



Получена: 18.03.2018 г.

Приета: 15.10.2018 г.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗЛИЧНИ ТИПОВЕ СЕИЗМИЧНИ СВЪРЗАЩИ ЕЛЕМЕНТИ В РАМКИ С НЕЦЕНТРИЧНО ВКЛЮЧЕНИ ДИАГОНАЛИ

Б. Ганчева¹, Цв. Георгиев², О. Ганчев³, Ст. Райков⁴

Ключови думи: рамки с нецентрично включени диагонали, къси сеизмични свързващи елементи, стоманени отливки, експериментално изследване, цикличен тест, дуктилност

РЕЗЮМЕ

Рамките с нецентрично включени диагонали в световен мащаб са добре позната и често прилагана конструктивна система, подходяща за райони с висока сеизмична опасност. Целево обособен дисипативен елемент, наречен сеизмичен свързващ елемент, концентрира в себе си пластичните деформации, породени от сеизмичното въздействие. Пластифицирането е ограничено в тази зона, а основните носещи елементи на рамката – колони, греди и диагонали, се проектират за работа в еластичен стадий. В настоящата статия е представено експерименталното изследване на различни видове къси сеизмични свързващи елементи, изследвани изолирано извън рамковата конструкция. Предмет на изследването са три вида сеизмични свързващи елементи, а именно – стоманена отливка, елемент с кутиеобразно сечение и конфигурация от пресичащи се „кокалообразни“ елементи. Последният елемент, наречен още от авторския колектив, „X-link“ е нов тип сеизмичен свързващ елемент, непознат в изследователската общност. Всички елементи са изпитани при квази-статично циклично натоварване до разрушение, като е получена

¹ Бистра Ганчева, докторант инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: bgancheva_fce@uacg.bg

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

³ Огнян Ганчев, ас. инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ganchev_fce@uacg.bg

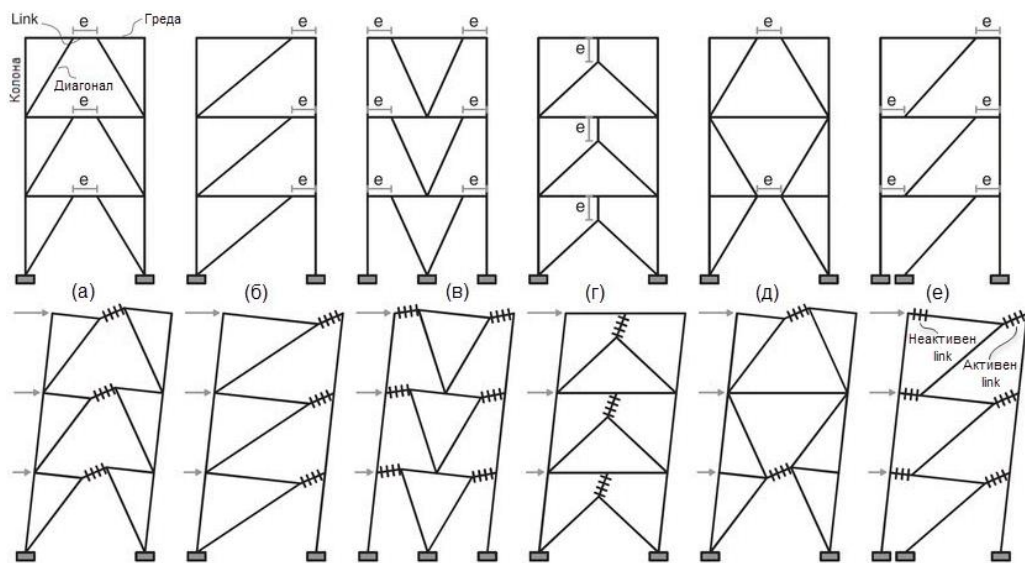
⁴ Станислав Райков, гл. ас. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: raykov_fce@uacg.bg

хистерезисна зависимост „сила-преместване“. Направена е съпоставка на тяхното хистерезисно поведение, анализирани са механизмите на разрушение и са формулирани изводи и заключения от експерименталните изследвания.

1. Въведение

Стоманените сградни конструкции са широко разпространени в практиката поради доброто им дуктилно и произтичащото от него дисипативно поведение вследствие на силни земетресения. В световен мащаб са се наложили няколко основни типа рамки: рамки с корави възли, рамки с центрично включени диагонали (РЦВД), рамки с нецентрично включени диагонали (РНЦВД), рамки от типа „Buckling Restrained Braces“ (BRB). Рамките с нецентрично включени диагонали съчетават голямата еластична коравина на РЦВД и дуктилността и способността за устойчива дисипация на енергия на конвенционалните рамки с корави възли.

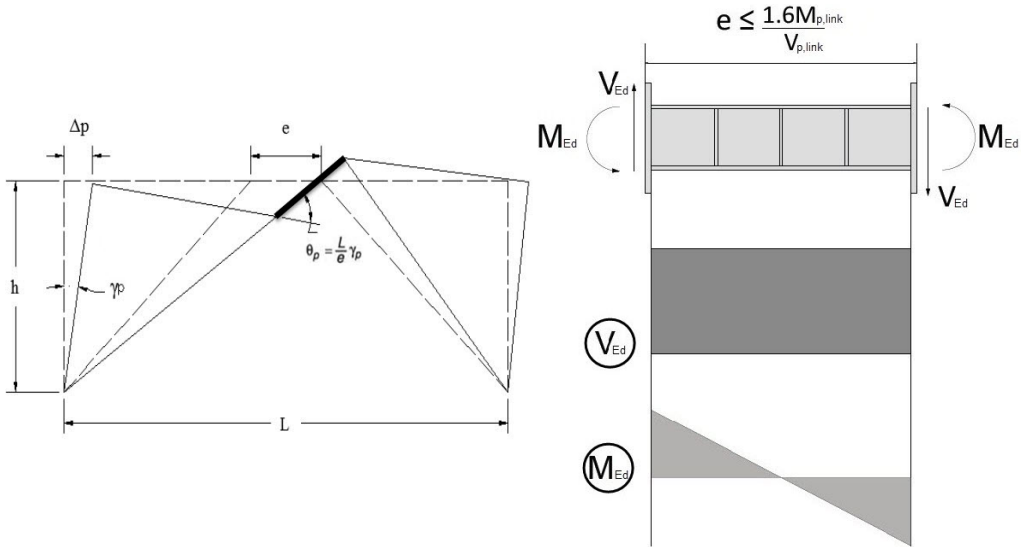
Отличителната особеност на рамките с НЦВД е наличието на т.нар. „link“ или както е наречен в *БДС EN 1998-1* [1] „сеизмичен свързващ елемент“, който по-нататък в изложението ще наричаме „link-елемент“. Това е елемент, който целево се обособява чрез ексцентрично присъединяване на диагоналите към етажната греда. Основните видове рамки от този клас, според конфигурацията на диагоналите им са с: Λ -образна (фиг. 1-а, г), D-образна (фиг. 1-б, е), V-образна (фиг. 1-в) и X-образна (фиг. 1-д).



Фиг. 1. Видове РНЦВД и съответните им деформирани схеми

От друга страна, в зависимост от разположението си „link-елементите“ се делят на: хоризонтални (фиг. 1- а, б, в, д, е) и вертикални (фиг. 1-г), според функцията си са: „активни“ и „неактивни“ (фиг. 1-е), а в зависимост от дължината: къси, средни и дълги. В настоящата статия са разгледани различни образци за къси „link-елементи“ (чиято

дължина изпълнява критерия $e \leq 1,6 \frac{M_{p,link}}{V_{p,link}}$), предназначени за РНЦВД с Λ -конфигурация на диагоналите (фиг. 2).



Фиг. 2. Основни означения на РНЦВД с Λ -конфигурация на диагоналите и разрезни усилия в къси „link-елементи“

2. Описание на предложените образци за „link-елементи“

Конвенционалният подход при проектиране на РНЦВД е „link-елементът“ да бъде със същото напречно сечение както гредата. Този подход има своите недостатъци, тъй като гредата често се подбира от критерии за коравина, а „link-елементът“ следва да се подбере от критерии, водещи до постигането на глобален пластичен механизъм. Това противоречие може да бъде избегнато като се приложи целева смяна на сечението в участъка на гредата, играещ ролята на сеизмичен свързващ елемент. Друга възможност е да се вмъкне „link-елемент“ с подобрена конфигурация и/или размери. Именно към тази възможност са насочени усилията на авторите на това изследване.

2.1. „Link-елемент“ от стоманена отливка

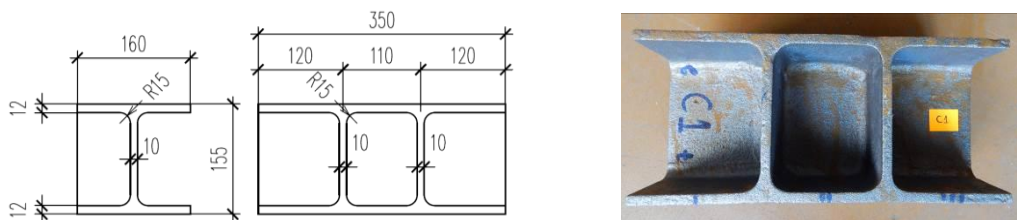
През последните три десетилетия се наблюдава значително развитие на леярството. Новите нисковъглеродни сплави и нелегирани стомани са далеч от традиционната представа за чугунени отливки, които се характеризират с крехкост, поръзност, специфични изисквания при заваряване и са подходящи като елементи, работещи преобладаващо на натиск. В днешно време отливките позволяват огромна свобода на геометрията, гъвкаво производство, а механичните им свойства се доближават до тези на валцуваната стомана [12, 15].

В Европа елементите от лята стомана все още не са широко разпространени в строителството. Въпреки това, в практиката вграждането на отливките в уникални конструкции на зали, терминали на летища, покривни конструкции на стадиони, укрепителни системи, лети възли в пространствени конструкции се среща и то се дължи на тяхната естетическа визия, улеснен монтаж и възможността да се избегне влиянието на заваръчните напрежения в критичните зони. Това води и до нуждата от формулиране на препоръки и процедури за оразмеряване на елементи от лята стомана. Такива са описани в *EN 10293* [2]. В този стандарт са разгледани различни класове сплави и тяхното приложение, засягат се нелегирани стомани с граница на провлачане 200 МПа до високолегирани стомани с 1000 МПа.

В Северна Америка са проведени редица изследвания от млади учени в университетите в Аризона и Торонто, които разглеждат отливките като част от конструктивни системи, проектирани за поемане на сеизмичните въздействия. В своята дисертация *Federico* [9] изследва аналитично и експериментално различни видове модулни елементи от лята стомана за РЦВД, а *Tan* [16] и *Fleischman et al.* [11] разработват и анализират числови модели на иновативни „link-елементи“ от отливки в РНЦВД. Базирайки се на техния опит, у екипа се заражда идеята за проучване на възможността за производство на „link-елементи“ от лята стомана в България. Експерименталното им изследване е включено в настоящия доклад под съкращението СТ1.

Изработката на стоманената отливка бе възложена на Института по металолееене и леярски технологии (ИМЛТ), София. Това е фирма с дългогодишен опит в производството на отливки в малки серии, но сложни по конфигурация и състав на сплавите. В рамките на изследването е направено проучване на българска литература по въпросите на технологията на леярството [4, 5]. Част от екипа имаше възможността да присъства на процеса на металолееене и да се запознае с подготовката на леярските модели, приготвянето на сплавта и изливането ѝ във формите [3].

Съгласно заложената в [1] процедура за оразмеряване на „link-елементи“ в РНЦВД, бе проектирано двойно Т-сечение с подходящо едностранно оребряване (фиг. 3), тъй като то е и най-конвенционалното решение. Формата и дебелините на стените на отливката са съобразени с препоръките на производителите по отношение на намаляване на риска от образуване на шупли, пукнатини и концентрация на напреженията. Зададено бе изискване стоманата да е с характеристики, близки до тези на стомана S235 (или ВСт3пс5 по БДС 2592-71), да притежава добри пластични свойства и добра заваряемост.



Фиг. 3. „Link-елемент“ от стоманена отливка СТ1

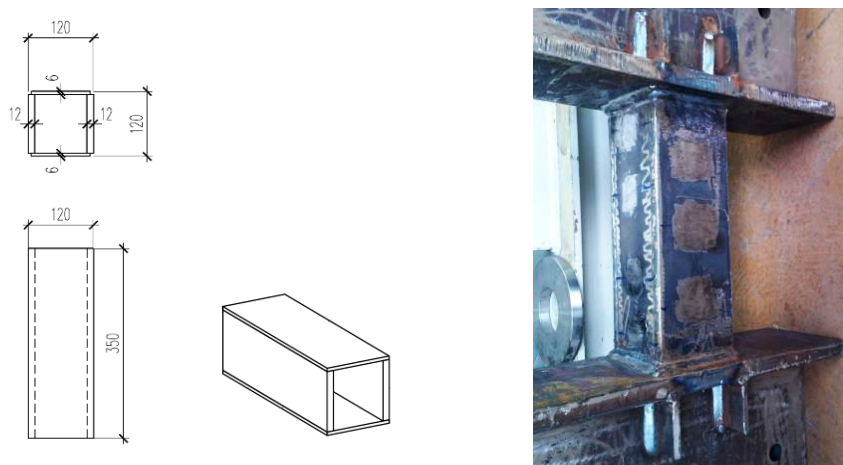
2.2. „Link-елемент“ с кутиеобразно съставено сечение

Изследователи, допринесли много за изучаването на „link-елементи“ с кутиеобразно съставено сечение, са *Berman* [7] и *Bruneau* [7, 8]. Изводите, направени от техните аналитични и експериментални изследвания в тази област, стават основа на изискванията за РНЦВД, заложи в *Американския стандарт* [6], сред чиито автори е и

Bruneau. Те дават указания за избор на подходящи размери на стеблата и поясите на кутиеобразното сечение в зависимост от стройността им, за разстояния между ребрата (ако са необходими такива) и техните дебелини.

Изследванията показват, че така проектираните „link-елементи“ с кутиеобразно съставено сечение удовлетворяват строгите изисквания за дуктилност и дори надвишават почти два пъти критериите за максимална ротация на конвенционалните „link-елементи“ с двойно Т-сечение. Основно предимство на този вид „link-елементи“ е, че не се нуждаят от укрепяване срещу измятане, тъй като кутиеобразните сечения не са податливи на такъв тип загуба на устойчивост. Това тяхно качество ги прави изключително подходящи за случаи, при които е невъзможно или затруднено страничното укрепяване. Важно е да се отбележи, че *AISC 341-10* [6] забранява употребата на HSS профили (Hollow Structural Sections, профили от затворени кутиеобразни сечения) за сеизмични свързващи елементи. Причина е влошената им издръжливост на ниско цикличната умора при големи деформации.

За целите на изследването е избрано неорребрено кутиеобразно съставено заварено сечение, чиито пояси са с дебелина 12 mm, стеблата – 6 mm, а за заваряването им е използван ъглов шев с дълбоко проваряване, равноекстен на основния метал (фиг. 4). Образецът е наречен ВТ1.

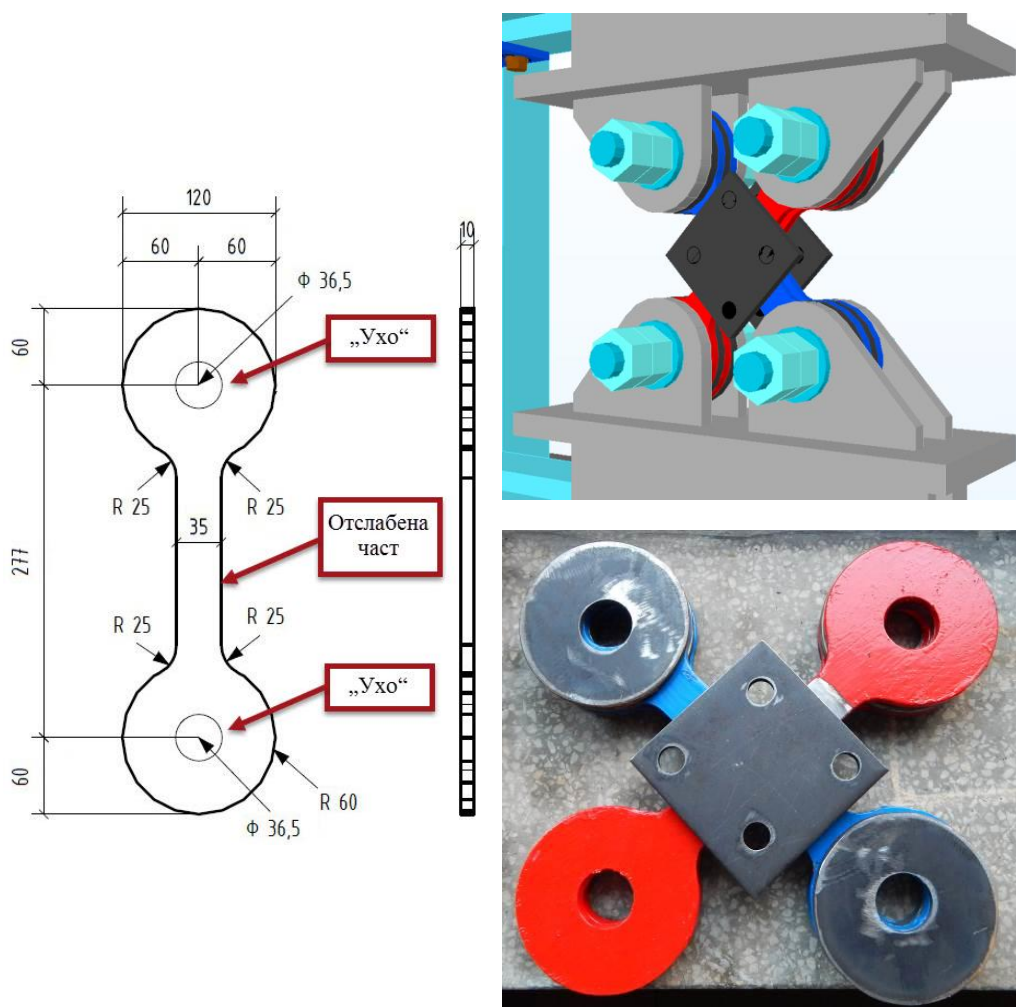


Фиг. 4. „Link-елемент“ с кутиеобразно съставено заварено сечение ВТ1

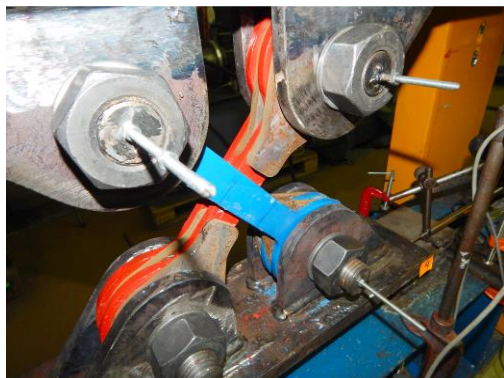
2.3. Елементи „X-link“

Третият тип сеизмичен свързващ елемент, „X-link“, е вдъхновен от работата на диагонали в конвенционални Х-образни връзки и от работата на ядрото в елементите с възпрепятствана загуба на устойчивост в BRB [14]. Той е иновативен по своята същност и след проведеня обзор на наличната литература по темата не е открит негов аналог. Идеята е „link-елементът“ да бъде съставен от пакет кръстосващи се къси диагонали („кокалообразни“ елементи – фиг. 5 – ляво) с Х-образна конфигурация. Кръстосващите се елементи лежат в различни равнини и се свързват с рамковия ригел, посредством болтова става. Стремежът е „кокалообразните“ елементи да се конструират така, че да се ограничи до известна степен изкълчването им при натиск и те доминантно да работят само на якост. Друг ефект, на който се разчита, е допълнителното укрепяващо действие на опънните диагонали от Х-конфигурацията.

Съгласно работната програма е извършено числено моделиране, проектиране, производство и експериментално изследване на „X-link“ (ХТ1) с двойка „кокалообразни“ елементи (шини) във всяко диагонално направление. Луфтовете между елементите при болтовите стави са компенсирани от кръгли пълнежни вложки (шайби) – (фиг. 5 – дясно). Произведени са още 2 серии с различни модификации и подобрения. При първата модифицирана серия (ХТ2) са оформени нови вложки със специална форма, които навлизат към средата на елемента и така намаляват свободната дължина за изкълчване (фиг. 6). При втората серия (ХТ3) е заварена съставена кутия, тип „кожух“, около отслабената част на всеки от „кокалообразните“ елементи (фиг. 7). Кутията няма връзка с шините и участва единствено в ограничаването на загубата на устойчивост във и извън равнината на диагоналите. Важно е да се отбележи, че само при последната серия ХТ3 „кокалообразните“ елементи са единични във всяко диагонално направление (поради недостатъчно място) и не са свързани в пакет чрез обединяващи плочи и болтове.



Фиг. 5. „X-link“ ХТ1 с кръгли пълнежни вложки (шайби)



Фиг. 6. „X-link“ XT2 с модифицирана форма на вложките



Фиг. 7. „X-link“ XT3 със заварена съставена кутия около отслабената част

3. Стандартно изпитване на опън

Целта на стандартното изпитване на опън е да се определят механичните характеристики на стоманите, използвани за направата на „link-елементите“, като граница на провлачане, якост на опън, модул на еластичност и относително удължение. Формата на пробните тела (епруветки) е плоска и е съобразена с изискванията на *ISO 6892-1* [13].

За направата на епруветки от отливките е отлят един неоребрен контролен образец. По механичен път са отделени поясите от стеблото на двойно Т-сечението, а след това получените елементи са обработени на фреза за постигане на константна дебелина. От така получените плоски листове са оформени чрез водно рязане 4 броя пробни тела от двата пояса и 1 брой от стеблото.

Резултатите от изпитванията са обобщени в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1. Резултати от изпитване на пробни тела от отливка за СТ1

Пробно тяло	S_0 [mm ²]	L_0 [mm]	L_u [mm]	F_p [kN]	F_m [kN]	R_p [kN/cm ²]	R_m [kN/cm ²]	ϵ [%]	E [kN/cm ²]
В-4-1 (стебло)	134,39	79,35	103,78	33,13	57,42	24,65	42,73	30,78	22880
В-4-2 (пояс)	158,04	79,81	102,29	40,48	69,81	25,61	44,17	28,17	21816
В-4-3 (пояс)	160,44	150,00	185,00	39,99	69,78	24,93	43,49	23,33	20200
В-4-4 (пояс)	162,29	150,00	186,00	39,53	70,08	24,36	43,18	24,00	22117
В-4-5 (пояс)	157,43	150,00	188,00	39,31	68,83	24,97	43,72	25,33	22269
В-4-ср. (ср. аритм.)	154,52	121,83	153,01	38,49	67,18	24,90	43,46	26,32	21856,4

Таблица 2. Резултати от изпитване на пробни тела от листова стомана

Мостра	Пробно тяло	S_0 [mm ²]	L_0 [mm]	L_u [mm]	F_p [kN]	F_m [kN]	R_p [kN/cm ²]	R_m [kN/cm ²]	ε [%]
12 mm (пояси на BT1)	B-1-1	253,39	80,12	111,63	77,54	107,53	30,60	42,44	39,33
	B-1-2	249,07	80,09	112,74	72,54	104,16	29,12	41,82	40,77
	B-1-3	250,59	80,16	110,80	72,54	103,61	28,95	41,35	38,22
	B-1-4	253,14	80,07	109,50	71,99	103,80	28,44	41,01	36,76
	B-1-ср.	251,55	80,11	111,17	73,65	104,78	29,28	41,65	38,77
10 mm (XT1, XT2, XT3)	B-2-1	209,03	80,13	111,49	58,98	79,92	28,22	38,24	39,14
	B-2-2*	212,23	80,50	110,14	69,06	81,15	32,54*	38,24	36,82
	B-2-3*	209,90	79,62	112,03	67,23	79,86	32,03*	38,05	40,71
	B-2-4*	218,32	79,25	107,50	73,09	82,55	33,48*	37,81	35,65
	B-2-ср.	212,37	79,88	110,29	67,09	80,87	31,57	38,08	38,08
6 mm (стебла на BT1)	B-3-1	237,02	280,00	330,00	65,73	90,25	27,73	38,08	17,86
	B-3-2*	233,51	264,00	303,00	67,49	93,39	28,90	39,99	14,77*
	B-3-3	238,96	200,00	245,00	70,44	97,90	29,48	40,97	22,50
	B-3-ср.	236,50	248,00	292,67	67,89	93,85	28,70	39,68	18,38

S_0 – площ на напречното сечение; L_0 – дължина на базата на екстензометъра; L_u – дължина на базата на екстензометъра след разрушаване; F_p – сила при провлачане; F_m – максимална сила; R_p – условна граница на провлачане; R_m – якост на опън; ε – относително удължение след разрушаване на пробното тяло; E – модул на еластичност.

На база на получените данни може да се заключи, че използваните материали имат много добри пластични свойства. Изискванията за минимална дуктилност на стоманата, заложи в БДС EN 1993-1-1/NA:

- $f_u / f_y \geq 1,2$;
- удължението при разрушаване да е не по-малко от 15%;
- $\varepsilon_u \geq 15 \varepsilon_y$, където $\varepsilon_y = f_y / E$

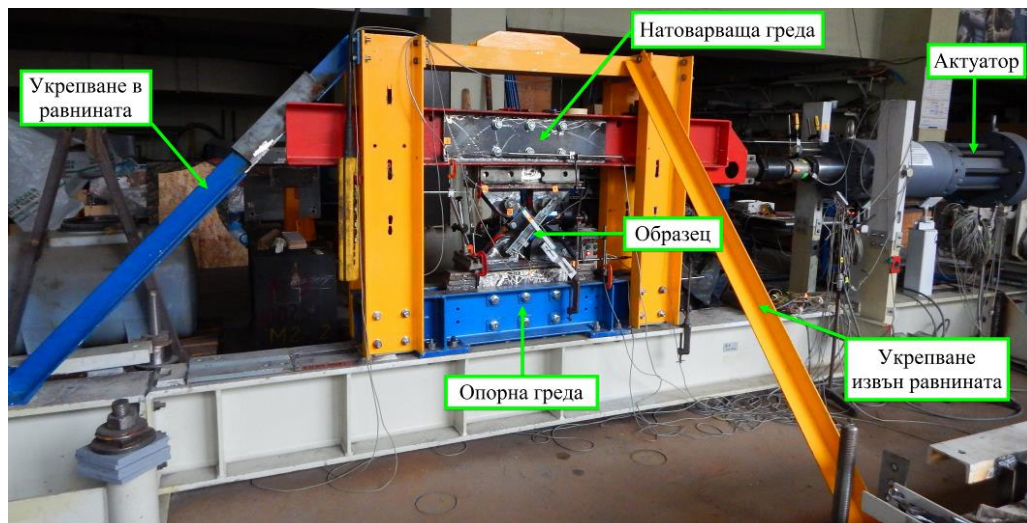
са удовлетворени. Малки изключения се забелязват в образците, отбелязани със знак „*“.

4. Програма на експерименталното изследване на различни типове „link-елементи“

4.1. Експериментална постановка

За целите на експерименталното изследване бе адаптиран и подобрен наличен стенд в УНИЛ, който осигурява работа на изпитвания образец, кореспондираща на рабо-

тата на реален „link-елемент“ в рамка с НЦВД. Стендът се състои от неподвижна рамка и подвижна греда, лагерирана в двата си края и осигуряваща хоризонтално преместване на горния край на образеца – фиг. 8. Натоварването е реализирано чрез хидравличен сервоактуатор „Капрони“ (± 200 mm ход; ± 500 kN сила) при прилагане на контролирано хоризонтално преместване върху подвижната греда и измерване на силата в месдозата на актуатора.



Фиг. 8. Експериментална постановка

Общите и относителни деформации в тествания образец са регистрирани чрез датчици за преместване (индуктивен тип) и тензорезистори (електросъпротивителни датчици). Измерват се общите премествания в постановката, взаимните премествания между двата края на образците и удължаването и скъсяването на геометричните диагонали на изпитвания сеизмичен свързващ елемент. Тензорезисторите са залепени в характерни сечения и дават информация за разпределението на относителните деформации в тях.

По време на първия експеримент и след него бяха предприети допълнителни мерки по укрепване на стенда и намаляване на неработните деформации. Наличието на стандартни луфтове в болтовите съединения (2 mm) и допълнителната им овализация (вследствие на смачкване) води до нежелано завъртане на „link-елемента“, което е ограничено за следващите експерименти.

4.2. Протоколи за натоварване

Протоколите за натоварване (фиг. 9, фиг. 10 и фиг. 11) отговарят на указанията на *FEMA 461* [10] за квази-статичен цикличен тест. В началото на всеки експеримент са зададени циклични натоварвания с малки стойности на преместване на буталото на сервоцилиндъра, с цел проверка на нормалната работа на натоварващата и измервателната система. При следващите цикли бяха установени значителни неработни деформации в болтовите съединения (между подвижната греда, неподвижната рамка и изпитвания образец) от порядъка на $6 \div 10$ mm.

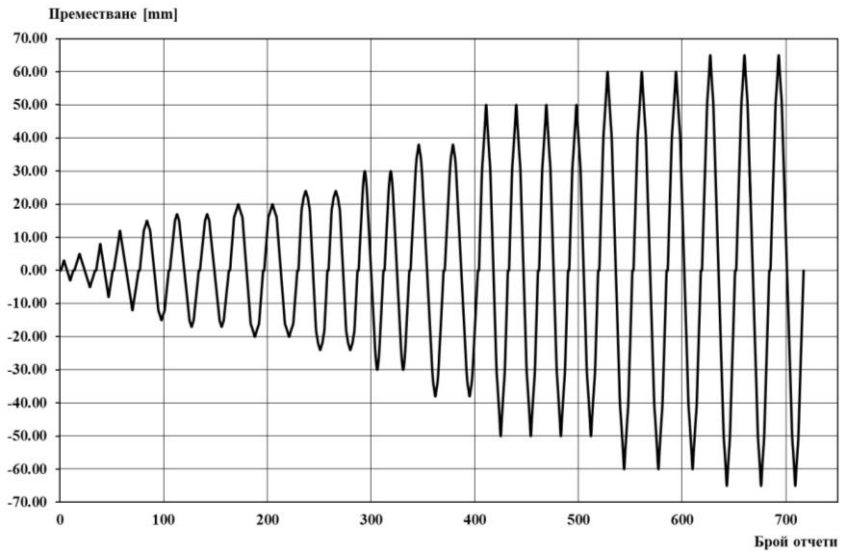
Амплитудата на нарастване на преместването е определена съгласно [10], като всеки цикъл от натоварването се повтаря два пъти и се спазва препоръчителният брой на

ходовете да е поне 10. Амплитудата a нараства по формулата: $a_{i+1} = 1,4a_i$, където i е номерът на цикъла. В протокола на натоварване е изключено влиянието на неработните премествания. По време на експеримента, като контролен параметър се следи Θ_p (ъгълът на ротация на „link-елемента“), който съгласно *Еврокод 8* [1] за къси свързващи елементи следва да е по-малък 0,08 rad. Завъртането е изчислено по формулата

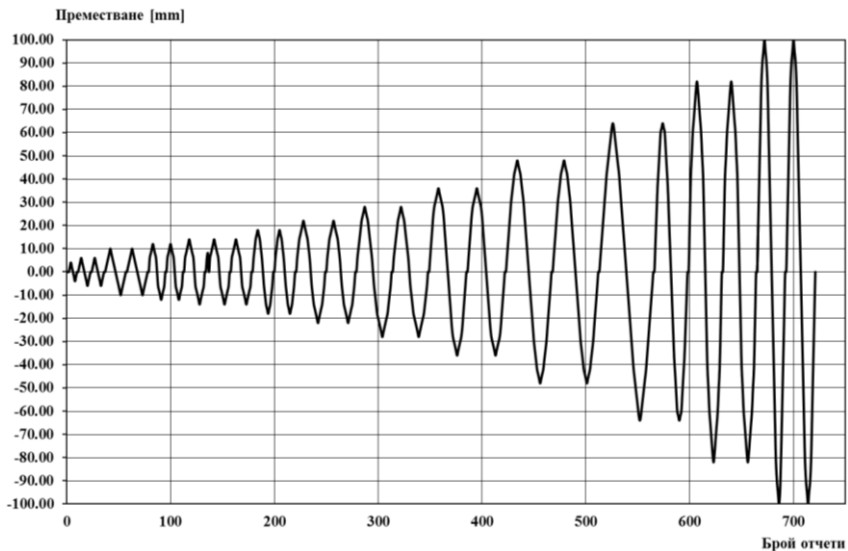
$$\Theta_p = \arctan\left(\frac{\Delta x}{z}\right),$$

където D_x е измереното хоризонтално преместване на горния спрямо

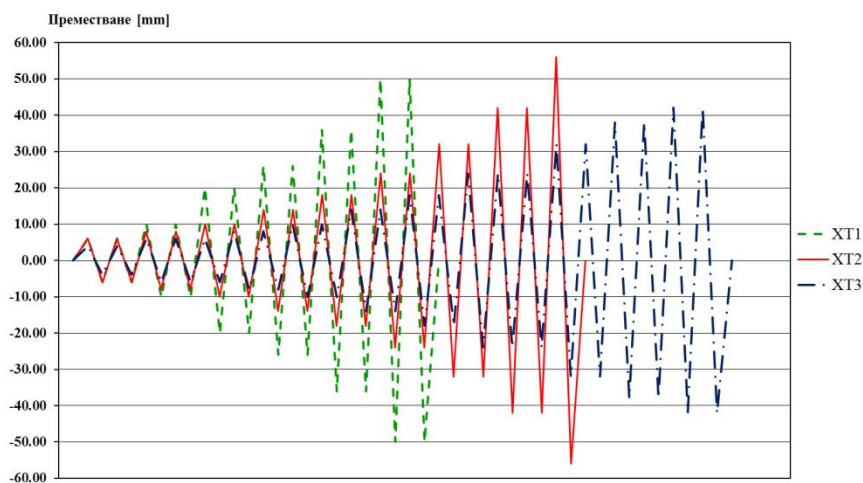
долния край на „link-елемента“, а z е вертикалното разстояние между двете характерни крайни точки.



Фиг. 9. Протокол за натоварване за СТ1



Фиг. 10. Протокол за натоварване за BT1



Фиг. 11. Протокол за натоварване за XT1, XT2 и XT3

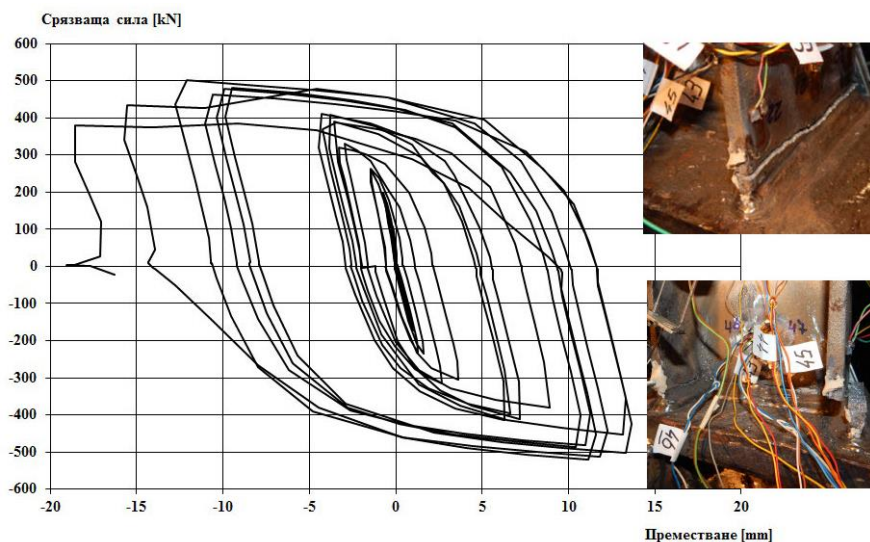
4.3. Експериментални резултати

4.3.1. Образец СТ1

Началото на пластичната работа на „link-елемент“ СТ1 съвпада с теоретично изчислената сила (по формула 6.14 от [1]), базирана на реалната граница на провлачане на

материала, а именно: $V_{p,CT1} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w (d - t_f) = \frac{24,9}{\sqrt{3}} \cdot 1,1 \cdot (15,5 - 1) = 229 \text{ kN}$. Образецът де-

монстрира задоволително хистерезисно поведение (фиг. 12 – ляво) и съществено кинематично уякчаване. По време на експеримента не се наблюдават видими ефекти от пластификация или от местна загуба на устойчивост в пояса или стеблото на образца.



Фиг. 12. Хистерезисна зависимост (ляво) и форма на разрушение на СТ1 (дясно)

Максималното реализирано преместване на буталото е 65 mm, на което съответства ъгъл на ротация на „link-елемента“ $\Theta_{p,CT1} = 0,044 \text{ rad}$, при достигната максимална сила на сервоактуатора. При повторението на този цикъл е констатирано крехко разрушение на образеца в околошевната зона между десния пояс на отливката и плочата от валцувана стомана. Въпреки това, в началото не се регистрира значителен спад на измерената сила, което може да се обясни със запазване на носимоспособността на стеблото, докато пукнатината не се разпространи и в него. При изпълнение на трети цикъл със същата амплитуда пукнатината навлиза навътре в стеблото, достигайки почти до срещния пояс, което води до пълно разрушение на образеца (фиг. 12 – дясно). Ломът на разкъсване е зърнест и бляскав, характерен за крехка форма на разрушаване на материала.

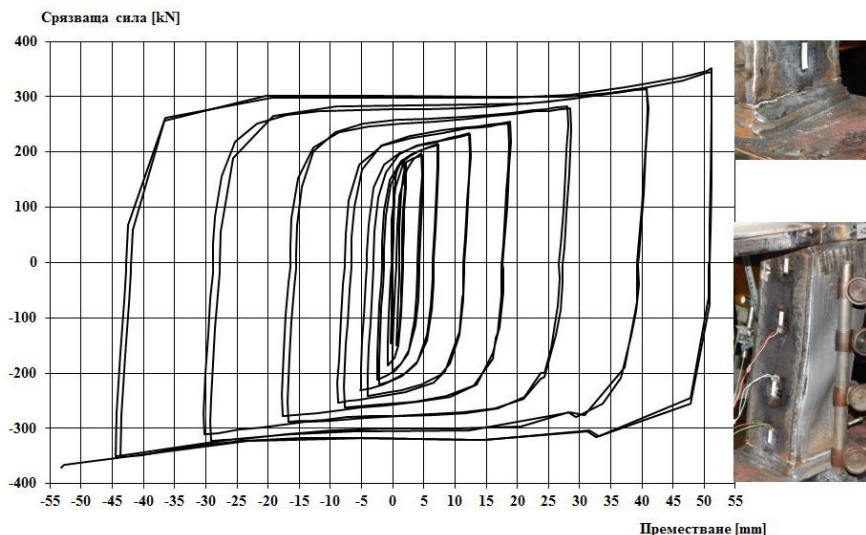
4.3.2. Образец BT1

Получените хистерезисни примки (фиг. 13 – ляво) от изпитването на образец BT1 са симетрични и много близки до идеализирания модел. „Link-елементът“ с кутиеобразно съставено сечение демонстрира много обнадеждаващо хистерезисно поведение. Теоретичното начало на пластификацията (определено по формулата, използвана от *Berman* и *Bruneau* в [7]), доказано и от експеримента, настъпва при срязваща сила:

$$V_{p,BT1} = \frac{2}{\sqrt{3}} f_{yw} t_w (d - 2t_f) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 28,7 \cdot 0,6 \cdot (12 - 2 \cdot 1,2) = 191 \text{ kN}$$

, която е изчислена чрез действителната граница на провлачане на материала.

При зададено преместване на буталото от 82 mm се констатират пукнатини в околошевната зона между поясите на кутията и възловата плоча, както и начално изкорубване на стеблата. След повторение на цикъла наблюдаваните ефекти се засилват. Максималната изчислена ротация е $\Theta_{p,BT1} = 0,139 \text{ rad}$, достигната при зададен ход на буталото 100 mm и измерена сила 385 kN. В това състояние настъпва и пълно разрушение вследствие на изкорубванията на стеблото и разкъсване на материала в околошевната зона (фиг. 13 – дясно).



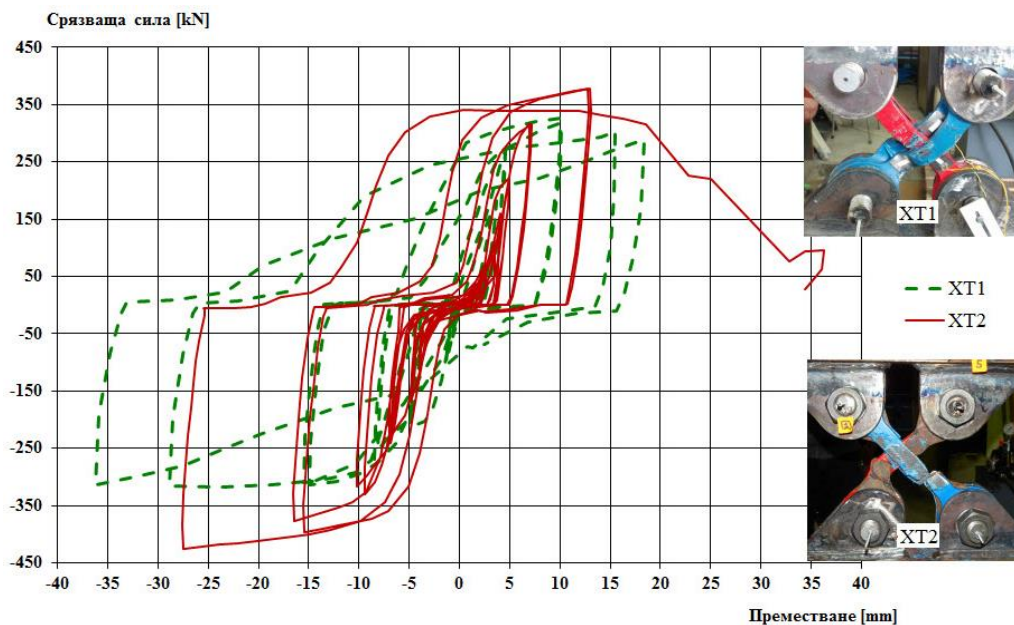
Фиг. 13. Хистерезисна зависимост (ляво) и форма на разрушение на BT1 (дясно)

4.3.3. Образци ХТ1, ХТ2 и ХТ3

Резултатите от изследването на образци ХТ1 и ХТ2 са представени заедно на фиг. 14 поради факта, че единствената разлика между образците е формата на вложките. Предложеният нов тип сеизмичен свързващ елемент „X-link“ има добро дуктилно поведение и симетрични хистерезисни примки (фиг. 14 – ляво). Забелязва се „прищипване“ на диаграмите още при малки стойности на хоризонталното натоварване, дължащо се на неработни деформации (луфтове). При достигане на провлачане на опънатия диагонал и неговото значително удължаване, „прищипването“ би могло да се обясни с обстоятелството, че при разтоварване и достигане на нулева стойност на силата, в даден диапазон на преместванията и двата диагонала остават натиснати. Теоретичната опънна сила, базирана на реална граница на провлачане, при която настъпва пластификация за всеки един от „кокалообразните“ елементи, е $N_{t,XT1,2,3} = Af_y = 3,5 \cdot 1.31,57 = 110 \text{ kN}$.

За елемент ХТ1 при зададен ход на буталото от 50 mm, измерената сила е 315 kN и съответният ъгъл на ротация е $\Theta_{p,XT1} = 0,087 \text{ rad}$. В това състояние натиснатите диагонали са силно деформирани (изкълчват се значително извън равнината, фиг. 14 – дясно, горе). След повторение на цикъла се наблюдава увеличаване на депланацията на елементите и се достига до завъртане $\Theta_{p,XT1} = 0,109 \text{ rad}$, при което опънатите елементи все още не са изчерпали носимоспособността си. На този етап експериментът се прекратява, тъй като е налице опасност от повреда на силоизмерителя заради нецентрично прилагане на силата.

Получената форма на разрушение (изкълчване на диагоналите) не удовлетворява очакванията и е потърсен начин за подобряване на поведението на „link-елемента“ – модификации, означени като ХТ2 и ХТ3.

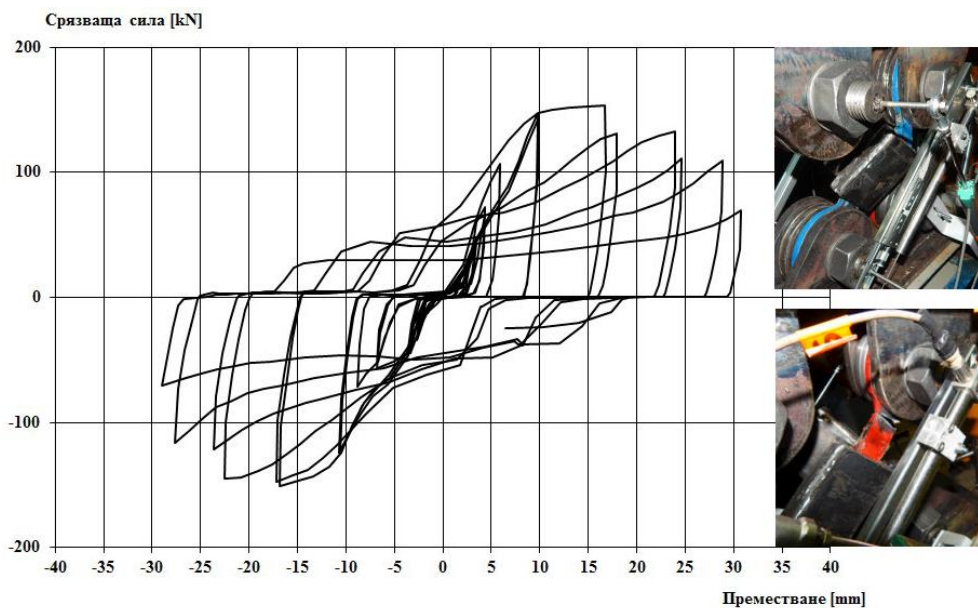


Фиг. 14. Хистерезисна зависимост (ляво) и форма на разрушение на ХТ1 (дясно, горе) и ХТ2 (дясно, долу)

След промяна на формата на вложките на ХТ2, максималното достигнато завъртане на „link-елемента“ е $\Theta_{p,XT2} = 0,083 \text{ rad}$, при зададено преместване 56 mm и съответна сила 425 kN. Наблюдава се локална депланация, локално смачкване на натиснатите диагонали и последователно скъсване на двойката опънати „кокалообразни“ елементи (фиг. 14-дясно, долу). Новите вложки възпрепятстват загубата на устойчивост извън равнината, но не и тази в равнината на „link-елемента“ като изкълчвателната дължина е значително по-малка от дължината на отслабената част.

Образец ХТ3 проявява сходно хистерезисно поведение (фиг. 15 – ляво), като това на останалите „X-link“ елементи. Въведеният „кожух“ изиграва своята роля до известна степен, но изкълчване се проявява в неукрепената част на диагонала. При ход на буталото от 38 mm и кореспондираща сила 145 kN се наблюдава образуване на пукнатина в преходния участък между отслабената част и „ухото“ на червения елемент. При втория цикъл на зададено преместване 42 mm се достига до скъсване на диагонала (фиг. 15 – дясно), а максималният ъгъл на ротация е $\Theta_{p,XT3} = 0,085 \text{ rad}$.

Максималната хоризонтална сила за ХТ3 е по-малка поради факта, че „кокалообразните“ елементи са единични във всяко направление, докато при ХТ1 и ХТ2 те са двойни. Заварените кутии имат съществен принос за ограничаване на изкълчването във и извън равнината на „link-елемента“. По време на експеримента е констатирано тяхното разместване към долната възлова плоча, което води до несиметрия в елементите „разкриване“ на по-дълъг неукрепен участък на отслабеното сечение.



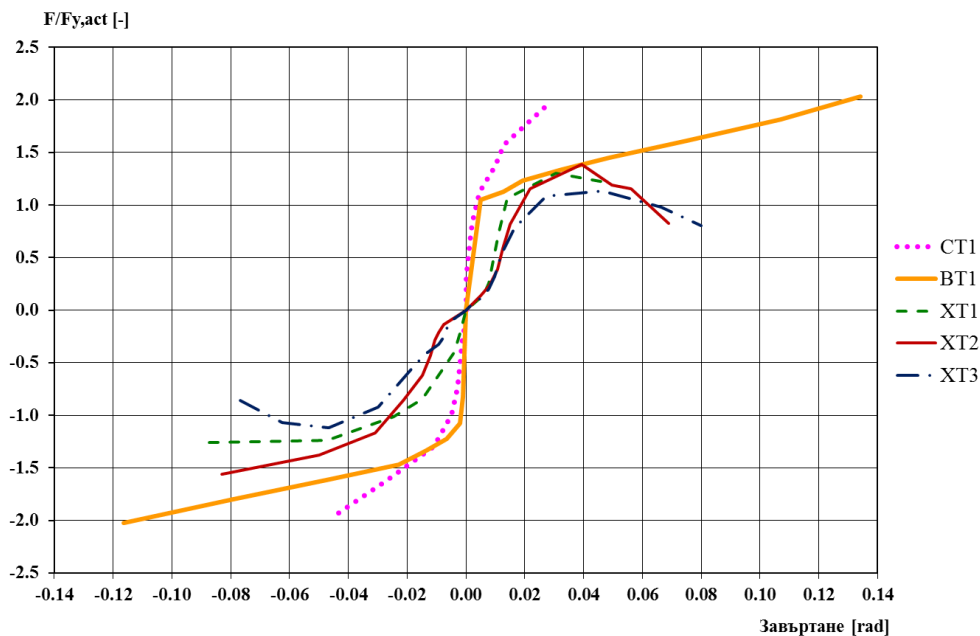
Фиг. 15. Хистерезисна зависимост (ляво) и форма на разрушение на ХТ3 (дясно)

4.3.4. Сравняване на поведението на изпитваните образци

В табл. 3 са обобщени и сравнени резултатите от експерименталното изследване на трите типа „link-елементи“.

На фиг. 16 са изобразени обвивните криви от първите цикли на всички изпитани образци при зависимост нормализирана сила – завъртане. Нормализираната сила е без-

дименсионна величина, представяща отношението на приложената сила към експериментално определената сила, при която започва нееластична работа на образеца. Несиметрията в кривите спрямо нулевата точка в диаграмата се обяснява с пластичните деформации в болтовите съединения и несиметричните неработни деформации в стенда.



Фиг. 16. Обвивни криви, представящи зависимостта нормализирана сила – завъртане за CT1, BT1, XT1, XT2 и XT3

Таблица 3. Резултати от изпитване на експерименталните образци

Обр.	$\gamma_{ov,act} = \frac{F_y,act}{f_y,act/f_y}$	F_y,act [kN]	F_y,th [kN]	$F_{max,act}$ [kN]	$\frac{F_y,act}{F_y,th}$	$\frac{F_{max,act}}{F_y,act}$	$\Theta_{y,act}$ [rad]	$\Theta_{max,act}$ [rad]	$\frac{\Theta_{max,act}}{\Theta_{y,act}}$
CT1	1,06	235	229	521	1,03	2,22	0,0032	0,0438	13,78
BT1	1,22	173	191	385	0,91	2,22	0,0020	0,1393	70,57
XT1	1,34	96	110	126	0,88	1,31	0,0112	0,0872	7,78
XT2	1,34	105	110	163	0,95	1,56	0,0178	0,0831	4,67
XT3	1,34	104	110	118	0,95	1,13	0,0282	0,0852	3,02

$\gamma_{ov,act}$ – действителен коефициент на завишена носимоспособност на материала; f_y,act – действителна граница на провлачане, определена чрез стандартно изпитване на опън; f_y – номинална стойност на граница на провлачане; F_y,act – експериментално определена сръзваща/опънна сила, при която започва нелинейна работа на образеца; F_y,th – теоретично определена сръзваща/опънна сила, изчислена с действителна граница на провлачане; $F_{max,act}$ – максимална достигната сръзваща/опънна сила; $\frac{F_y,act}{F_y,th}$ – коефициент на носимоспособност при квази-статичен цикличен тест на образеца; $\frac{F_{max,act}}{F_y,act}$ – коефициент на уячаване; $\Theta_{y,act}$ – експериментално определен ъгъл на ротация, при който започва нелинейна работа на образеца; $\Theta_{max,act}$ – максимален ъгъл на ротация, достигнат преди разрушение на образеца; $\frac{\Theta_{max,act}}{\Theta_{y,act}}$ – коефициент на дуктилност по завъртане.

5. Основни изводи

Като резултат от проведените пет броя тестове с различни видове къси „link-елементи“ и след анализ на начина на производство и наблюдаваното експериментално поведение на образците, могат да се формулират следните общи изводи:

– Производството на стоманени отливки за сеизмични свързващи елементи е технологично осъществимо в Република България. Използването на лята стомана би могло да разреши въпроса с постигане на малка разлика между $f_{y,act}$ и номиналната стойност на f_y . При проведените изследвания бяха регистрирани $\gamma_{ov,act} = 1,049$ и $\gamma_{ov,act} = 1,062$, съответно за стеблото и поясите на отливката. Към момента има затруднения с контрола на химическия състав на лятата стоманата и получаване на материал с изявена площадка на провлачане и следващо уякчаване. Тестваният образец демонстрира значително уякчаване и проблем с проява на крехко разрушение в околешевната зона. За да могат да бъдат ползвани отливки за целите на сеизмични свързващи елементи, следва да се подобри технологията на стоманолееене у нас и да се проведат допълнителни изследвания.

– Производството и влагането на къси „link-елементи“ в РНЦВД от заварено кутиеобразно сечение или от типа „X-link“ е технологично лесно осъществимо и достъпно. Използват се валцувани ламарини от стомана S235. Разлика между $f_{y,act}$ и номиналната стойност на f_y съществува, но това е проблем характерен за цяла Европа, а не само за България. При проведените изследвания бяха регистрирани $\gamma_{ov,act} = 1,246$, $\gamma_{ov,act} = 1,343$ и $\gamma_{ov,act} = 1,221$, съответно за ламарини с дебелина 12, 10 и 6 mm. Ламарините с дебелина 12 и 6 mm се ползват за кутиеобразните образци, а дебелина 10 mm – за „кокалообразните“ елементи.

По отношение на полученото хистерезисно поведение на изследваните образци може да се обобщи следното:

– Образец СТ1 (стоманена отливка) демонстрира устойчиво хистерезисно поведение с отворена примка. Липсва спад на носимоспособност при провеждане на два последователни цикъла с постоянна амплитуда, тъй като по време на експеримента не са наблюдавани никакви прояви на местна загуба на устойчивост. Наблюдава се кинематично уякчаване произтичащо от работната диаграма на материала, публикувана в [3]. Получената стойност за $F_{max,act}/F_{y,act} = 2,219$ се обяснява с кинематично уякчаване на материала и с уякчаване при циклично знакопроменливо натоварване на стеблото на срязване, характерно за късите „link-елементи“. При циклично натоварване образецът не проявява спад на коравина, но постигнатата максимална пластична ротация $\Theta_{max,act} = 0,044$ rad не е голяма. Образецът се разрушава крехко.

– Образец ВТ1 (съставена заварена кутия) демонстрира отлично хистерезисно поведение с отворена примка, доближаваща се до идеалния еласто-пластичен цикъл. Липсва спад на носимоспособността при провеждане на два последователни цикъла с постоянна амплитуда. По време на експеримента изкорубване на стеблото се появява на относително късен етап, когато започва да се изчерпва дуктилността на материала от поясите в зоната на заваръчните шевове. Наблюдава се цикличното уякчаване, характерно за късите link-елементи“. Получената стойност за $F_{max,act}/F_{y,act} = 2,222$ е по-висока от стойността 1,5, залегнала в БДС EN 1998-1 [1]. Този феномен следва да се изследва с още тестове. При циклично натоварване образецът не проявява спад на коравина, а постигнатата максимална пластична ротация $\Theta_{max,act} = 0,139$ rad е много обнадеждаваща. Образецът се разрушава дуктилно.

– За образци ХТ1, ХТ2 и ХТ3 (кръстосани „кокалообразни“ елементи) получените хистерезисни примки се отличават с поява на „прищипване“. Степента на „прищипване“ е различна поради разликите в конструирането на елементите, които целят предпазване

от изкълчване на натиснатия елемент. Наблюдава се и известен спад на носимоспособност при провеждане на два последователни цикъла с постоянна амплитуда. Това би могло да се дължи на овализацията на отворите на „ушите“ и/или наличието на остатъчни пластични удължения в „кокалообразните“ елементи от първия цикъл. По време на експеримента са наблюдавани различни форми на загуба на устойчивост на натиснат елемент, пояснени в изложението по-горе. Получените стойности за $F_{max,act} / F_{y,act}$ са 1,306, 1,558 и 1,134 съответно за ХТ1, ХТ2 и ХТ3. При циклично натоварване образците проявяват спад на коравина, а постигнатата максимална пластична ротация $\Theta_{max,act}$ е малко над 0,08 rad. Образците се разрушават дуктилно.

6. Заключение

Използването на стоманени отливки за сеизмични свързващи елементи може да се окаже перспективен подход, но към него следва да се пристъпи едва след подобряване на качествата на лятата стомана.

„Link-елемент“ от кутиеобразно съставено заварено сечение демонстрира отлично дуктилно поведение и позволява достигане на големи пластични ротации при запазена носимоспособност. Изследването на този вид „link-елемент“ следва да продължи чрез тестове на фрагменти от етажна рамкова конструкция с НЦВД.

Иновативните „X-link“ елементи също демонстрират обнадеждаващо дуктилно поведение и достигат пластична ротация 0,08 rad. Следва да се потърси начин за подобряване на формата на „ушите“ и изследването да продължи с вграждането на такъв тип елементи в етажна РНЦВД.

Благодарности

Научният колектив изказва своята благодарност на МОН за предоставеното финансиране, позволило реализацията на тази мащабна експериментална програма, както и на ЦНИП при УАСГ за подкрепата и насоките при изпълнение на договор Д-87/16.

ЛИТЕРАТУРА

1. *БДС EN 1998-1*: Еврокод 8: Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Част 1: Основни правила, сеизмични въздействия и правила за сгради, 2013.
2. *БДС EN 10293*: Стоманени отливки. Стоманени отливки за общо приложение в машиностроенето, 2015.
3. *Ганчева, Б., Георгиев, Цв., Ганчев, О., Райков, Ст.* Експериментално изследване на сеизмични свързващи елементи от готови стоманени отливки в рамки с нецентрично включени диагонали. // Годишник на Университета по архитектура, строителство и геодезия, том 50, брой 4, 2017.
4. *Рангелов, Р.* Цикъл лекции по Леене на металите – процеси, методи, машини. Проект BG051PO001-3.3.06-0046 Подкрепа за развитието на докторанти, постдокторанти и млади учени в областта на виртуалното инженерство и индустриалните технологии, 2012.

5. *Тончев, Н.* Материалознание и технология на материалите. ВТУ „Тодор Каблешков“, 2010.
6. *AISC 341-10, Committee on Specifications.* Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, 2010.
7. *Berman, J. W., Bruneau, M.* Experimental and Analytical Investigation of Tubular Links for Eccentrically Braced Frames. *Engineering Structures* 29, 2007.
8. *Bruneau, M., Uang, Ch.-M., Sabelli, R.* Ductile Design of Steel Structures. McGraw-Hill, 2011.
9. *Federico, G.* Use of Cast Modular Components for Concentrically Braced Steel Frames, University of Arizona – Dissertation, 2012.
10. *FEMA 461, Applied Technology Council.* Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, 2007.
11. *Fleischman, R., Schlafly, T. J., Poweleit, D. R.* Development of Cast Modular Components for Steel Construction. University of Arizona Interim Report, 2004.
12. *Herion, S., Oliveira, J.-C., Packer, J. A., Christopoulos, C., Gray, M. G.* Castings in Tubular Structures – The State of the Art. *Structures and Buildings* 163 Issue SB6, 2010.
13. *International Standard ISO 6892-1* Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature, 2009.
14. *Mahin, S., Uriz, P., Aiken, I., Field, C., Ko, E.* Seismic Performance of Buckling Restrained Braced Frame Systems. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004.
15. *Schober, H.* Steel Castings in Architecture and Engineering, Modern Steel Construction, 2003.
16. *Tan, K. G.* Replaceable Cast Steel Links for Eccentrically Braced Frames, University of Toronto – Thesis, 2014.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DIFFERENT TYPES OF STEEL LINKS FOR ECCENTRICALLY BRACED FRAMES

B. Gancheva¹, Tzv. Georgiev², O. Ganchev³, St. Raykov⁴

Keywords: *eccentrically braced frames, shear links, steel castings, experimental study, cyclic test, ductility*

ABSTRACT

Eccentrically braced frames are a worldwide well-known and often used structural system for earthquake resistant design in areas with high seismic hazard. A specifically designed element, named “link”, accommodates the plastic deformations caused by strong earthquakes. Plastic strain is restricted within the link and the rest load-bearing elements of the frame – columns, beams and diagonals, behave elastically. This paper presents an experimental study of various types of short active links tested separately from the frame. The subject of the study are three types of non-conventional seismic links, namely steel castings, built-up welded box sections and a configuration of crossed dog-bone like members. The latter, the so-called by the authors “X-link”, is an innovative type, unknown in the research community. All link elements are tested under quasi-static cyclic load up to failure and their hysteresis loops are obtained. A comparison between their hysteretic behaviour and failure mechanism is made, as well as some general conclusions from the conducted research are summarized.

¹ Bistra Gancheva, Eng. Ph.D. student, Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: bgancheva_fce@uacg.bg

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

³ Ognyan Ganchev, Senior Assist. Prof., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ganchev_fce@uacg.bg

⁴ Stanislav Raykov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: raykov_fce@uacg.bg