



Получена: 18.03.2018 г.

Приета: 31.10.2018 г.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА МОДИФИЦИРАНИ ДИАГОНАЛИ ЗА НИСКОЦИКЛИЧНА УМОРА

Цв. Георгиев¹, О. Ганчев², Тр. Цветкова³

Ключови думи: CBF-MB, модифицирани диагонали, нискоциклична умора, цикличен тест

РЕЗЮМЕ

Вертикалните връзки (рамки с центрично включени диагонали) са традиционна система за проектиране на сгради и съоръжения в сеизмични райони. Те са добре познати в инженерната общност и са застъпени във всички съвременни стандарти за сеизмично проектиране [1 – 3].

С цел да се запазят сериозните преимущества на този вид системи и в търсене на подобрение на сеизмичното им поведение посредством научноизследователски проект [4, 5], в периода 2011 – 2012 година в катедра МДПК на СФ се разработва подобрена система, наречена CBF-MB (рамки с центрично включени модифицирани диагонали). Модифицираният диагонал е критичният елемент, който обуславя дисипативното ѝ поведение. За да се изследва издръжливостта на модифицираните диагонали в постановка на променлива пластичност (нискоциклична умора) е планирана и проведена серия от експериментални изследвания. Настоящата публикация представя тестовете, проведени в УНИЛ към катедра МДПК, и получените чрез тях базови параметри. Представена е опитната постановка и са описани наблюдаваните специфики на поведението на тестваните образци в условия на циклично знакопроменливо натоварване в еласто-пластичната област.

¹ 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

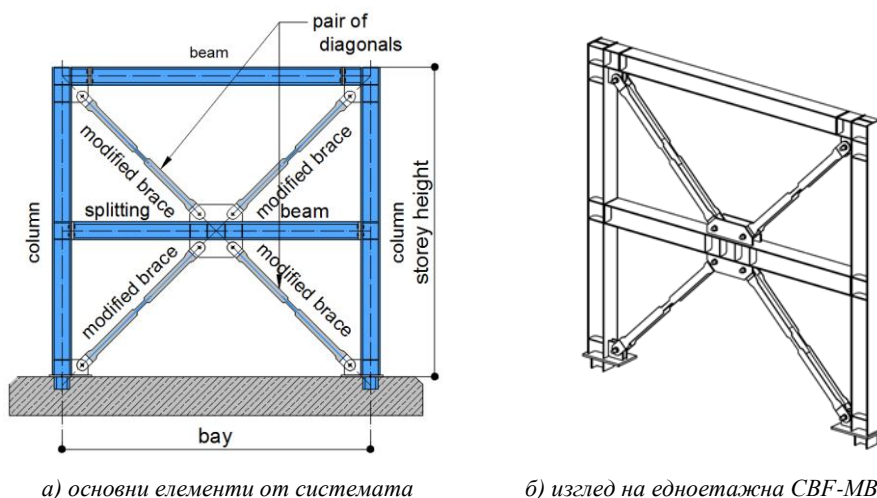
² Огнян Ганчев, асистент инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ганчев_fce@uacg.bg

³ Траяна Цветкова, студент ССС, Строителен факултет, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: terry1607@abv.bg

1. Въведение

Проектирането на иновативни системи с ясно дефинирани критични елементи и с подобро дисипативно поведение е ясно очертана тенденция в съвременното сеизмично инженерство и в частност в сеизмичното осигуряване на сгради със стоманен носещ скелет. Доказателство за това твърдение е завършилият наскоро международен проект *INNOSEIS Valorization of innovative anti-seismic devices* www.innoseis.ntua.gr [6] и предложените чрез него иновативни системи, които да бъдат включени в следващото поколение еврокодове.

Системата CBF-MB¹ (Рамки с центривно включени модифицирани диагонали) е иновативна система, произлизаща от класическите рамки с центривно включени диагонали, която заимства техните предимства и подобрява техните недостатъци – фиг. 1. Тя е разработена в периода 2011 – 2012 година [4 и 5] в УНИЛ² към катедра МДПК³ на СФ⁴ на УАСГ. В основата на системата стоят модифицираните диагонали (МВ) и техните подобрени свойства за издръжливост при знакопроменливи пластични деформации (Low Cycle Fatigue, LCF).



Фиг. 1. Конструктивна схема на рамки с центривно включени модифицирани диагонали

На този етап от развитието на системата CBF-MB модифицираните диагонали се проверяват за степен на повреда при нискоциклична умора (Damage Index) посредством методика, изведена чрез компютърна симулация [6, стр. 282] и основаваща се на литературни данни за циклично поведение на стомани с якостни и деформационни характеристики, сходни със стомана S235 [7 – 9]. Ясно установен научен подход е извеждането на S-N (ε -N, δ -N, ϕ -N⁵) криви да става по експериментален път [10 – 13]. Чрез тестове реалистично могат да се отчетат важните фактори като вътрешни напрежения, изотроп-

¹ Concentrically Braced Frames with Modified Braces

² Учебна Научноизследователска Лаборатория

³ Метални, дървени и пластмасови конструкции

⁴ Строителен факултет

⁵ δ , ε , ϕ – с използваните индекси са обозначени съответно осово преместване, относителна деформация и завъртане

но уякчаване или омекване на материала, геометрични несъвършенства и ефекти от развитие на местна загуба на устойчивост в натиснатите стени на напречното сечение. Тези фактори определят издръжливостта на елемента при циклично знакопроменливо натоварване, предизвикващо реагиране на елемента в нелинейната област. Това наложи провеждане на серия от циклични тестове на модифицирани диагонали с цел извеждане на емпирична δ -N крива. Чрез тази крива се установява, при определени постоянни скъсявания и удължения на диагонала δ , колко цикъла са необходими за достигане до разрушаване (разкъсване), което се отъждествява с достигане на индекс на повреда $DI = 1,0$. Емпиричната δ -N крива се използва за оразмеряване на модифицирани диагонали след провеждане на решение с история във времето (Time History Analysis, THA) с реални или изкуствени акселерограми [6]. По този начин се определя индексът на повредите в диагоналите при различните гранични състояния при проектиране, основано на реалното поведение на конструкцията (Performance Based Design, PBD).

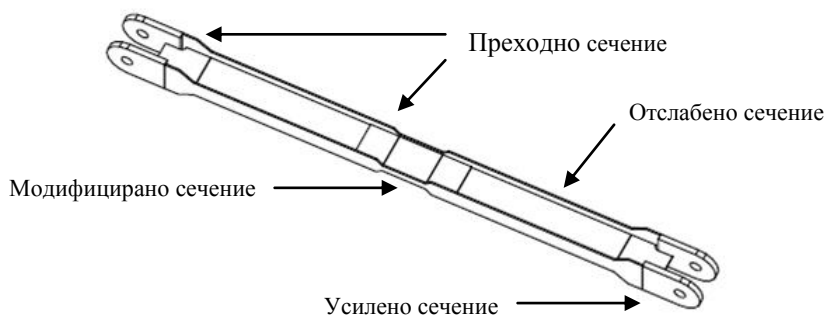
2. Модифицирани диагонали

Модифицираните диагонали (MB) се проектират от "Н"-образно съставено заварено сечение с променящи се характеристики. Варират се ширината на поясите и дебелината на стеблото по дължината на елемента, така че да се дефинират различните зони с различни напречни сечения, илюстрирани на фиг. 2.



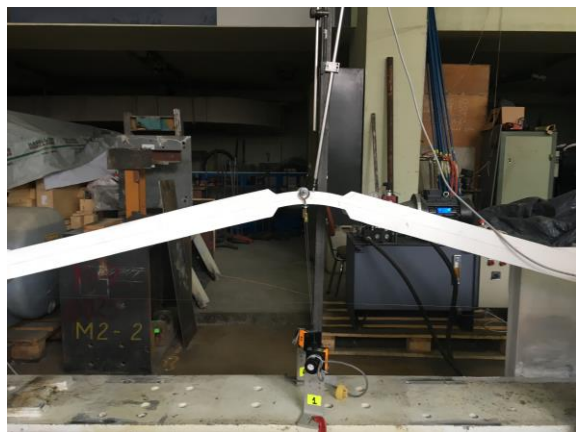
Фиг. 2. Основни зони и типове сечения, съставляващи модифициран диагонал

Крайните зони от диагоналите са усилены чрез увеличаване на ширината и дебелината на поясите и са наречени усилены сечения (SS). Така се постига лесно детайлиране чрез болтова става и се осигурява изцяло еластично поведение. В средата на диагонала се композира модифицирано сечение (MS). То се характеризира с намалена коравина на огъване, но с увеличено напречно сечение и следователно увеличена носеща способност за опън. Така сечението се явява отслабено за огъване и усилено за осова сила (фиг. 3). Между усиленото сечение и модифицираното сечение се конституира отслабено сечение (RS), което се характеризира с по-малка носеща способност за опънна осова сила, но по-голяма носеща способност за огъване. Между сеченията MS, RS и SS се прави плавен преход, който е обозначен с (TS).



Фиг. 3. Общ изглед на модифициран диагонал

В условията на силно земетресение сградните конструкции със системата CBF-MB реагират като етажите реализират хоризонтални премествания, а съответно модифицираните диагонали са подложени на циклично скъсяване и удължаване. При скъсяване на елемента и породения от това натиск формата на изкълчване е предопределена. Тя се характеризира с огъване в средата и развитие на пластични деформации само в зоната с модифицираното сечение (фиг. 4а). При промяна на посоката на преместванията елементът се изправя и удължава, като в него се поражда опън. Пластичните деформации при удължаването се реализират само в отслабеното сечение без, да навлизат в модифицираното сечение (фиг. 4б).



а) при изкълчване (скъсяване)



б) при опън (удължаване)

Фиг. 4. Деформираните схеми на модифициран диагонал

Диагоналът е проектиран по този нетрадиционен начин с цел всички пластични деформации, породени от опънно осово усилие, да се локализируют в отслабените сечения, а пластичните деформации от огъване при изкълчване да се проявяват в средното модифицирано сечение. Този подход позволява разделяне на местата, в които се развиват пластични деформации, и постигане на подобро поведение при циклично знакопроменливо натоварване (нискоциклична умора).

3. Експериментално изследване

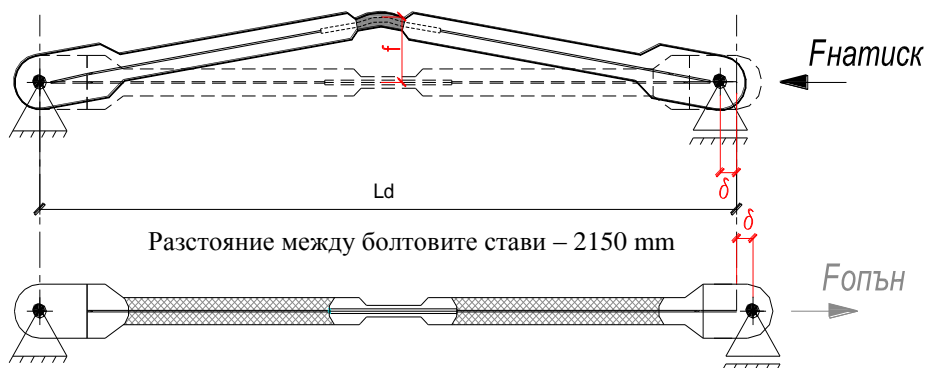
3.1. Експериментална постановка

За да се изследва реагирането на модифицираните диагонали при циклично събяване и удължаване с развитие на пластични деформации, и за да се наблюдават механизмите за развитие на повреди в тях, бе проектирана и реализирана експериментална постановка. За целта бе използван наличният универсален стенд в УНИЛ, като натоварващата система и изследваният образец са поставени последователно и съосно – фиг. 5. Стендът в използвания формат се състои от две неподвижни опори, обединени със свързваща опорна греда. За лявата опора ставно е свързан единият (неподвижен) край на изследваните образци. За дясната опора е свързан хидравличният актуатор. Между актуатора и изследвания образец е проектирана „подвижна“ опора, която позволява надлъжно преместване на буталото, респективно образца, и възпрепятства преместванията по вертикала и извън равнината на стенда. Краят на буталото и изследваният образец са свързани посредством болтова става.



Фиг. 5. Експериментална постановка

Натоварването е реализирано чрез хидравличен сервоактуатор „Капрони“, с ход на буталото ± 200 mm и максимална прилагана сила ± 500 kN. Тестовете се провеждат при прилагане на контролирано хоризонтално преместване върху подвижния край на образца δ и съпровождащо измерване на силата F в месдозата на актуатора – фиг. 6. Друг параметър, който се следи по време на експериментите, е стойността на максималното вертикално преместване в средата на образца f , наречен стрелка при изкълчване. Тя е своеобразен измерител за реализираната кривина в модифицираното сечение. Измерването на този параметър се извършва с два потенциометрични датчика № 0 и 1 и един индуктивен датчик № 2. Преместването δ се следи посредством индуктивен датчик № 1. По време на тестовете са правени и контролни замервания с механична линейка.

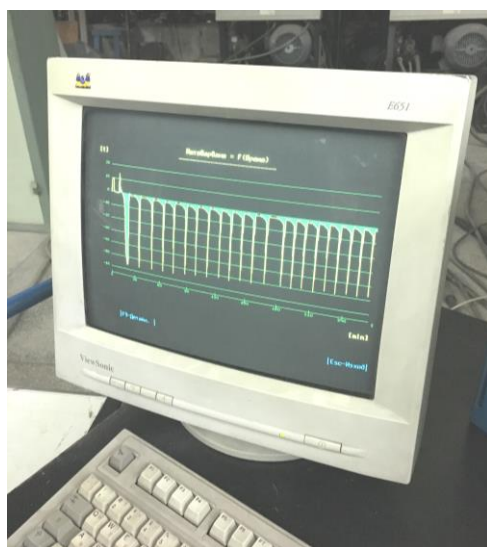


Фиг. 6. Измервани параметри по време на тестовете

Тестовете се провеждат с ползване на компютъризирана система за задаване на протокола на натоварване и запис, визуализация и обработка на данните. Местоположението на описаните датчици е показано на фиг. 7.



a)



б)



в)

Легенда:

- а) индуктивен датчик № 1 и месдоза;
- б) потенциометрични датчици № 0 и 1 и индуктивен датчик № 2;
- в) компютърно управление.

Фиг. 7. Измервателни датчици и система за компютърно управление

3.2. Експериментални образци

За целите на експерименталното изследване са проектирани и произведени 9 експериментални образца, разделени в три серии по три образца – фиг. 8. Те са възложени на професионален производител, като по време на производството е извършван периодичен контрол. Образците са съставени от листов материал, закупен от българския пазар по заявка и след извършен контрол на сертификати. Съставянето по геометрия и заваряването са извършвани в нормален работен процес без изкуствено завишена прецизност, характерно за работа в лабораторни условия. Елементите са класифицирани като ЕХС 2, съгласно [14]. Целта на този подход е изследваните образци максимално да се доближават до произведени модифицирани диагонали в реални пазарни и производствени условия. По този начин в тях биха били налични всички допустими от [14] и залегнали в [15] несъвършенства (геометрична нелинейност и непланшетности, заваръчни напрежения, механични подрези, неточности в монтажа и др.), характерни за реалните инженерни елементи.



Фиг. 8. Експериментални образци

Следва да се отбележи още една особеност на производствената технология. Форматът на поясите се получава чрез газо-пламъчно рязане на ламарини с дебелина 5 mm. Поради относително малката дебелина на ламарината се получава срез, който е наъбен и нагорен. Той се обработва ръчно посредством механичен ъглошлайф. Именно от последната ръчна операция се получават подрези или драскотини по външните ръбове на поясите. Както става ясно от изложението нататък, това са предпоставки за поява на първа пукнатина на по-ранен етап.

3.3. Протокол за натоварване

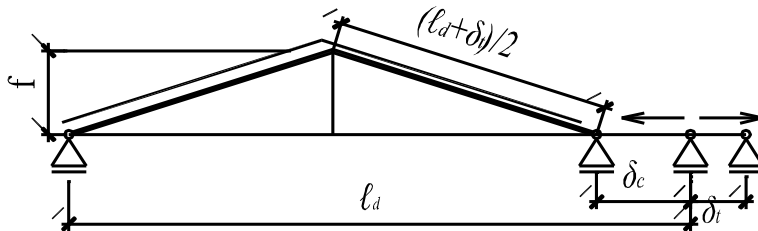
По време на подготовката на настоящата публикация бяха напълно завършени тестовете на образците от серия 1 (бойдисаните в бял цвят). Ето защо описаните тук протоколи за натоварване се отнасят само за тази серия. Прилаганите разтягане и скъсяване на образците са обобщени в табл. 1.

Таблица 1. Приложени скъсявания и удължавания

Серия № - № тест	Максимално приложено скъсяване, mm	Максимално приложено удължаване, mm
01-01	60	45
01-02	80	45
01-03	120	45

Следва да се отбележи, че първоначалният замисъл при провеждането на тестовете е амплитудите на преместванията при опън и натиск да са еднакви. Беше регистрирана сериозна разлика в реалните якостни характеристики на доставените стомани от тези, декларирани в сертификатите на производителите. Натоварващата система бе поставена в условия да работи със своя максимален капацитет, по отношение на прилагана опънна сила, и това е причината да не може да се реализират плануваните премествания при разтягане на елементите, които да са еквивалентни на амплитудите при скъсяване. Това наложи промяна в протокола на натоварване. По същата причина се наложи да се проведе аналитично изследване и да се изведе формула, с която да се обвържат прилагано скъсяване δ_c , прилагано удължаване δ_t и реализираната стрелка f при модифициран диагонал с дължина l_d . Подобен аналитичен извод (1) е изведен в [4], при предпоставка за $\delta_c = \delta_t$ и полигонална деформирана линия.

$$f = \sqrt{l_d \cdot \bar{\delta}_d} \quad (1)$$



Фиг. 9. Хипотеза за полигонална деформирана линия на модифициран диагонал

Като се приложи хипотезата за полигонална деформирана линия (фиг. 9) и чрез използване на зависимостите на правоъгълния триъгълник, се достига до обобщен аналитичен извод (2) при предпоставка за $\delta_c \neq \delta_t$. Може да се каже, че израз (1) се явява частен случай на израз (2), когато $\delta_c = \delta_t$.

$$f = \sqrt{\bar{l}_d \cdot \bar{\delta}_d} \quad (2)$$

където

$$\bar{\delta}_d = \frac{\delta_c + \delta_t}{2} \text{ е приравнено осово преместване.} \quad (3)$$

$$\bar{l}_d = l_d + \frac{\delta_t - \delta_c}{2} \text{ е приравнена осова дължина на елемента.} \quad (4)$$

Като се приложат така изведените зависимости, параметрите, заложили в табл. 1, могат да бъдат приравнени до параметри на тест с константни амплитуди – табл. 2.

Таблица 2. Приравнени скъсявания и удължавания

Серия № - № тест	Приравнено преместване $\bar{\delta}_d$, mm	Приравнена осова дължина \bar{l}_d , mm	Теоретична стрелка f , mm
01-01	52,5	2142,5	335,3
01-02	62,5	2132,5	365,1
01-03	82,5	2112,5	417,5

4. Специфики на наблюдаваното поведение на тестваните образци

Една от целите на експерименталните изследвания бе да се наблюдава визуално и да се протоколира механизмът на поява и натрупване на повреди. За целта са водени записки от наблюдаваното поведение и са правени серия от фотоси по време на провеждане на експериментите, които са обобщени и описани както следва. Като първи етап от процеса на натрупване на повреди се дефинира първата появява на малка косъмчата пукнатина (възникване на повреда), която може да бъде идентифицирана визуално. Това се случва след провеждане на определен брой цикли (5, 24 и 11, съответно за тест 01-01, 01-02 и 01-03). На база на опита, натрупан от провеждане на серия 1, може да се обобща, че не големината на кривината, прилагана върху модифицираното сечение, или броят цикли имат водещо значение. Първата визуална поява на пукнатина се дължи най-вече на налични дефекти по повърхността и степента на нарушение на повърхността на профила – малък подрез (фиг. 10а) или драскотина (фиг. 10б). Друго регистрирано наблюдение е, че тази пукнатина се проявява някъде в средата на модифицираното сечение, в най-изпъкналата част на един от поясите. Това е мястото с най-големите относителни деформации и когато там има и наличен дефект по повърхността на метала, той става предпоставка за проявата на първа повърхностна пукнатина.



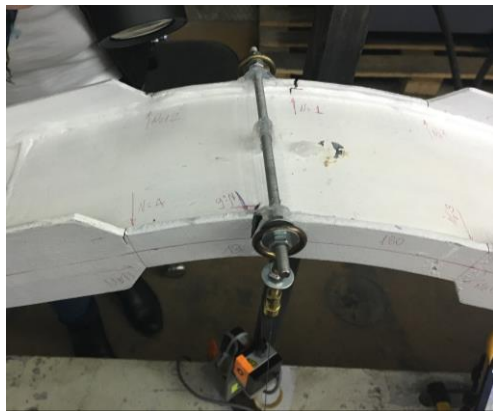
а) тест 01-01, поява на две близки пукнатини в цикъл № 05, провокирани от производствен дефект (механичен подрез)



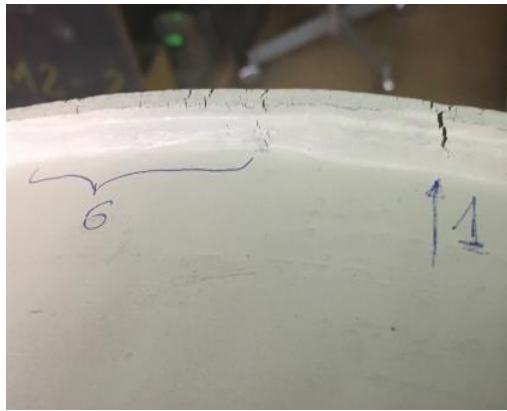
б) тест 01-02, поява на първа пукнатина в цикъл № 24. Отново при наличие на малък механичен подрез

Фиг. 10. Етап 1 от процеса на развитие на повреди. Поява на първа пукнатина

Втори етап в процеса на натрупване на повреди е появата на множество пукнатини. При него характерното е, че колкото е по-малка стрелката при изкълчване f (т.е. по-малка кривина), толкова по-малък е броят на регистрираните пукнатини. При тест 01-01 те са около 8. При тест 01-02 пукнатините са 13, докато при тест 01-03 те са почти двойно – фиг. 11.



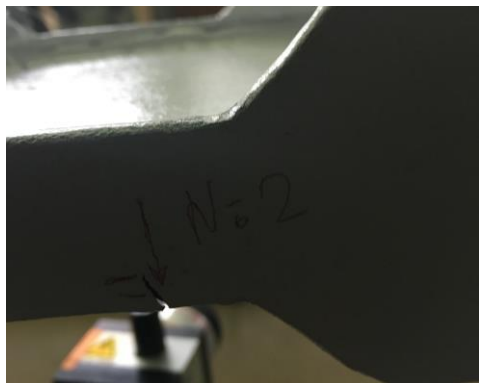
а) тест 01-02, брой малки пукнатини (13 броя), регистрирани до цикъл № 56



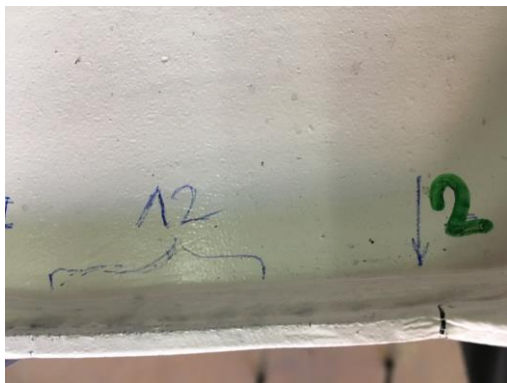
б) тест 01-03, групиране на множество малки пукнатини (например група номер 6), регистрирани до цикъл № 33

Фиг. 11. Етап 2 от процеса на развитие на повреди. Поява на множество пукнатини

Трети етап може да се дефинира като етапа на развитие на пукнатини – фиг. 12. Тук е мястото да се поясни, че етап 2 и етап 3 не са ясно разграничени, а по-скоро се преплитат. Следва да се добави, че с нарастване на броя на циклите не всички пукнатини се развиват, а по-значително развитие получават само няколко пукнатини.



а) тест 01-02, развитие на пукнатина (номер 2) при цикъл № 63. Дължина 6 mm, ширина 1,5 mm

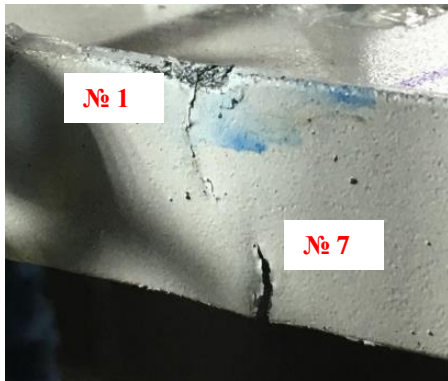


б) тест 01-03, развитие на пукнатина (номер 2) при цикъл № 39. Дължина 5 mm, ширина 1 mm

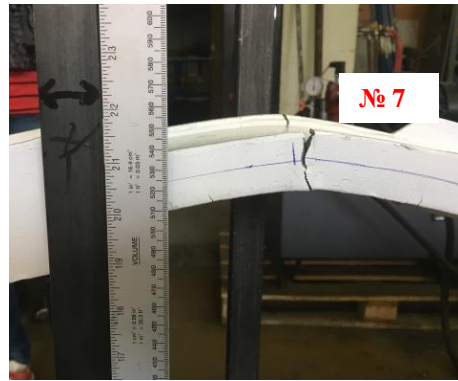
Фиг. 12. Етап 3 от процеса на развитие на повреди. Развитие на пукнатини

Следва четвърти етап, които се характеризира с по-прогресивно навлизане на пукнатините от средата на модифицираното сечение. Те навлизат от най-отдалечения край на поясите към нулевата линия на сечението – (фиг. 13а). По правило се образуват двой-

ка пукнатини по изпъкналата и вдлъбнатата страна на пояса, които постепенно се съединяват, като така разкъсват пояса – (фиг. 13б). Това явление е съпроводено и с навлизане на пукнатина към заваръчния шев между пояс и стебло и последващо навлизане в удебеленото стебло – фиг. 14. Характерно за този четвърти етап е, че повредите се концентрират в средата на MS, развитието на останалите пукнатини затихва и се регистрира увеличаване на стрелката при изкълчване. Също така се наблюдава, че RS остава напълно изправено, т.е. кривината се реализира само в рамките на MS.

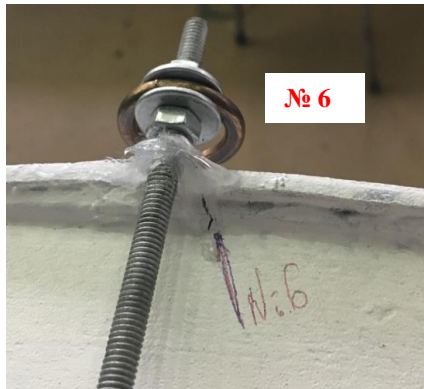


а) тест 01-01, съединяване на пукнатини (номер 1 и 7) при цикъл № 79

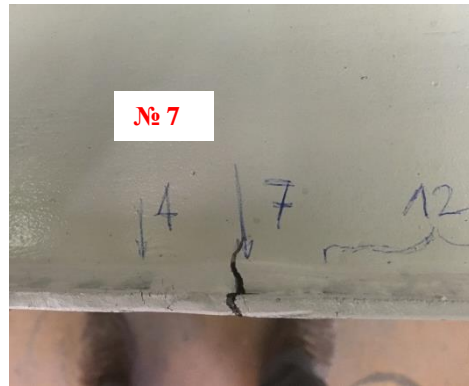


б) тест 01-03, съединяване на пукнатини (номер 7) при цикъл № 66

Фиг. 13. Етап 4 от процеса на развитие на повреди. Съединяване на пукнатини в средата



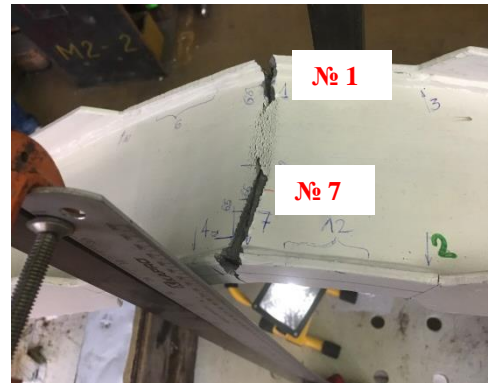
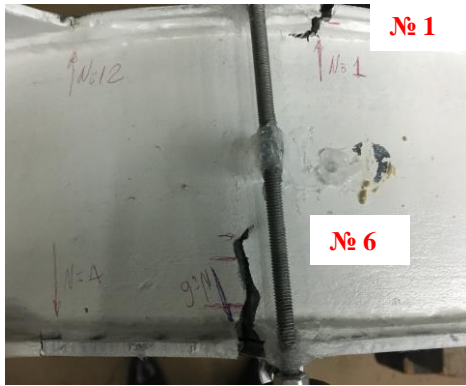
а) тест 01-02, начално навлизане на пукнатини (номер 6) в стеблото при цикъл № 55



б) тест 01-03, значително навлизане на пукнатини (номер 7) в стеблото при цикъл № 61

Фиг. 14. Етап 4 от процеса на развитие на повреди. Навлизане на пукнатина в стеблото

Последният, пети етап от механизма на натрупване на повреди, е етапът, в който пукнатината в стеблото започва да се развива и да навлиза от пояса към средата на стеблото. При тестове 02 и 03 пукнатините в стеблата се развиваха от страната и на двата пояса и постепенно се сливаха до достигане до цялостно разкъсване на стеблото – фиг. 15. При тест 01 това явление не бе наблюдавано до край, тъй като след навлизане на пукнатина едностранно в стеблото, бе взето решение амплитудата на удължаване да се увеличи и сечението да се разкъса.

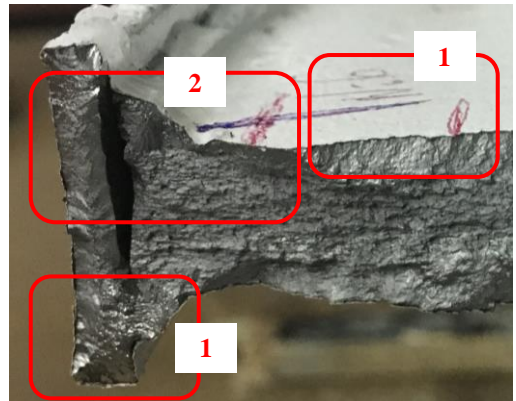
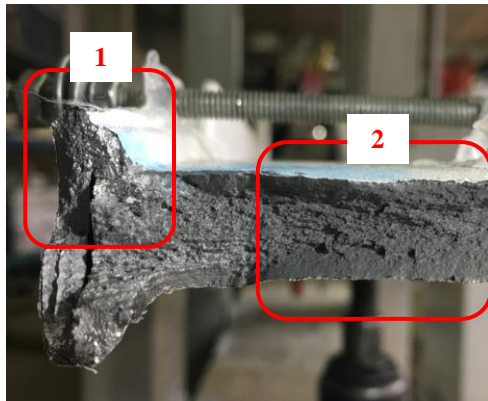


а) тест 01-02, разкъсване на стеблото при цикъл № 93. Последен регистриран цикъл е № 97

б) тест 01-03, разкъсване на стеблото при цикъл № 69. Последен регистриран цикъл е № 69

Фиг. 15. Етап 5 от процеса на развитие на повреди. Разкъсване на стеблото

Сечението, в което се разкъсва профилът, също бе предмет на наблюдения. Ясно може да се види, че частите от поясите, където се заражда и развива пукнатина, имат изразен зърнест и бляскав лом – фиг. 16, зони, обозначени с "1". Сеченията, които се разкъсват при последните десетина цикъла, се характеризират с матов блясък и лом с форма на обърнат конус (пясъчен часовник) – фиг. 16, зони, обозначени с "2".



а) тест 01-01;

- 1) – зърнесто-бляскав лом;
2) – матово-кристаловиден лом.

б) тест 01-02;

- 1) – зърнесто-бляскав лом;
2) – матово-кристаловиден лом.

Фиг. 16. Различни видове ломове в сечението, където се реализира разкъсване

5. Основни изводи

Като резултат от проведените три броя тестове от серия 1 могат да бъдат формулирани следните основни изводи:

Концепцията за дирижиране на формата на поясите и стеблата от модифицираните диагонали води до разсредоточване на развитието на пластични деформации. В

нито един от трите проведени теста не бе наблюдавано развитие на повреди в отслабеното RS сечение. Всички повреди от нискоциклична умора се съсредоточават в средното MS сечение.

Появата на първата пукнатина на повърхността е свързана с наличие на производствен повърхностен дефект и неговата степен на увреждане на повърхността, а не толова с големината на прилаганото скъсяване и удължаване на диагоналите. Препоръчително е производствената технология да се усъвършенства и фигурното изрязване на поясите да се извършва чрез водно рязане или плазмено рязане. Целта е избягване на ръчната обработка на ръбовете на поясите и силно намаляване на броя и степента на подрезите и драскотините.

Дефинирани са пет етапа на развитие на повреди при циклично знакопроменливо натоварване. Етапите не са рязко разграничени, а плавно преминават от един в друг. Етапи 2 и 3 в известна степен се припокриват. След провеждане на по-голям брой тестове (серия 2 и 3) би могло да се даде и количествена оценка на броя цикли, в които се развива определен етап.

По време на експерименталното изследване не бяха регистрирани проява на местна загуба на устойчивост нито в MS, нито в RS.

Издръжливостта на модифицираните диагонали при циклично знакопроменливо натоварване с развитие на пластични деформации е по-висока в сравнение с конвенционални диагонални елементи. В табл. 3 е направено сравнение между теста, проведен от *Георгиев и Ганчев* (2017), и тестове на рамки с „Н-образни“ съставени заварени диагонали, проведени от *Райчева и колектив* [16], през 2016 година и анализирани и обработени в [18]. Следва да се отбележи, че модифицираните диагонали и конвенционалните „Н-образни“ съставени заварени сечения са възможно най-подобните едни на други. Въпреки известните условия на двата теста, все пак ясно се вижда, че модифицираните диагонали издържат значително по-голям брой цикли.

Таблица 3. Сравняване на брой цикли до разрушение

Тестове 2017, <i>Георгиев, Ганчев</i>			Тестове 2016, <i>Райчева и колектив</i> [16]		
Серия № - № тест / 2017 г.	Приравнено преместване $\bar{\delta}_d$, mm	Брой цикли до разрушаване	Серия № / 2016 г.	Осово преместване δ_d , mm	Брой цикли до разрушаване
01-01	52,5	84 ¹	Образец 1	27	43
01-02	62,5	97	Образец 2	44	15
01-03	82,5	69	Образец 3	36	27

Интерес представлява сравняването на цикличното поведение на модифицираните диагонали с диагонали от кутиеобразни сечения. За целта се използва експерименталното изследване на двуетажната рамка с центрично включени диагонали, проведено от *Uriž и Mahin* [19]. Подобно сравнение, но с конвенционални „Н-образни“ съставени заварени сечения е публикувано в [17]. Протоколите на натоварване прилагани в [19] и в настоящите тестове са различни, но въпреки това изводите са съвсем ясни. Диагоналите от кутиеобразни сечения в тестовете на *Uriž и Mahin* издържат 6 цикъла с 0,15% етажна

¹ Следва да се отбележи, че в цикъл 84 не се достигна до разрушаване на образца, а тестът бе прекъснат. По-прецизна оценка на броя цикли до достигане до разрушаване, може да се даде след пълен анализ на резултатите.

ротация, 4 цикъла с етажна ротация от 0,5%. Разкъсване на единия и другия диагонал от първия етаж на рамката е наблюдавано при първия и втория цикъл с етажна ротация от 1,38%. Може да се заключи, че диагоналите са издържали 11 цикъла с различни амплитуди, като само 7 от прилаганите цикли водят до развитие на пластични деформации. Освен различията в протокола на натоварване, ползван в [19], следва да се отбележи, че там рамката е с „л“ образна решетка. Въпреки това разликата в достигнатия брой цикли до разрушение е в пъти, което ясно показва, че модифицираните диагонали имат значително по-голяма издръжливост на нискоциклична умора в сравнение с диагоналите от кутиеобразни сечения.

За постигане на по-добра сравнимост на резултатите от [16], [19] и настоящото изследване е използван параметърът етажна ротация θ (относително междуетажно преместване), който е добре разпознаваем от гледна точка на оценка на степента на развитие на пластични деформации и повреди в етажни сградни конструкции. Този вид сравнение е показан в табл. 4.

Таблица 4. Сравняване на етажна ротация и брой цикли до разрушение

	Изследване на:	Етажна ротация θ , %	Брой цикли до разрушаване
Тестове <i>Георгиев, Ганчев</i> , 2017	Образец 01-01	3,71	84
	Образец 01-02	4,42	97
	Образец 01-03	5,83	69
Тестове <i>Райчева и колектив</i> [16], 2016	Образец 1	2,00	43
	Образец 2	3,50	15
	Образец 3	2,80	27
Тестове <i>Uriz и Mahin</i> [19], 2008	Диагонали HSS	1,38	11

Съгласно данните от табл. 4, ако се изходи от етажната ротация θ , има сравнимост между изследването на образец 01-01 и теста на образец 2 от [16]. Ясно може да се заключи, че при сходни етажни ротации на вертикалните връзки, модифицираните диагонали издържат 84 броя цикли, докато конвенционалните диагонали с „Н-образни“ сечения издържат 15 цикъла. На същия фон диагоналите от HSS¹ (кутиеобразно, горещо обработено сечение) издържат значително по-малък брой цикли. Обобщено може да се заключи, че най-добра издръжливост имат диагоналите MB, следват конвенционалните диагонали с „Н-образни“ сечения и най-ниска издръжливост демонстрират диагоналите от кутиеобразни напречни сечения.

6. Заключение

Плануваната и проведена серия 1 от експерименталната програма показва, че експерименталната постановка позволява ефективно да се даде оценка за дълготрайност на модифицирани диагонали при нискоциклична умора. Получените първи резултати

¹ Hollow structural section

доказват адекватността на концепцията за оформяне на сеченията на диагоналите и доказват, че цикличното им поведение не се характеризира с поява на местна загуба на устойчивост. Достигнатите брой цикли до разрушение са: 84 цикъла (вж. коментара под черта в точка 5) при тест 01, 97 цикъла при тест 03 и 67 цикъла при тест 03. Резултатите ясно показват подобреното поведение на модифицираните диагонали в сравнение с диагонали с „Н-образно“ сечение, докладвани в [17 и 18] и кутиеобразни сечения докладвани в [19].

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 БН-199/17.

ЛИТЕРАТУРА

1. *БДС EN 1998-1: 2006*, Еврокод 8, Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Част 1: Общи правила, сеизмични въздействия и правила за сгради.
2. *ANSI/AISC 341: 2010*, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings.
3. *SEI/ASCE 7: 2006*, Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures.
4. *Георгиев, Ц.* „Изследване на сеизмичното поведение на рамки с центрично включени диагонали“, дисертация. УАСГ, София, 2012.
5. *Tzvetan Georgiev.* „Improvement of X-CBF hysteresis behavior by introduction of MCS“, 8th Hellenic National Conference on Steel Structures, Tripoli, Greece, 2-4 October 2014, page 75.
6. *I. Vayas.* "Innovative anti-seismic devices and systems" , Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, ECCS, no. 9, pp. 269-310, 2017.
7. *J. Burk and F. V. Lawrence.* "The effect of residual stresses on weld fatigue life," University of Illinois, 1978.
8. *W. C. Chen and F. V. Lawrence.* "A model for joining fatigue crack initiation and propagation analyses," University of Illinois, 1979.
9. *K. Tateishi, T. Hanji and K. Minami.* "A prediction model for extremely low cycle fatigue strength of structural steel" International Journal of Fatigue, no. 29, pp. 887-896, 2007.
10. *Giulio Ballio, Carlo A. Castiglioni.* "A unified approach for the design of steel structures under low and/or high cycle fatigue", Journal of Constructional Steel Research, Volume 34, Issue 1, 1995, Pages 75-101.
11. *Luis Calado, João Azevedo.* "A model for predicting the failure of structural steel elements", Journal of Constructional Steel Research, Volume 14, Issue 1, pp. 41-64, 1989.
12. *Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock.* "Fundamentals of metal fatigue analysis", Prentice Hall, 1990.
13. *Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs.* "Metal Fatigue in Engineering" ISBN: 978-0-471-51059-8, John Wiley & Sons Inc., 2001.
14. *EN 1090-2* Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures. Brussels: Comitee Europeen de Normalisation (CEN); 2008.
15. *EN 1993-1-1*, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: Comitee Europeen de Normalisation (CEN); 2003.

16. Л. Райчева, Цв. Георгиев, О. Ганчев, Ст. Райков. [2017] "Експериментално изследване на вертикални връзки с кръстосани диагонали, пресичащи се в етажна греда", Годишник на Университета по архитектура, строителство и геодезия, София.

17. L. Raycheva, Tzv. Georgiev. [2017] "Assessment of fatigue damage accumulation in split-x concentrically braced frames", Годишник на Университета по архитектура, строителство и геодезия, София.

18. Л. Райчева. [2018] "Изследване на сеизмичното поведение на вертикални връзки с кръстосани диагонали, пресичащи се в етажна греда", Дисертация, Университет по архитектура, строителство и геодезия, София.

19. Uriz, P., Mahin, S. 'Toward Earthquake-Resistant Design of Concentrically Braced Steel-Frame Structures', Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Report 2008/08, University of California, Berkeley, 2008.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MODIFIED BRACES FOR LOW-CYCLE FATIGUE ENDURANCE

Tzv. Georgiev¹, O. Ganchev², Tr. Tsvetkova³

Keywords: CBF-MB, modified braces, low-cycle fatigue, cyclic tests

ABSTRACT

Concentrically Braced Frames are a traditional system for seismic resistant design of buildings and engineering facilities. They are well known in the engineering community and are included in all modern seismic design codes [1, 2, 3].

In order to keep the major advantages of that system and in search of improvement of their seismic behaviour a research project [4, 5] is developed and an improved system named CBF-MB (concentrically braced frames with modified diagonals) is elaborated.

Modified diagonals are the critical elements that control the system's dissipative behaviour. To study the endurance of modified diagonals in variable plasticity (low-cycle fatigue), series of experimental cyclic tests are planned and conducted. This paper presents the tests carried out in a laboratory at the Department of Steel and Timber Structures of UACEG and the basic parameters obtained through them. The experimental set-up is presented and the observed specificities of the cyclic inelastic behaviour of the test specimens are reported.

¹ 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

² Ognyan Ganchev, Senior Assist. Prof., Dept. "Steel, Timber and Plastic Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ganchev_fce@uacg.bg

³ Trayana Tsvetkova, student, Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: terry1607@abv.bg