 % до 9 %. От експериментите с циклично натоварване се вижда, че няма осезаемо влияние на циклите върху поведението на опорните закрепвания и по-точно до достигането на дефинираното гранично преместване. Не се установиха остатъчни деформации (пълзене на образеца), в периодите на разтоварване и покой.

Тук е уместно да се добави, че този извод се основава на резултатите само от два експеримента. Не е отчетено намаляването на силата от предварителното напрягане на анкерите и други фактори (като грапавост на бетонната повърхност, клас на бетона, влажност на повърхността и др.), които могат да редуцират силата на триене в съединението и съответно да намалят неговата носимоспособност. Също така, действителната якост на бетона, получена при лабораторни изпитвания, е по-голяма от проектната (за бетон С 25/30). Желателно е да се направи изследване с дълготрайно натоварване на закрепването, за да бъде обхванат по-дълъг период, в който влиянието на неотчетените фактори да бъде отчетено.

За по-точни числени резултати е планирано изследването да продължи с моделиране на фасадното закрепване със софтуер с обемни крайни елементи (например ANSYS), където да бъде отчетен нелинейният характер на поведението.

Благодарности

Авторите изказват благодарност към Центъра за научни изследвания и проектиране (ЦНИП) при УАСГ за финансовата подкрепа на настоящата научноизследователска разработка по договор № Д-140/21.

Проектът беше подпомогнат допълнително от фирми „Тал Инженеринг“ и „Hilti Bulgaria“ с консултантска дейност при планиране на експериментите, производство на образци и доставка на материали, според поетите ангажименти за допълнително финансиране. Сърдечно благодарим за тяхната помощ.

Отправяме своите най-дълбоки благодарности и към инж. Огнян Ганчев, експерт към УАСГ-НСЦИ, който реализира това експерименталното изследване и даде много ценни идеи и указания. Благодарим на проф. Димитър Даков и доц. Добромир Динев за методическите указания и за оптимизма, както и на колегите от лаборатория „Строителни материали и изолации“ за провеждането на предварителните експерименти.

ЛИТЕРАТУРА

1. https://buildingoftheyear.bg/bg/buildings/view/1307/NV-Tower.html, poseten na 15.07.2022.

2. *Herzog, Krippner, Lang.* Facade Construction Manual, 2004.

3. Hilti Bulgaria: 2020 Webinar. Osnovni tehnicheski razliki mezhdu ETAG i BDS EN 1992-4 za izchislenie na ankeri.

4. BDS EN 1992-4:2018, Evrokod 2. Proektirane na betonni i stomanobetonni konstruktsii. Chast 4: Proektirane na zakrepvashti ustroystva za izpolzvane v beton.

5. ETAG 001 Annex C: 1997, Metal Anchors for Use in Concrete – Design Methods for Anchorage.

6. BDS EN 1993, Evrokod 3. Proektirane na stomaneni konstruktsii.

7. BDS EN 1999, Eurocode 9: Proektirane na aluminievi konstruktsii.

8. *Gresnigt, A. M., Romeijn, A., Wald, F., Steenhuis, M*. Column bases in shear and normal force, Eindhoven University of Technology, 2008.

9. *Raikov, S*. Izledvane na otkriti bazi na stomaneni koloni pri poemaneto na srqzvashti sili chrez ankernite boltove, Avtoreferat na disertacia, 2015.

10. *Gomez, I., Kanvinde, A., Smith, Ch., Deierlein, G.* Shear transfer in exposed column base plates, American Institute of Steel Construction, 03.2009.

11. BDS EN 1990, Evrokod 0: Osnovi na proektiraneto na stroitelni konstruktsii.

12. Hilti, 2021, HST-3 Expansion Anchor, Technical Datasheet.

13. https://profisengineering.hilti.com/, poseten na 29.10.2022.

14. Tsentar za Nauchni Izsledvaniya i Proektirane kam UASG, 2022, Nauchno-izsledovatelski proekt „Eksperimentalno izsledvane na opori na okacheni fasadi pri razlichni silovi vazdeystviya“. Dogovor № D-140/21.

15. *Nikolov, V., Hrischev, L., Hristov, P.* Eksperimentalna postanovka za izsledvane na ankerni ustroystva za katereshti se kofrazhi, Godishnik na UASG, 2021, 54 (4).

16. ETAG 001. Annex A: Details of Tests. EOTA, 2013.

EXPERIMENTAL STUDY OF A CERTAIN TYPE OF SUSPENDED FACADES SUPPORTS, WORKING BY FRICTION UNDER TRANSVERSE FORCE

V. Milkov[1], Tzv. Georgiev[2]

Keywords: *facade supports, suspended facades, expansion anchors, friction, cyclic loading*

ABSTRACT

At present, there is a lack of methodology in the current codes for calculating support fastenings with expansion anchors, which takes into account the contribution of the frictional force between the steel base plate and the reinforced concrete slab. This is one of the reasons for planning, funding and performing a research project based on experimental study and focused on the above-mentioned problem.

The paper describes the objectives of the adopted experimental program, the type of experimental setup, the prototypes of steel supports for suspended facades and their fasteners, as well as the results from the experiments.

A brief analysis of the experimental results is carried out and a comparison is made with the analytical results obtained through a design software. The experimental curves of the behaviour (force-displacement) of the facade supports are displayed. Findings and conclusions are presented and guidelines for further similar research are given.

[1] Vladislav Milkov, Eng. PhD Student, Dept. "Steel, Timber and Plastic Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: vlado_milkov@yahoo.com

[2] Tzvetan Georgiev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Steel, Timber and Plastic Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: cvgeorgiev_fce@uacg.bg