



Получена: 10.02.2017 г.

Приета: 22.05.2017 г.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА СЕИЗМИЧНИ СВЪРЗВАЩИ ЕЛЕМЕНТИ ОТ ГОТОВИ СТОМАНЕНИ ОТЛИВКИ В РАМКИ С НЕЦЕНТРИЧНО ВКЛЮЧЕНИ ДИАГОНАЛИ

Б. Ганчева<sup>1</sup>, Цв. Георгиев<sup>2</sup>, О. Ганчев<sup>3</sup>, Ст. Райков<sup>4</sup>

*Ключови думи:* рамки с нецентрично включени диагонали, стоманени отливки, експериментално изследване, цикличен тест, дуктилност

### РЕЗЮМЕ

Рамките с нецентрично включени диагонали са една от системите в Еврокод 8 за поемане на натоварванията, породени от сеизмично въздействие. При този вид конструктивна система основният дисипативен елемент е частта от гредата, ограничена между диагоналите, наречена сеизмичен свързващ елемент. В настоящия доклад е представен натрупан опит от проектирането, производството и експерименталното изследване на къси сеизмични свързващи елементи, реализирани от стоманени отливки. Проведени са предварителни тестове за установяване на действителната работна диаграма на материала и наличието на производствени дефекти. Елементът е изпитан при квази-статично циклично натоварване до разрушение, като е получено хистерезисното поведение на отливката. Направени са първични изводи и заключения от изследването.

<sup>1</sup> Бистра Ганчева, докторант инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: bgancheva\_fce@uacg.bg

<sup>2</sup> 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

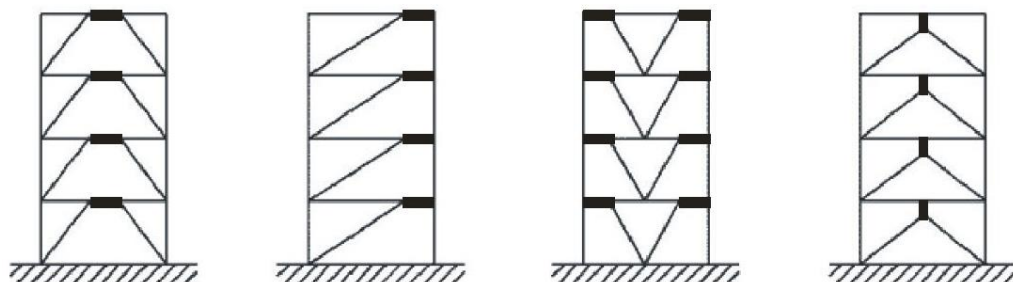
<sup>3</sup> Огнян Ганчев, ас. инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ganchev\_fce@uacg.bg

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

## 1. Въведение

Рамките с нецентрично включени диагонали (НЦВД) се използват като конструктивна система повече от три десетилетия. Те притежават голяма еластична коравина, стабилно нееластично реагиране при циклично натоварване, отлична дуктилност и капацитет за дисипиране на енергия. На много места по света, в райони с висок сеизмичен hazard, те са предпочитана система за главната носеща конструкция, но в нашата страна не са особено популярни сред проектантската колегия.

Рамките с НЦВД са вертикални носещи конструктивни системи за поемане на хоризонтални сили, съставени от рамка с корави, частично корави или ставни възли и диагонални пръти. При свързването на диагоналите към гредата се дефинира ексцентрицитет и така се отделя участък от нея или към нея, в който целево се насочва развитието на пластични деформации. Този участък (удебелените зони на фиг. 1) е наречен „сеизмичен свързващ елемент“ съгласно БДС EN 1998-1 [1], а в техническата литература на английски език се ползва терминът „link“. За удобство в контекста на статията, авторите ще ползват израза „link-елемент“.



Фиг. 1. Конфигурации на рамки с нецентрично включени диагонали

Развитието на рамките с нецентрично включени диагонали води своето начало от изследвания в Япония, но в последствие проучванията, проведени в University of California, Berkeley (UCB) под ръководството на професор *Popov* [4], [11] и *Bertero* ги правят световно популярни и обект на множество изследвания. Първото поколение изследвания са концентрирани върху конвенционалните рамки с НЦВД. Предмет на изследване са поведението и моделирането на „link-елементи“, работещи предимно на срязване и тяхното капацитивно проектиране с цел запазване на еластичната работа на останалите елементи от рамката. Подробен анализ на еволюцията на инженерното познание за тези конструкции е даден в [4].

Втора вълна на изследователски интерес са изследванията, насочени към т. нар. неконвенционални рамки с НЦВД, при които се използват заменяеми или целево проектирани сеизмични свързващи елементи. Специфични изследвания на концепцията за заменяеми „link-елементи“ са проведени от *Stratan u Dubina* [14] (2004) в Politehnica University of Timisoara, Румъния. Извършени са експерименти с „link-елементи“ с двойни Т-сечения, които се свързват към гредата посредством фланцеви плочи и напрегнати болтове.

В Нова Зеландия, заменяемите „link-елементи“ имат широко практическо приложение в стоманените конструкции, осигурени срещу сеизмично въздействие. Това налага и съставянето на препоръки от *Clifton* и колектив [8] за тяхното проектиране, заложен в стандартите на страната.

Друг вид елемент, изследван от *Berman* и *Bruneau* [3, 4, 5, 6] е съставен от кутиеобразни профили, оребрани най-често от външната страна. Предимство на тези сечения е, че не се нуждаят от укрепване срещу измятане, тъй като не са податливи на такъв вид загуба на устойчивост. Изследванията показват, че пояското разрушение не настъпва в заваръчните шевове с пълнен провар, използвани за съставяне на сечението, а в околошевната зона, подложена на термично (топлинно) влияние, свързваща поясите и ребрата.

Идеята за заменяеми „link-елементи“ е залегнала и в работата на *Dusicka* [4] (2009), а по-скорошните проучвания (*Richards* [4] 2004, *Okazaki* и *Engelhardt* [4] 2007) разглеждат влиянието на характеристиките на съвременни материали, както и нови изисквания за детайлиране на оребряването и дефиниране на нови типове протоколи за натоварване при тестовете.

През 2012, *Shayanfar* и колектив [4] тестват комбиниран вертикален „link-елемент“, работещ предимно на срязване, чието сечение е съставено от стоманен двоен Т-профил, обвит в стоманобетонен кожух. Резултатите показват, че бетонът може значително да възпрепятства изкорубването на стъблото, да увеличи носимоспособността на срязване и дисипираната енергия. При многократни цикли и нарастване на натоварването бетонът се напуква и разрушава, след което остава да работи само стоманеното ядро на сеизмичния свързващ елемент.

При скорошни числени изследвания на *Massah u Dorvar* [4], е извършено проектиране и анализ на поведението на къси вертикални „link-елементи“ и устройства, направени от така наречените „shape memory alloys“. Този нов вид сплав има способността да възстановява оригиналната си форма дори след като е претърпяла големи деформации, благодарение на ефекта „памет на формата“ (който изисква нагряване) и ефекта суперпластичност (който е свързан с разтоварване). Идеята на тези устройства, монтирани от двете страни на вертикалния „link“, е да служат като възстановяваща система с цел намаляване на остатъчните деформации.

През 2016, *Wang* и колектив [4] провеждат експериментално изследване на триетажна конструкция от рамки с НЦВД с по едно композиционно междуосие в двете направления. Използвани са вертикални „link-елементи“, направени от конвенционална стомана, докато останалите елементи са изготвени от високоякостна стомана (подобна идея е изследвана от *Lian* и колектив [4], но за хоризонтални „link-елементи“). Елементът има отлично поведение при циклично натоварване, но за възела с диагоналите се наблюдава значителна деформация извън равнината на рамката. Резултат от това е разрушение на възела „link-елемент“ – греда в първото етажно ниво на конструкцията.

Възможността за употребата на неръждаема стомана в рамките с НЦВД е проучена от *DiSarno* и колектив [4] през 2008. Резултатите от нелинейния „pushover“ и „time history“ анализ на примерна система показват, че използването на елементи, направени от неръждаема стомана, могат да завишат съществено дисипацията на енергия и носимоспособността на конструкцията, като в същото време намаляват междуетажните премествания и местната загуба на устойчивост на елементите.

Научните търсения, свързани с разработване на неконвенционални „link-елементи“, са един от аспектите в работата на колектив от изследователи към катедра МДПК. Предложена и финансирана бе изследователска програма за проучване на възможностите за производство, влагане в конструкция и изследване на поведението при циклично натоварване на сеизмични свързващи елементи от готови заварени стоманени отливки в рамки с НЦВД. Настоящият доклад представя част от извършената работата и получените резултати от този проект.

## 2. Използване на готова стоманена отливка за „link-елемент“

Леярството е използвано от дълбока древност и е един от най-разпространените методи за получаване на метални заготовки и изделия. Има широка област на приложение в различни сфери – машиностроенето, енергетиката, бита и строителството.

През последните години леярските технологии и процеси са напреднали значително, проправяйки път на висококачествени отливки, които успяват да удовлетворят строгите изисквания на строителството. В резултат на този напредък се увеличава употребата на лети елементи в строителството.

Новите нисковъглеродни сплави, използвани в съвременните отливки, ги правят конкурентни на валцованата стомана по отношение на якост, заваряемост и устойчивост на корозия. Стоманените модулни отливки позволяват красиви, плавни форми и сложни възли, които са съобразени с разпределението на вътрешните усилия в елементите и възлите. Те биха могли да доведат до намаляване на разходите за производство и улеснение на монтажа на уникални конструкции. Отливките са предпочитани за триизмерни възли, при които се избягва сложното заваряване и производните от него заваръчни деформации и напрежения. Известна слабост в механичното поведение на отливките е заваръчният шев и съпътстващата промяна на структурата на основния метал в околосшевната зона, в резултат на голямото топлинно въздействие при заваряването [10, 13].

Голяма част от изследванията на стоманени отливки в Северна Америка се съсредоточават върху ползването им за критични елементи при конструктивни системи, проектирани за поемане на сеизмичните въздействия – направление, което все още не се развива в Европа. Резултатите на изследователите [7, 10] сочат, че отливките могат успешно да се ползват при проектиране на конструкциите като дисипатори с повишена дуктилност и ротационен капацитет.

Поради изброените преимущества на летите елементи и с цел да се избегне влиянието на заваръчните напрежения и негативният ефект от значително по-високата граница на провлачане в класическите сеизмични свързващи елементи, настоящото изследване бе насочено върху хистерезисното поведение на „link-елементи“ от готови отливки.

### 2.1. Производство на отливката

За изработката на стоманената отливка е потърсено съдействието на Института по металолеене и леярски технологии (ИМЛТ), София. Дружеството има близо 60-годишна история и е специализирано в разработване и внедряване на технологии за получаване на различни леярски сплави и производство на малки серии сложни по конфигурация и състав отливки.

За да започне процесът на производство, първата задача на технолога леяр е да направи чертеж на модела на отливката, марките за „сърцата“ и леярската форма. Това става, като се увеличат всички посочени на отливания елемент размери със съответния процент свиване, по този начин се компенсира свиването на сплавта. В модела се залагат така наречените „мъртви зони“, които са прибавки и се отнемат при последваща механична обработка. Също така е необходимо да бъдат спазени леярските закръгления и наклони, служещи за премахване на концентраторите на напрежение и за по-лесно изваждане на модела от формите [2].

Моделите на отливките (фиг. 2) се изработват от дърво, пластмаса или алуминиеви сплави (когато отливките са тънкостенни) и служат за оформяне на калъпа. Разделянето на формата става по делителната равнина, която може да минава по някоя от страните на модела (прости модели) или през него (делими, сложни модели). За постигането

на кухини в отливката, във формата се поставят „сърца“. Черупковите форми и „сърца“ се изработват от плакиран пясък, зърната на който са обвити във фенолформалдехидна смола, примесена с катализатор. При нагряване смолата свързва отделните песъчинки, като се образуват черупки с определена конфигурация. След това се боядисват с огнеупорна боя и се изсушават, което осигурява защита от агресията на метала и отделяните газове по време на процеса.



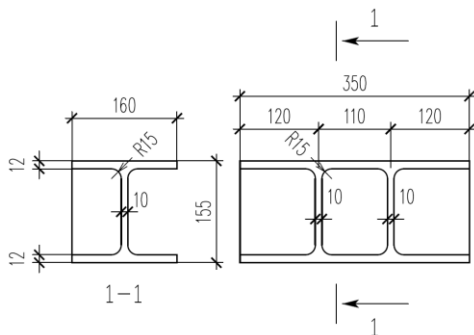
Фиг. 2. Прецизен алуминиев модел за отливка

За захранване на пещта се използва рециклирана стомана, която се нагрява до 1650 °С, добавя се силиций и температурата се увеличава до прегряване (фиг. 3). Шлаките и неметалните включения се утаяват и обират с шлакоотделящ флюс. Необходимото време за втвърдяване на отливката е около 15 минути, след което двете части на формата се разделят.

За целите на изследването бяха произведени три отливки (С1, С2 и С3), изготвени по един и същ алуминиев модел (С5). Проектирано е двойно Т-сечение с подходящо едностранно оребряване (фиг. 4), съгласно препоръките на [1].



Фиг. 3. Процес на леење



Фиг. 4. Схема на отливка

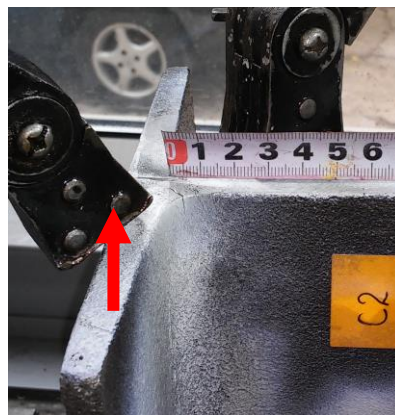
Минималните дебелини на поясите, стеблото и ребрата са съобразени с възможностите за отливане. Отливките са изработени от нисковъглеродна, нормализирана стомана с характеристики, близки до тези на стомана S235 (ВСтЗкп по БДС 2592-71). Предявено беше изискване отливките да са с добри пластични свойства и добра заваряемост. Отлят беше и един образец без оребряване (С4 – контролен образец), от който са изрязани пробни тела (спруветки) за определяне на механичните характеристики на стоманата.

## 2.2. Предварителни тестове

### 2.2.1. Магнитно-прахов метод за повърхностен контрол

Преди изпитване на образците е изследвано качеството на отливките за наличие на повърхностни дефекти чрез безразрушителен контрол. Използван е магнитно-прахов метод, реализиран от професионален дефектоскопист. Принципът за контрол чрез магнитни методи се основава на създаването на магнитно поле в изследвания обект и регистрирането на отклонения, изразени в изкривяване или прекъсване на магнитните силови линии при наличие на дефекти. Той се прилага както в технологичния производствен контрол за окачествяване на изделия от феромагнитни материали след процесите на леене, коване, студено и горещо формоване, обработки и заваряване, така и в експлоатационния контрол за откриване на повреди, появили се в процеса на експлоатация. Характерните дефекти, откривани чрез този метод, са пукнатини, всмукнатини, порестост, несплавявания, различни неметални включения и др. Процесът на приложение на метода се състои от три етапа – нанасяне на индикаторната среда, съдържаща магнитни частици; намагнитване на обекта; оценяване на показанията – наличие или не на нецялостности.

Констатирани са повърхностни микропукнатини (фиг. 5) при радиуса на закръгление между пояс и стебло в двете крайни сечения на отливките и в зоната на отслабване на стеблото при ребрата. Тези дефекти се дължат на неравномерното изстиване на елемента. Те са в допустими граници и са характерни за летите елементи. Преценено бе, че няма да окажат съществено влияние върху работата на „link-елемента“.



Фиг. 5. Прилагане на магнитно-прахов контрол (ляво), повърхностни микропукнатини в зона с неравномерно изстиване (дясно)

### 2.2.2. Стандартно изпитване на опън

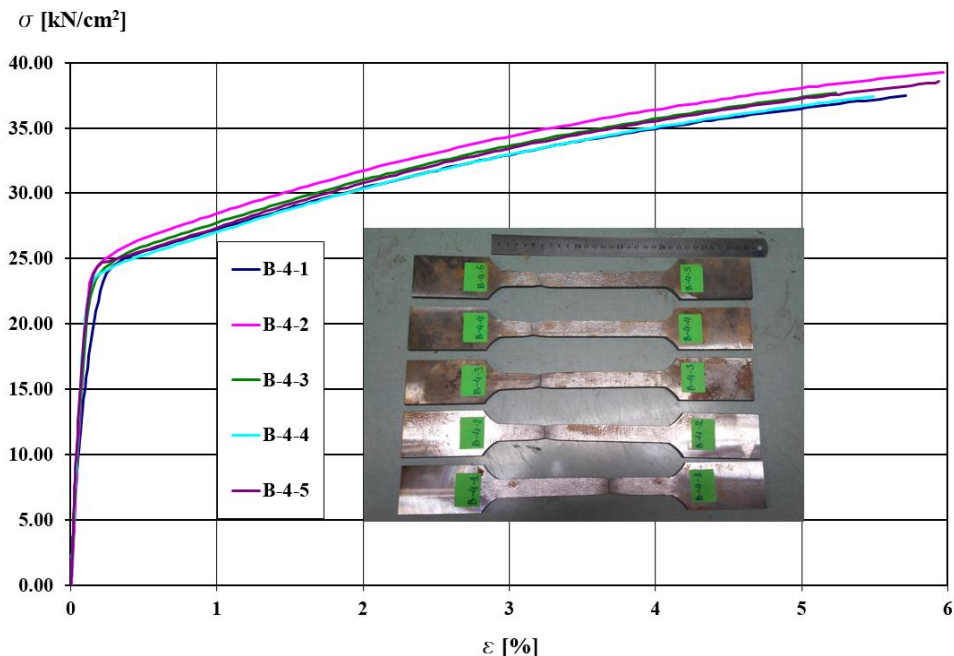
С помощта на механична ножовка са отделени поясите от стеблото на отливка С4, а след това получените елементи са обработени на фреза за постигане на константна дебелина. От така получените плоски листове са оформени чрез водно рязане пробни тела (спруветки) – 4 бр. от двата пояса и 1 бр. от стеблото и са подложени на стандартен тест на опън [12]. Водното рязане е сравнително нова технология за рязане. Характеризира се с високо качество и прецизност на извършения срез и основното му предимство е липсата на промяна в структурата на обработвания материал, поради отсъствието на високи температури.

Целта на изпитването е да се определят физико-механичните свойства на стоманата (фиг. 6) – граница на провлачане, якост на опън, модул на еластичност и относително удължение. За тестване на епруветките с дебелина  $7 \div 8$  mm се използва изпитвателна машина с обхват 0 – 10 метрични тона. Натоварването се извършва автоматично, а продължителността на изпитване на едно пробно тяло е в границите на 10 минути. Измерването на прилаганата опънна сила се извършва посредством датчик, свързан към измервателния механизъм на пресата. По време на изпитването, чрез екстензометър (конструиран на базата на два индуктивни датчика за преместване), се измерва удължението на предварително отбелязана върху пробното тяло базова дължина (база на екстензометъра). Измерването на базовата дължина преди изпитване и след разрушаване на пробното тяло се извършва посредством дигитален шублер. Резултатите от изпитванията са обобщени в табл. 1.

**Таблица 1. Резултати от изпитване на пробни тела**

Пробно тяло	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$L_0$ [mm]	$L_u$ [mm]	$F_p$ [kN]	$F_m$ [kN]	$R_p$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ [%]	$E$ [kN/cm <sup>2</sup> ]
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	185	39,99	69,78	24,93	43,49	23,33	20200
В-4-4 (пояс)	162,29	150	186	39,53	70,08	24,36	43,18	24,00	22117
В-4-5 (пояс)	157,43	150	188	39,31	68,83	24,97	43,72	25,33	22269

$S_0$  – 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;  $\varepsilon$  – относително удължение след разрушаване на пробното тяло;  $E$  – модул на еластичност



**Фиг. 6. Работна диаграма на материала на отливката**

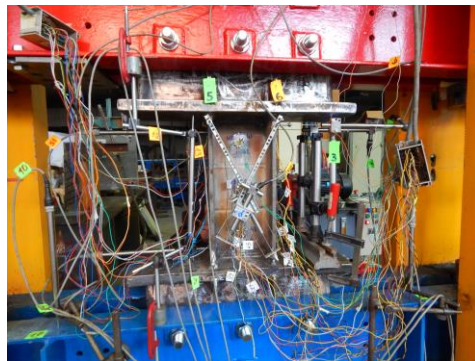
От анализа на фиг. 6, която обхваща деформации до 6% (поради обсега на двата датчика) и табл. 1, могат да бъдат направени следните заключения:

- материалът притежава дуктиленост и удължение при разрушаване, отговарящи на изискванията на националното приложение към Еурокод 3;
- материалът има средна граница на провлачане около 249 МПа и има работна диаграма, която може да се апроксимира с билинейна зависимост;
- липсва изявена площадка на провлачане, а пластичната работа на материала и уякчаването са осъществени в ясен, почти линеен (поне до относителни деформации 6%) еласто-пластичен клон.

При скъсване, материалът образува шийка и ломът на разрушението е матов, т.е. отливката има добри пластични свойства.

### **3. Експериментална постановка за изпитване на „link-елемент“ от готова стоманена отливка**

За целите на експерименталното изследване бе адаптиран стенд, който осигурява работа на изпитвания образец, кореспондираща на работата на реален „link-елемент“ в рамка с НЦВД. Стендът се състои от неподвижна рамка и подвижна греда, лагерувана в двата си края и осигуряваща хоризонтално преместване на горния край на образца – фиг. 7. Натоварването е реализирано чрез хидравличен сервоактуатор „Капрони“ ( $\pm 200$  mm ход;  $\pm 500$  kN сила) при прилагане на контролирано хоризонтално преместване върху подвижната греда и измерване на силата в месдозата на актуатора.



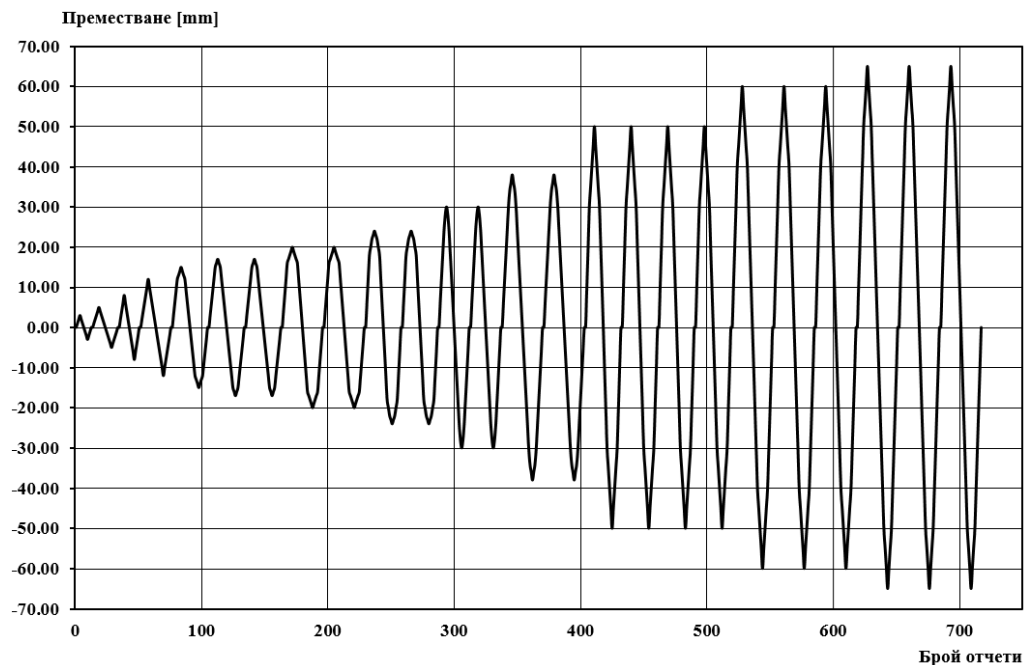
**Фиг. 7. Експериментална постановка (ляво),  
разположение на измервателните уреди (дясно)**

Реализираните премествания и относителни деформации в тествания образец са регистрирани чрез датчици за преместване (индуктивен тип) и тензорезистори (електросъпротивителни датчици). Индуктивните датчици регистрират общите премествания в постановката, взаимните премествания между двата края на отливката и удължаването и скъсването в диагоналите на стеблото. Електросъпротивителните датчици са разположени в характерни сечения от поясите и стеблото и дават информация за относителните деформации в тези сечения. Протоколът за натоварване отговаря на указанията на FEMA 461 [9] за квази-статичен цикличен тест. Поради относително късия образец и неговата

значителна коравина, натоварващата система работи в горната граница на своя капацитет (хоризонтална сила около 500 kN).

#### 4. Първоначални експериментални резултати

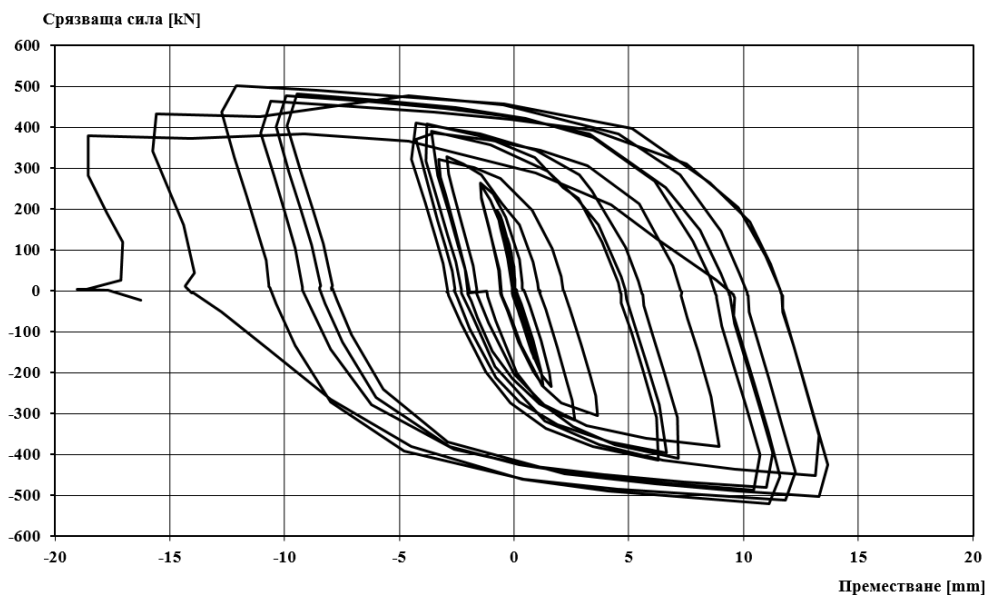
В началото на експеримента бе зададено циклично натоварване с малки стойности на преместване на буталото на сервоцилиндъра, с цел проверка нормалната работа на натоварващата и измервателната система. При следващите цикли бяха установени значителни неработни деформации в болтовите съединения (между подвижната греда, неподвижната рамка и изпитвания образец) от порядъка на 10 mm. Това определи избора на първи цикъл от 12 mm преместване на буталото. Амплитудата на нарастване на преместването (фиг. 8) е определена съгласно [9], като всеки цикъл от натоварването се повтаря два пъти и се спазва изискването броят на ходовете да е поне 10. Амплитудата нараства по формулата:  $a_{i+1} = 1,4a_i$ , като се изключва влиянието на неработните деформации. По време на експеримента се следи  $\Theta_p$  – ъгълът на ротация на „link-елемента“, като според Еврокод 8,  $\Theta_p < \Theta_{pR} = 0,08$  rad за къси елементи.



Фиг. 8. Протокол за натоварване

След пробните цикли на натоварване и констатираните големи неработни деформации бе извършено допълнително укрепване на стенда. Наличието на нормалните луфтове в болтовите съединения (2 mm разлика в диаметрите на отвора и тялото на болта) води до значително завъртане на „link-елемента“, което „изкривява“ първоначалния замисъл за работа на сеизмичния свързващ елемент, съответстваща на работата му в реална конструкция. Предвидено е това несъответствие да бъде значително ограничено при тестовете на следващите образци.

Очакваното начало на пластификация на „link-елемента“ съвпадна с теоретично изчислената сила  $V_{p,link} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w (d - t_f) = \frac{24,9}{\sqrt{3}} 1,1 (15,5 - 1) = 229 \text{ kN}$ . Образецът демонстрира добро хистерезисно поведение (фиг. 9) и съществено уякчаване. Несиметрията в примките спрямо нулевата точка в диаграмата се обяснява с пластичните деформации в болтовите съединения (овализиране на отворите поради смачкване) и несиметричните неработни деформации в стенда.



**Фиг. 9.** Хистерезисна диаграма, представяща зависимостта срязваща сила-взаимно преместване на двата края на образца



**Фиг. 10.** Крехко разрушаване на експериментален образец СТ1

Максималното реализирано преместване на буталото бе при 65 mm, и ъгъл на ротация на „link-елемента“  $\Theta_p = 0,045 \text{ rad}$ , когато бе достигната и максималната сила на сервоактуатора. При повторението на този цикъл бе констатирано крехко разрушение на околешевната зона между десния пояс на отливката и плочата от валцуваната стомана. Въпреки това, в началото няма значителен спад на измерената от месдозата сила –

феномен, който 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 отсрещния пояс, което води до пълно разрушение на образеца (фиг. 10).

Общият брой на реализираните цикли е 25, като 14 от тях са в нееластичен стадий (при ход на буталото  $\geq 30$  mm).

## 5. Основни изводи

В България съществуват технологични възможности за производство на отливки за целите на строителството. Към момента липсва ясна практика за контрол на качествата на лятата стомана и практически леярската индустрия работи по стандарти, които не са релевантни към системата Еврокод. Не може да се каже еднозначно какви мерки по откисляването на стоманата се взимат и каква е ударната жилавост на материала. На този етап не може да се направи еднозначно заключение относно заваряемостта на стоманата.

Материалът на лятата стомана има граница на провлачане около 250 МПа, което е много по-близо до номиналната граница на провлачане за S235, в сравнение с изделията от валцувани стомани. Използването на отливки е една възможност да се разреши въпросът с липсата на стандарт, който да регулира ограниченията за горна граница на провлачане при съответен клас стомана. Материалът в пояса и стеблото на отливката има едни и същи якостни характеристики.

Стоманената отливка бе тествана чрез цикличен знакопроменлив товар. Получената хистерезисна зависимост се доближава до идеалния хистерезисен цикъл. Регистрирано бе закръгляване на кривата поради ефекта на *Bauschinger*.

Образецът се разрушава крехко, чрез внезапно разкъсване на единия пояс в околошевната зона. Ломът на разкъсване е зърнест и бляскав. Регистрираното крехко разрушаване изисква допълнителен анализ и изследвания.

## Благодарности

Настоящото изследване е финансирано от ЦНИП при УАСГ с договор Д-87/16.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *БДС EN 1998-1*: Еврокод 8. Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Част 1: Общи правила, сеизмични въздействия и правила за сгради, 2006.
2. *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.
3. *AISC Committee on Specifications*. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, 2010.
4. *Azad, S. K., Topkaya, C.* A Review of Research on Steel Eccentrically Braced Frames, *Journal of Constructional Steel Research* 128, 2017.
5. *Berman, J. W., Bruneau, M.* Experimental and Analytical Investigation of Tubular Links for Eccentrically Braced Frames. *Engineering Structures* 29, 2007.
6. *Bruneau, M., Uang, Ch.-M., Sabelli, R.* Ductile Design of Steel Structures. McGraw-Hill, 2011.

7. *Civil Engineering and Engineering Mechanics Department, University of Arizona.* Development of Cast Modular Components for Steel Construction, 2013.

8. *Clifton, C., Cowie, K., Fussell, A., Wong, M., Volynkin, D.* Eccentrically Braced Frames with Removable Links – Design Methodology. Steel Advisor EQK1006, Steel Construction New Zealand Inc., 2013.

9. *FEMA 461, Applied Technology Council.* Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components. 2007.

10. *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.

11. *Hjelmstad, K. D., Popov, E. P., ASCE.* Cyclic Behavior and Design of Link Beams, 1983.

12. *International Standard ISO 6892-1.* Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature, 2009.

13. *Schober, H.* Steel Castings in Architecture and Engineering. Modern Steel Construction, 2003.

14. *Stratan, A., Dubina, D.* Bolted Links for Eccentrically Braced Steel Frames Connections in Steel Structures V – Amsterdam, 2004.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CAST STEEL LINKS FOR ECCENTRICALLY BRACED FRAMES

**B. Gancheva<sup>1</sup>, Tzv. Georgiev<sup>2</sup>, O. Ganchev<sup>3</sup>, St. Raykov<sup>4</sup>**

**Keywords:** *eccentrically braced frames, steel castings, experimental investigation, cyclic test, ductility*

### ABSTRACT

Eccentrically braced steel frames are one of the seismic resistant structural systems treated in Eurocode 8. In this type of structural system the main dissipative element is the part of the collector beam limited between the diagonals, called a seismic link. This paper presents the experience in designing, manufacturing and experimental investigation of short seismic links made of steel castings. Preliminary tests are conducted for establishing the engineering stress-strain diagram of the material and assessing the quality of the casting. The link-element is tested under quasi-static cyclic load up to failure, while its hysteresis loops are recorded. Initial conclusions and remarks on the findings from the study are made.

---

<sup>1</sup> Bistra Gancheva, Eng. PhD student, Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: bgancheva\_fce@uacg.bg

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Ognyan Ganchev, Senior Assist. Prof. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ganchev\_fce@uacg.bg

<sup>4</sup> 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