



DOI: [10.71167/uaceg.2026.590201](https://doi.org/10.71167/uaceg.2026.590201)

Получена: 30.09.2025 г.

Приета: 21.02.2026 г.

ОЦЕНКА НА ИЗДРЪЖЛИВОСТТА НА СТОМАНЕНИ ЕЛЕМЕНТИ ОТ СТОМАНА S235JR ПРИ ЕКСТРЕМНО-НИСКОЦИКЛИЧНА УМОРА

Н. Арнаудов¹

Ключови думи: стоманени конструкции, експериментално изследване, екстремно-нискоциклична умора

РЕЗЮМЕ

Екстремно-нискоцикличната умора (ЕНЦУ) е процес на разрушаване на стоманени елементи, предизвикан от циклично знакопроменливо натоварване, водещо до пластични деформации значително след деформацията при начало на провлачане. В статията се представя експериментално изследване, проведено с цел установяване на механизма на разрушение при ЕНЦУ. В рамките на експерименталната програма са изследвани десет компактни, квадратни стоманени образеца, подложени на контролирани циклични деформации с диапазони в интервала от 10 % до 20 %. По време на тестовете са разпознати четири характерни стадия на повреда, описани в статията. Издръжливостта на стоманените елементи е оценена с помощта на количеството дисипирана хистерезисна енергия. По експериментален път са получени криви на зависимост между диапазона на пластичните деформации и броя цикли до разрушение. Посредством тестовете са калибрирани параметрите от уравненията на *Coffin-Manson* и *Tateishi* и е направено сравнение между експерименталните криви и резултатите от аналитичните модели. В резултат на изследването е предложена стойност на коефициента за цикличен спад на дисипираната енергия (α_{fr}). Установено е, че плътните компактни квадратни сечения демонстрират добра издръжливост на екстремно-нискоциклична умора.

¹ Николай Арнаудов, инж., докторант, кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: n.r.arnaudov@gmail.com

1. Въведение

Екстремно-нискоцикличната умора (ЕНЦУ) е процес на изчерпване на носимоспособността на стоманен елемент, възел или съединение, характеризиращ се с развитието и разпространението на пукнатини. Процесът е породен от циклично знакопроменливо натоварване, пораждащо пластични деформации със стойности, няколко пъти над относителната деформация при границата на провлачане ϵ_y . Броят на циклите до разрушение обикновено е от 10 до 100. Водещите механизми на разрушението при ЕНЦУ са два, като те се развиват паралелно – изчерпване на пластичната работа на стоманата, поради екстремните деформации, и появата и развитието на големи уморни пукнатини.

Явлението най-често се наблюдава при елементи, натоварени със сеизмични въздействия. За да се изследва тяхната издръжливост на екстремно-нискоциклична умора, те се проверяват посредством оценка на индекса на повредата, която настъпва в тях (т.нар. *damage index*). Това е мярка, която представя степента на повреда, която материалът е претърпял под въздействието на циклично натоварване спрямо прага на разрушаване. За да се определи този праг, следва да се знае какъв брой цикли на натоварване може да понесе един елемент или възел, преди в него да настъпи разрушение. Разрушението рядко се дефинира като скъсване на даден елемент или тотален срив на конструктивна система, като по-често се дефинира като значима повреда, която настъпва в конструкцията. Това може да бъде значителен спад на носещата способност, спад във възможността за дисипиране на сеизмична енергия, образуване на значителни пукнатини и други.

Предходни изследвания [1 – 5] показаха нуждата от допълнително експериментално изследване с фокус върху изучаване на самото поведение на стоманените елементи при екстремно-нискоциклична умора. Повечето изследвания на елементи, в които се реализират деформации няколко пъти над границата на провлачане, се провеждат чрез използване на линейните уравнения на *Coffin-Manson* и *Palmgren-Miner*, които са валидни при малки стойности на деформациите и относително голям брой цикли до разрушение (над 100). Това води до надценяване на издръжливостта на елементите при ЕНЦУ [6, 7].

Настоящото изследване си поставя задачата да обогати експерименталната основа за създаване на аналитичен модел за определяне на издръжливостта на стоманените елементи при ниско и екстремно-нискоциклична умора. За целта е проведена обширна експериментална програма в Учебната и научноизследователска лаборатория (УНИЛ) на катедра „Метални, дървени и пластмасови конструкции“ към СФ на УАСГ. Проведени са три експериментални серии, които позволяват изучаването на механизма на разрушение на стоманени образци, подложени на три- и четириточково огъване, от екстремно-нискоциклична умора. Експериментално е определена действителната работна диаграма на стоманата. Проведените експерименти позволиха да се оцени дисипативността на стоманените елементи и да се определи зависимостта между диапазона на пластичните деформации и броя цикли до разрушение.

2. Експериментално изследване

2.1. Представяне на експерименталната програма

Експерименталната постановка, определянето на действителната работна диаграма на стоманата и подготовката за провеждане на изследването са представени подробно в [1]. В настоящата публикация е обърнато внимание на протокола на натоварване, който е прецизиран и калибриран с помощта на модел с крайни елементи. Натоварването е

подбрано така, че във всеки образец да се поддържа постоянен диапазон на пластичните деформации със стойности съответно $\Delta\varepsilon_{pl}=10\%$, $\Delta\varepsilon_{pl}=12\%$, $\Delta\varepsilon_{pl}=15\%$, $\Delta\varepsilon_{pl}=18\%$ и $\Delta\varepsilon_{pl}=20\%$. По този начин, чрез прилагане на циклично знакопроменливо натоварване се цели предизвикване на разрушаване от екстремно-нискоциклична умора. Набелязаните параметри, величини и явления, които се следят по време на експеримента, са брой цикли до разрушение, големина на относителните деформации, големина на приложеното преместване, видът на деформираната линия, големина на реактивното усилие и механизъмът на разрушение.



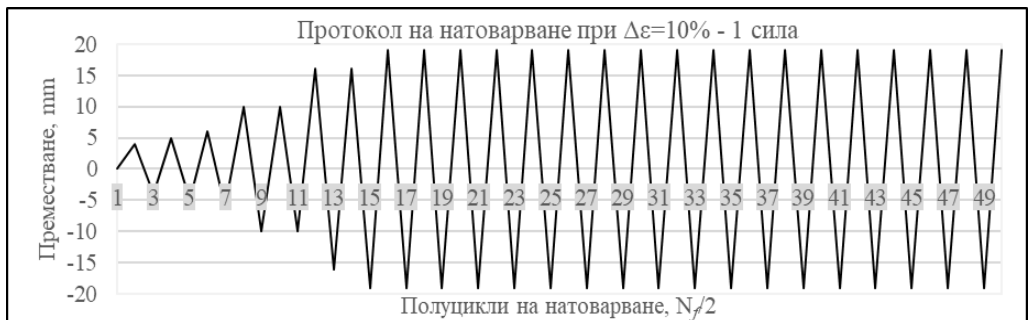
Фиг. 1. Изглед на експерименталната постановка

2.2. Протокол на натоварване

Натоварването е реализирано с помощта на хидравличен сервоактуатор „Капрони“ чрез прилагане на контролирано хоризонтално преместване. Тестът е квази-статичен, цикличен. Ходът на буталото на актуатора е около 5 mm/s и зависи от големината на зададеното преместване. Скоростта на натоварване се забавя значително при достигане на максималното преместване. Скоростта на протичане на теста позволява да се провеждат визуални наблюдения и измервания. Всички експерименти са проведени до физическо разрушение на образца, като протоколите на натоварване имат сходен вид. Тестовите започват с постепенно стъпаловидно нарастване на преместването до реализиране на желаната максимална стойност на диапазона на пластичните деформации. След неговото достигане, диапазонът на преместването се запазва константен до физическо разрушаване на образца. Първоначално натоварването се реализира със стъпаловидно нарастващи цикли, които маркират няколко интересни стойности на деформациите, като $\varepsilon_y/2$, ε_y , $2\varepsilon_y$ и $4\varepsilon_y$. Тези стойности са приети в синхрон с препоръките на ECCS [8] за циклично

изпитване на стоманени елементи. Там се препоръчва натоварването да расте на стъпки до разрушение на образеца. Нарастването трябва да е във вида $(2+2n)\varepsilon_y^+$ до $(2+2n)\varepsilon_y^-$, като $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. След достигане на $4\varepsilon_y$ натоварването се увеличава до търсения диапазон на пластичните деформации. Препоръките на *ECCS* са приложими за симулиране на сеизмично въздействие, където натоварването има произволен характер, и целят да минимализират ефектите на нискоцикличната умора. Алтернативни указания за протокол на натоварване могат да бъдат намерени в БДС EN 15129:2018 [9] и ANSI/AISC 341-10 [10]. Протоколът на натоварване в настоящото изследване се различава от предложените в [8 – 10], защото основната му задача е да инициира разрушаване от екстремно-нискоциклична умора. Целта на изследването е да се установят броят цикли до разрушение при определен константен диапазон на пластичните деформации. По този начин може да се оцени издръжливостта на изпитваните елементи при различни диапазони на деформациите и да се намери зависимостта между броя цикли до разрушение и диапазона на пластичните деформации, нещо което не би било възможно при произволен характер на натоварването. Подобен подход за изследване е възприет и от други автори, които изследват явлението екстремно-нискоциклична умора [6, 7].

На фиг. 2 е представен протоколът на натоварване при търсен диапазон на деформациите $\Delta\varepsilon_{pl} = 10\%$.



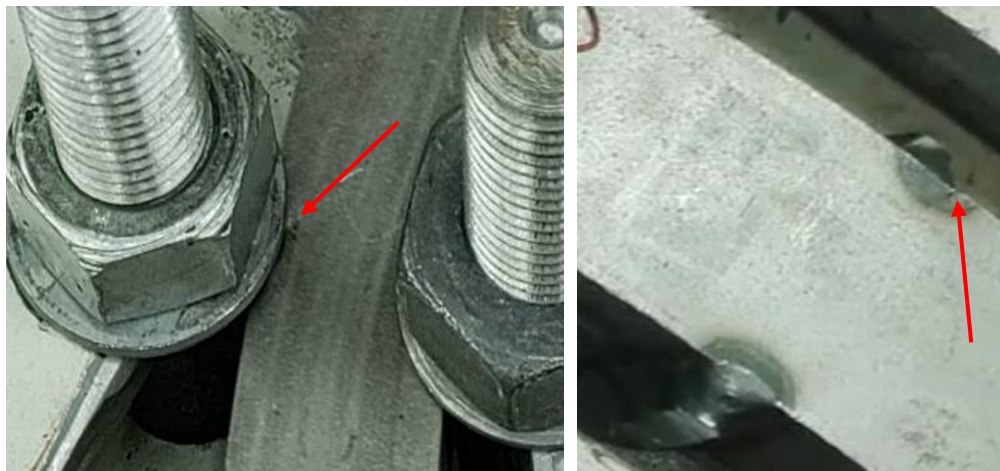
Фиг. 2. Протокол на натоварване при $\Delta\varepsilon_{pl} = 10\%$

3. Наблюдавано поведение на тестваните образци

Една от основните цели на експерименталното изследване е наблюдаване на механизма на развитие и разпространение на повредите в изпитваните елементи. Изпитани са три експериментални серии, които се различават по мястото на прилагане на силата (контакта между натоварващата система и образеца) и по липсата или наличието на заваръчен шев в самия образец. При Серия 1 силата се прилага в една точка, при Серия 2 силата се прилага в две точки, а при Серия 3 в средата на изпитваните елементи са заварени стоманени плочи (вж. [1]). Независимо от различията и при трите серии е установен сходен механизъм на натрупване на повредите, макар и с леки особености при всяка експериментална серия. При всички серии може да се отбележат четири характерни стадия на развитие на повредата:

3.1. Зараждане на пукнатина в зона с концентрация на деформации

Пукнатините се иницират още в първите цикли на натоварване. За образците от Серия 1 и 2 те се зараждат в мястото на контакт между натоварващия болт и изпитваните елементи (фиг. 3а), докато при образците от серия 3 пукнатините винаги се зараждат в зоната около заваръчния шев (фиг. 3б).



а) зараждане на пукнатината в мястото на контакта между болта и елемента (Серия 1)

б) зараждане на пукнатина в зоната на заваръчния шев (Серия 3)

Фиг. 3. Места на зараждане на пукнатини (Стадий 1)

Появата на пукнатините обикновено се наблюдава в първите 5 цикъла при максимално натоварване и е следствие на огъването на елемента. Поради малката стройност на елементите и компактното сечение не се наблюдава нито местна, нито обща загуба на устойчивост. При елементите от серия 1 и 2 иницирането на пукнатини е причинено от смачкването, което се получава в зоната на контакт между болта и стоманения елемент. В тази зона напрегнатото състояние е сложно, тримерно, като значителен принос имат и деформациите от срязване. След първите няколко цикъла на натоварване, когато болтът вече е оформил „легло“ в стоманения елемент, ефектът от смачкване намалява. При серия 3, макар че смачкването оказва идентичен ефект, пукнатините се зараждат винаги в зоната около заваръчния шев.

3.2. Бавно разпространяване на пукнатините

След момента на първоначалното зараждане пукнатините започват да се разпространяват бавно в опънатата страна на елемента. Този стадий е най-дълъг, като при него се реализира дисипацията на приложената енергия.

По време на стадий 2 се наблюдава плавна деградация на измерената осова сила в месдозата, спад на носещата способност на стоманените елементи и на количеството дисипирана енергия. Тя се дължи на постепенното разпространение на пукнатините. Не се наблюдава местна или обща загуба на устойчивост, неблагоприятен ефект, който е докладван при предходни изследвания [3 – 7].



а) Тест 4 – бавно разпространение на пукнатите (Цикъл 12)



б) Тест 4 – бавно разпространение на пукнатите (Цикъл 13)

Фиг. 4. Разпространение на пукнатините (Стадий 2)

3.3. Ускорено разпространяване на пукнатините

Стадий 3 протича много бързо в рамките на 2 до 5 цикъла. При него стоманеният елемент вече е изразходвал способността си да разсейва приложена енергия. Скоростта на разпространение на пукнатините е значителна – няколко милиметра при всеки цикъл на натоварване и е ясно видима с просто око.



а) Тест 1 ускорено разпространение на пукнатините (бутане на актуатора)



б) Тест 1 – ускорено разпространение на пукнатините (дърпане на актуатора)

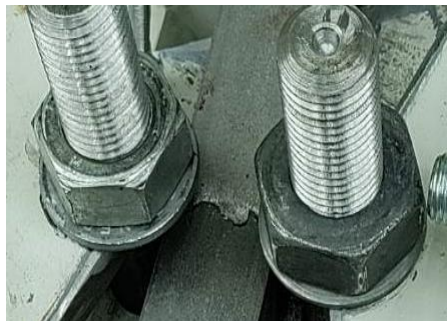
Фиг. 5. Ускорено разпространение на пукнатините, непосредствено преди разрушение (Стадий 3)

3.4. Съединяване на пукнатините и физическо разрушаване на елемента

При Стадий 4 се достига до цялостно разкъсване на напречното сечение на изпитваните елементи, следствие на съединяването на пукнатините от двете страни на напречното сечение. Всички елементи са изпитани до пълно физическо разрушение.

Описаните стадии на разрушаване са сходни с наблюдаваните в [2 – 4]. В предходните изследвания са използвани елементи с отворени напречни сечения. При отворените напречни сечения се наблюдава развитие на местни изкорубвания, което води до концентрация на пластични деформации, причинени от местната загуба на устойчивост

(МЗУ) в натисната стена на елемента и значителното огъване там. Ефектите от МЗУ се наслагат с пластичните деформации от опън, които се реализират в същата стена при смяна на посоката на натоварване. При изследваните плътни квадратни профили общата деформация отново е сума на деформациите, които възникват в опънатата стена на елемента, но събрани с деформациите, които възникват от локалното смачкване в натиснатата стена на елемента. Поради дебелината на сечението плътните профили имат значителен уморен живот след първоначалното образуване на пукнатина. От това наблюдение може да се заключи, че използваните в настоящото изследване плътни елементи имат добро поведение при циклични натоварвания.



Фиг. 6. Съединяване на пукнатините и физическо разрушаване на елемента (Стадий 4)

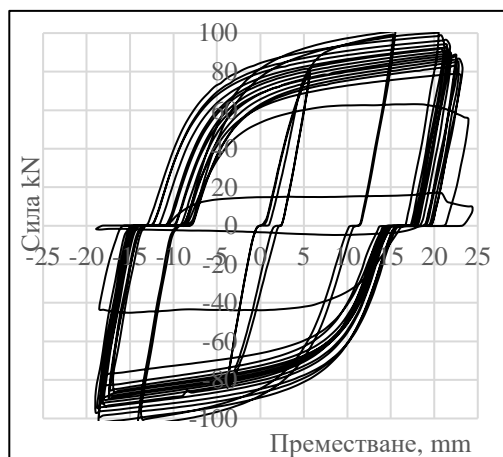
На фиг. 7 е показана снимка на разрушения образец. На фигурата може да се различат характерния за финалното разрушение матов и пирамидален лом в средата на сечението, както и характерният за уморно разрушение бляскав и зърнест лом по краищата на елемента, който се е образувал поради цикличния характер на натоварването. Подобно разрушение е наблюдавано и от други изследователи [3 – 7], като всички те заключават, че разрушението е следствие на екстремно-нискоциклична умора.



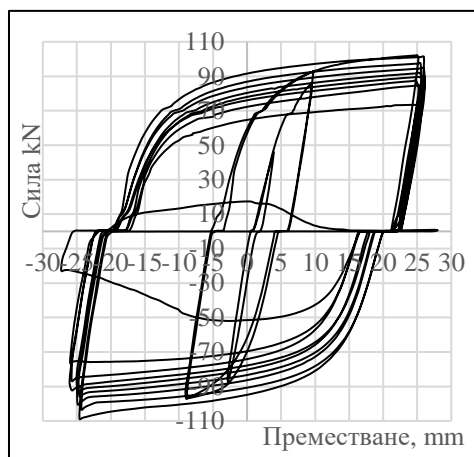
Фиг. 7. Видове повърхност след разрушение от екстремно-нискоциклична умора

4. Оценка на количеството дисипирана енергия

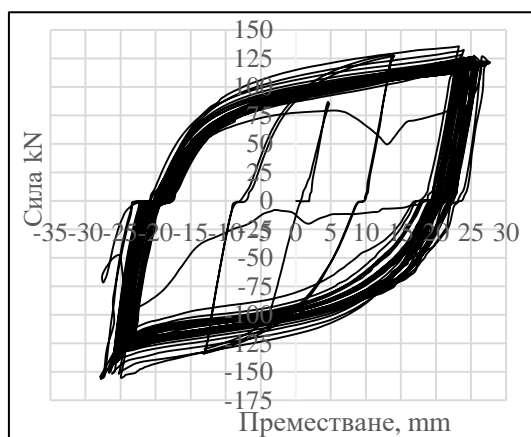
Количеството на дисипираната енергия е получено посредством експериментално изведената зависимост сила-преместване. Способността на елементите да дисипират енергия е критерий за дисипативността на стоманените елементи или конструктивните системи, в които те са приложени. На фиг. 8 са представени хистерезисните криви, получени на база на резултатите от експерименталното изследване. Графиките представят преместванията с отчетени луфтове. Наблюдава се характерен празен ход (леко прищипване) при всички криви, който се дължи на локалното смачкване на образца в мястото на контакт с болта. С увеличаване на броя на циклите на натоварване се увеличава и смачкването.



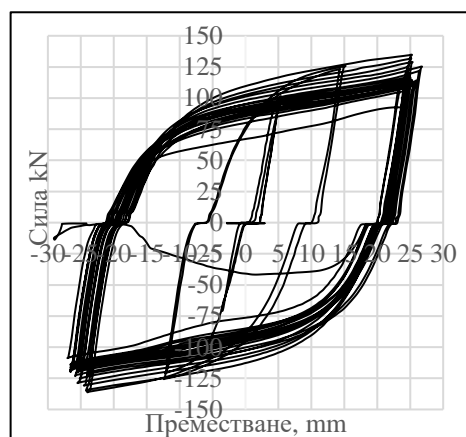
а) Хистерезисна крива Тест 1 – $\Delta\epsilon = 15\%$,
Серия 1



б) Хистерезисна крива Тест 6 – $\Delta\epsilon = 20\%$,
Серия 1



в) Хистерезисна крива Тест 11 – $\Delta\epsilon = 15\%$,
Серия 2

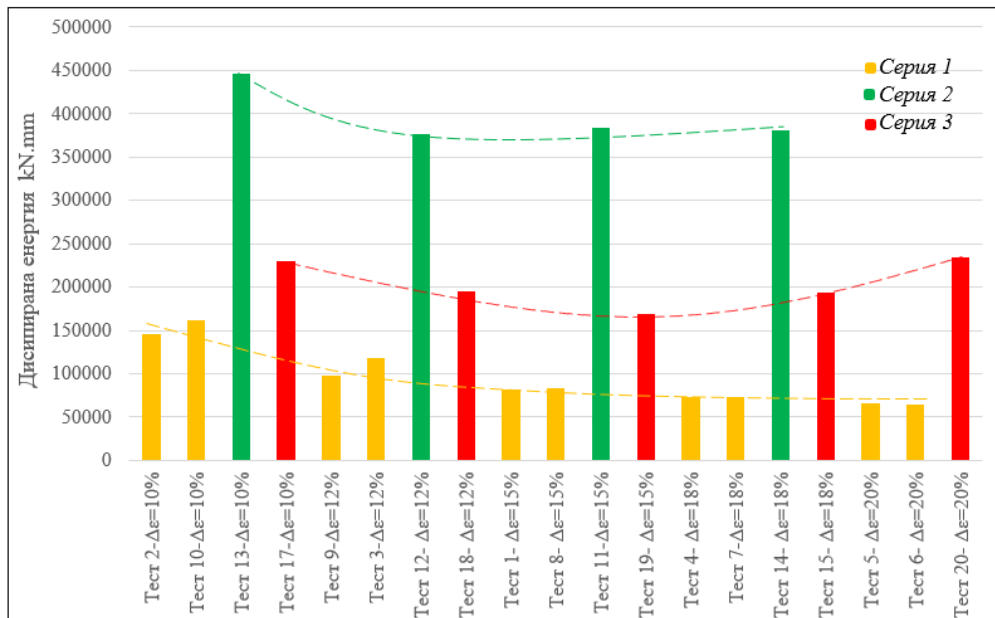


г) Хистерезисна крива Тест 19 – $\Delta\epsilon = 15\%$,
Серия 3

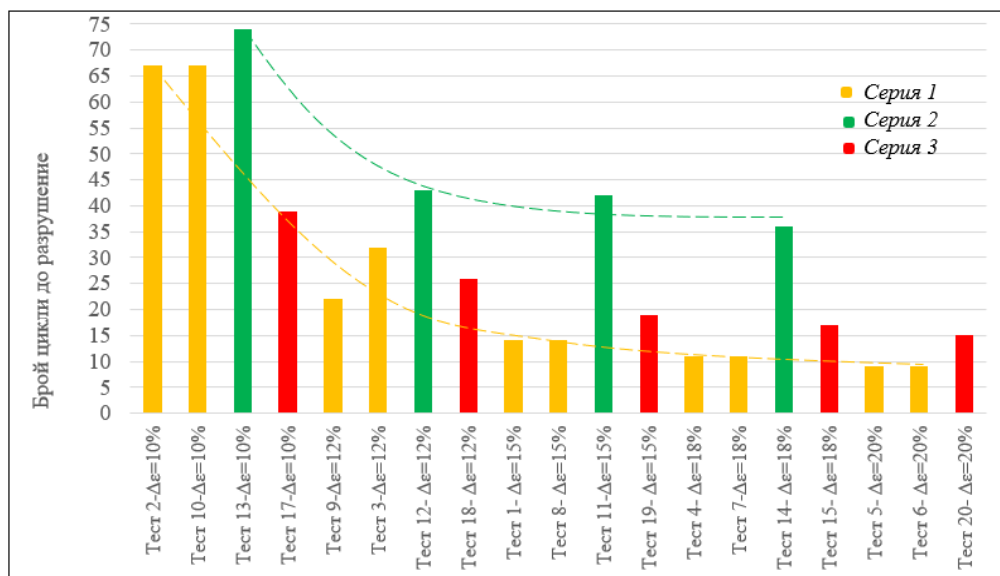
Фиг. 8. Хистерезисни криви

При всички проведени тестове появата на пукнатини води до деградация на коравината и на количеството дисипирана енергия, което може да се проследи на графиките, представени на фиг. 8.

На фиг. 9 е представено количеството разсеяна енергия при различните стойности на диапазона на пластични деформации, а на фиг. 10 е направено сравнение между броя цикли до разрушение при различните нива на пластични деформации.



Фиг. 9. Количество на дисипираната енергия



Фиг. 10. Сравнение на броя цикли до разрушение за всички тестове

От двете фигури се вижда, че диапазонът на пластичните деформации оказва влияние както върху свойството на елементите да разсейват енергия, така и върху броя на циклите до разрушение. С увеличаване на диапазона на пластичните деформации се намалява издръжливостта на елементите. Интересно е, че докато при Серия 1 (изпитани на триточково огъване) количеството дисипирана енергия намалява с увеличаването на диапазона на пластични деформации, подобна зависимост не се наблюдава при елементите от Серия 2 и Серия 3, които са подложени на четириточково огъване. Елементите от Серия 2 демонстрират най-голяма способност да разсейват енергия, както и да понесат най-голям брой цикли до разрушение. При Серия 3, въпреки че дисипираната енергия надвишава тази при Серия 1, броят на издържаните цикли е значително по-малък. Това показва, че наличието на заваръчния шев влияе негативно на издръжливостта на екстремно-нискоцикличната умора на стоманата, независимо от доброто ѝ свойство за дисипация на енергия. Експерименталните резултати показват, че дължината на пластичната зона също влияе върху количеството дисипирана енергия (разликата в дисипираната енергия между Серия 1 и Серия 2).

Стоманата има ограничена способност да разсейва енергия чрез пластично деформиране преди да се разруши, което означава, че независимо от диапазона на приложените пластични деформации материалът ще се повреди, след като разсеи определено количество енергия. *Krawinkler* [11] дефинира тази гранична стойност като E_f , което представлява общото количество дисипирана енергия до разрушение. На тази основа може да се предположи съществуването на корекционен коефициент, който да обвърже максималната дисипирана енергия до разрушение E_f с дължината на пластичната зона или с наличието на заваръчен шев. Поради ограничения брой изпитани елементи в рамките на настоящото изследване трудно би могло да се направи обосновано предположение за стойността на E_f , както и да се предложи адекватен корекционен коефициент. Въпреки това подобно бъдещо изследване би било ценно за определяне на издръжливостта на ЕНЦУ на стоманени елементи.

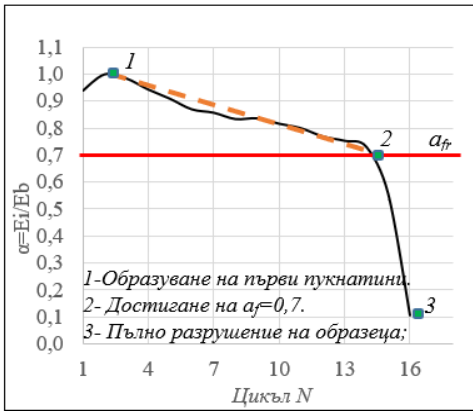
Експериментално получените зависимости сила-преместване са използвани за определяне на коефициента за цикличен спад на дисипираната енергия α_f . Коефициентът отразява отношението на енергията, дисипирана при всеки цикъл на натоварване $E_{b,i}$, към дисипираната енергия в първия цикъл на пластично натоварване E_b . Прието е този метод на анализ да се нарича енергетичен. Той е широко използван от редица изследователи [2 – 4, 12, 13] за оценка на натрупаната повреда в стоманени елементи.

$$\alpha_f = E_{b,i} / E_b, \quad (1)$$

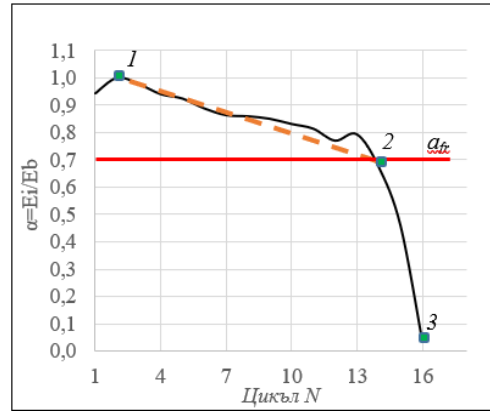
където $E_{b,i}$ е енергията, дисипирана за всеки цикъл на натоварване, J ;

E_b – енергията, дисипирана в първия цикъл на натоварване, J .

С оглед на особеностите в поведението на квадратните профили за референтна стойност на базовия цикъл е приет първият цикъл, при който се достига максималната амплитуда на преместването. Броенето на циклите започва с първия цикъл, при който коефициентът α_f е по-голям от 0,7. Стойностите на α_f за избрани тестове са представени на фиг. 11.



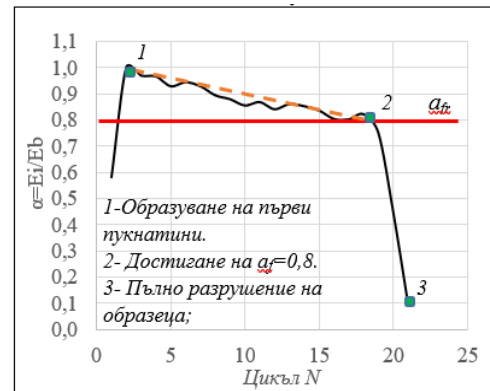
а) Тест 1 – $\Delta \varepsilon_{pl} = 15 \%$, Серия 1



б) Тест 9 – $\Delta \varepsilon_{pl} = 15 \%$, Серия 1



в) Тест 11 – $\Delta \varepsilon_{pl} = 15 \%$, Серия 2



з) Тест 19 – $\Delta \varepsilon_{pl} = 15 \%$, Серия 3

Фиг. 11. Коэффициент за цикличен спад на дисипираната енергия α_f

При Серия 1 и 3 могат да се отбележат три характерни точки в реализираната крива (означени със зелено). Точките дефинират границите на четирите характерни стадия описани по-рано. Първата точка, дефинирана при $\alpha_f = 1$, показва образуването на първата пукнатина в образца (край на Стадий 1 и начало на Стадий 2). Обикновено това се случва още в първия цикъл на максимално натоварване. След това деградацията на дисипираната енергия може да се апроксимира с права линия (в оранжево) до достигане на втората характерна точка. Тази точка е определена, когато $\alpha_f = 0,7$, за Серия 1 и $\alpha_f = 0,8$, за Серия 2 и 3, което може да се дефинира като долна граница на коефициента на цикличен спад на дисипираната енергия α_f . Прието е достигането на α_f да е инженерен критерий за разрушение. Разрушението се дефинира като значителен спад на възможността за дисипиране на енергия поради натрупването на повреди. Броенето на циклите спира при достигането на тази стойност, докато до физическото разрушаване (разкъсване) остават още няколко цикъла.

След преминаване на втората характерна точка започва Стадий 3, при който пукнатините се разпространяват много бързо, а стоманеният елемент вече е изразходил издръжливостта си на екстремно-нискоциклична умора. Последната трета точка е при разкъсване на изпитваните елементи. Тя съответства на дефинирания стадий 4 или цялостно физическо разрушение на елемента.

При тестовите от серия 2 характерният спад на коефициента α_f не е толкова ясно изразен. Наблюдава се рязък спад на стойността на коефициента от 1 до около 0,9 в първите пет цикъла на максимално натоварване. След това коефициентът остава почти константен в границите около $\alpha_f = 0,9$ до около 30 – 35-тия цикъл, независимо от диапазона на приложените пластични деформации. Тази фаза обхваща около 70 % от общия живот (измерен чрез брой цикли) на елемента. След достигане на третата характерна точка започва постепенен спад на α_f до достигане на стойност $\alpha_f = 0,8$. В последните няколко цикъла деградацията на коефициента се ускорява значително, а пукнатините се разпространяват с голяма скорост, довеждайки до физическо разрушаване на елемента.

Приетата стойност $\alpha_{fr} = 0,7$ за Серия 1 и $\alpha_{fr} = 0,8$ за Серия 2 и 3 е в синхрон с получените от *Calado* и *Castiglioni* [13]. Те предлагат коефициентът α_{fr} да е в границите 0,5 ÷ 0,85 в зависимост от формата на разрушение. Подобна стойност на коефициента е предложена и от *Райчева* [2] при изследване на поведението на вертикални връзки с кръстосани диагонали, пресичащи се в етажна греда. Райчева предлага корекционен коефициент $\beta = 0,8$, който по-добре да опише механизма на разрушение на диагоналния елемент.

5. Определяне на зависимост между броя цикли до разрушение и диапазона на пластичните деформации

Някои от най-популярните модели, които служат за прогнозиране на броя цикли до разрушение за даден диапазон на пластичните деформации, са предложени от *Coffin-Manson* [14] и *Tateishi* [15]. Подробна информация за уравненията може да се намери в [16], а в настоящата статия са представени само основните, аспекти приложими към провежданото изследване. Уравнението на *Coffin-Manson* има вида [14]:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{2} = \varepsilon_f' (2N_f)^c, \quad (2)$$

където $\Delta \varepsilon_{pl}$ е диапазон на пластичните деформации;

ε_f' – коефициент на дуктилността при умора;

c – степенен показател за дуктилността при умора;

$2N_f$ – брой полуцикли до разрушение.

Уравнението на *Tateishi* има вида [15]:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{2} = C_m \varepsilon_f' (2N_f)^c, \quad (3)$$

$$C_m = \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon_f - \Delta \varepsilon_{pl}}{\varepsilon_f - \Delta \varepsilon_u} \right)^{-c}, & \Delta \varepsilon_{pl} > \Delta \varepsilon_u, \\ 1, & \Delta \varepsilon_{pl} < \Delta \varepsilon_u \end{cases}$$

където ε_f е логаритмичното отношение на лицето на сечението на елемента преди и след изпитване;

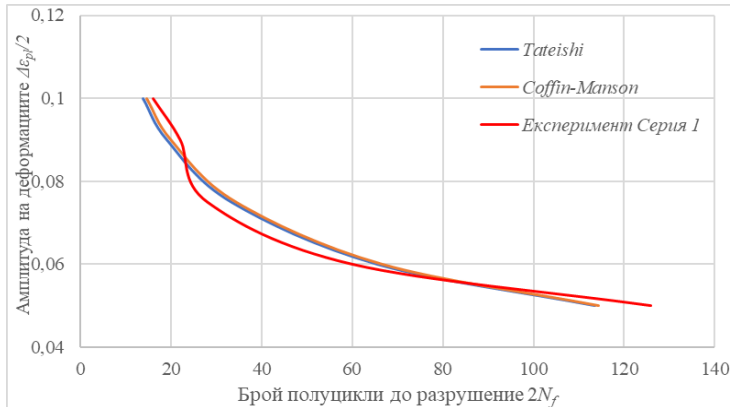
ε_u – деформация при границата на опън.

Материалните константи ϵ_f' , c , ϵ_u , ϵ_f са получени чрез провеждане на монотонен тест на опън за определяне на действителната диаграма на стоманата [1], както и на база на проведените тестове. Стойностите на основните параметри са представени в табл. 1. Материалните константи от уравнението на *Coffin-Manson* зависят от логаритъма на отношението брой цикли до разрушение към диапазона на пластични деформации и са различни за всяка експериментална серия.

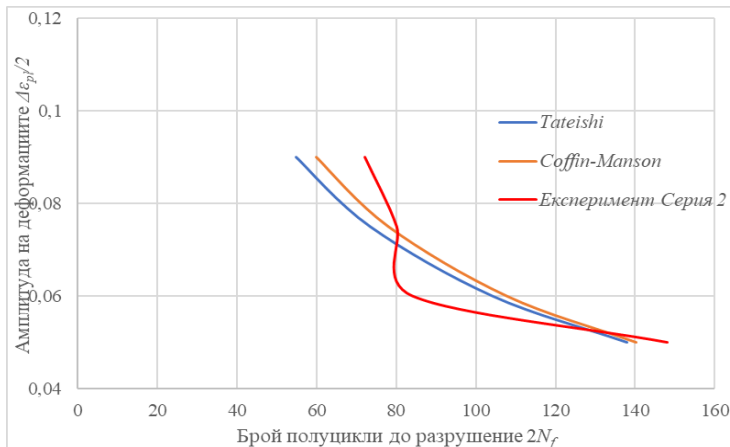
Таблица 1. Материални константи, приложими към уравненията на *Coffin-Manson* и *Tateishi*

	ϵ_f'	c	ϵ_f	ϵ_u
Серия 1	0,2465	-0,337	0,889	0,08
Серия 2	1,5333	-0,692	0,889	0,08
Серия 3	0,9699	-0,696	0,889	0,08

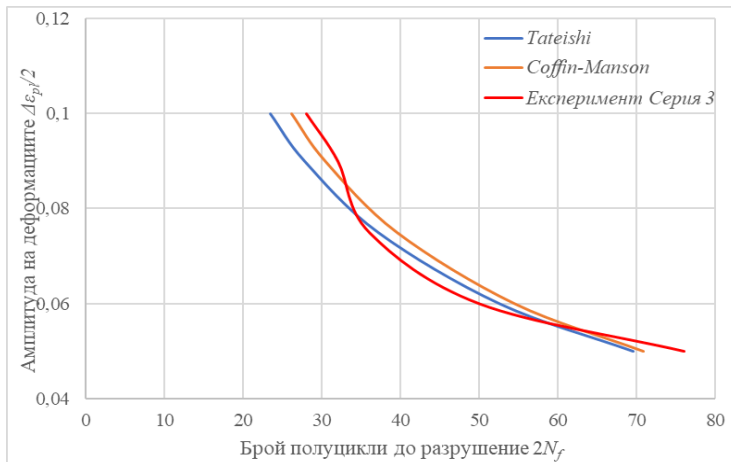
На фиг. 12 е представено графично сравнение между експерименталните данни и прогнозираните стойности от двата аналитични модела [14, 15] за всяка от сериите.



а) Серия 1



б) Серия 2



в) Серия 3

Фиг. 12. Експериментално получените брой цикли до разрушение спрямо прогнозираните с моделите на *Tateishi* и *Coffin-Manson*

От фигурата се вижда, че двата съществуващи модела дават достоверни резултати за издръжливостта на елементите. Наблюдава се по-съществена разлика при амплитуда на пластичните деформации около $\epsilon_{pl} = 0,075$.

За разлика от другите серии, при Серия 2 броят на циклите до разрушение не намалява плавно с увеличаване на диапазона на пластичните деформации, което е благоприятно за издръжливостта на изпитвания елемент. Причината за това явление отчасти се дължи на частичното запъване, което се наблюдава в мястото на контакт между изпитваните елементи и опорните плочи (вж. [1]). Запъването е породено от големите стойности на силите, бързото нарастване на преместванията и триенето между елементите. Като следствие от него се появяват огъващи моменти в краищата на елемента, които преразпределят усилията и водят до известно уякчаване на елемента. Този ефект намалява, когато се редуцира триенето между края на елемента и опорните плочи.

От фиг. 12в) може да се забележи, че наличието на заваръчен шев редуцира издръжливостта на елемента при екстремно-нискоциклична умора. Елементите от Серия 3 показват двойно по-малък брой цикли до разрушение в сравнение с елементите от Серия 2, въпреки еднаквата статическа схема и протоколи на натоварване.

На фиг. 12 може да се види промяна на наклона на кривите при амплитуда на пластичните деформациите около 6 % – 7,5 %. Това показва, че въпреки увеличаването на амплитудата на деформации, броят цикли до разрушение не нараства съществено. Причина за това е, че при амплитуди на пластичните деформации от порядъка на 7 – 10 %, които са близки до деформацията при границата на разрушение, изчерпването на издръжливостта се обуславя основно от изчерпването на дуктилността на елементите (свойството им да образуват пластични деформации).

6. Заключение

От представеното изследване може да се заключи, че изследваните квадратни плътни стоманени елементи, подложени на огъване, показват добра издръжливост при циклични натоварвания. В елементите не се реализира загуба на местна или глобална

устойчивост. Причината за разрушение на елементите е зараждането и развитието на пукнатини. При елементите от Серия 1 и Серия 2 зараждането на пукнатини става в мястото на контакт между изпитваните образци и натоварващия болт. При елементите от Серия 3 зараждането на пукнатини започва в зоната около края на заваръчния шев. Процесът на циклично огъване е съпроводен с отделяне на значителна топлина, което е показател за способността на елементите да разсейват значително количество енергия, преди да се разрушат.

Броят на циклите до разрушение зависи както от големината на диапазона на приложеното преместване, така и от други фактори, като концентрацията на пластични деформации и големината на пластичната зона (вида на моментовата диаграма и диаграмата на срязващи сили).

Проведеното изследване показва, че наличието на механично допиране между натоварващия болт и изпитвания елемент, както и заваръчния шев, оказват съществено влияние върху издръжливостта на стоманата при екстремно-нискоциклична умора. Прилагането на моделите на *Coffin-Manson* или *Tateishi* може да даде достоверни резултати за поведението на изпитваните елементи. Разликата между експерименталните резултати и стойностите, получени чрез двата модела, е между 10 и 20 %.

Благодарности

Експерименталната програма се реализира в Университетската научна и изследователска лаборатория (УНИЛ) на катедра „Метални, дървени и пластмасови конструкции“ към УАСГ. Настоящата разработка е подкрепена финансово по договор Д-146/2022 от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. *Arnaudov, N., Georgiev, Tzv., Tanev, V.* Features in the experimental studies of cyclic plastic behavior of European steel grade S235JR subjected to large plastic deformations. // Annual of UACEG, Volume 56, Issue 4, p. 1691 – 1710, 2023 (In Bulgarian), ISSN 2534-9759.
2. *Raycheva, L.* Investigation of the Seismic Behavior of CBFs with Crossed Diagonals Intersecting in a Floor Beam. Dissertation, UACEG, 2018 (In Bulgarian).
3. *Georgiev, Tzv.* Investigation of the Seismic Behavior of Concentrically Braced Frames. Dissertation, UACEG, Sofia, 2012 (In Bulgarian).
4. *Georgiev, Tzv.* Experimental investigation of modified steel braces for Ultra-low cycle fatigue endurance. Spinger, STESSA 2024 – Volume 1, p. 1111 – 1122, 2024.
5. *Gancheva, B., Georgiev, Tzv., Ganchev, O., Raykov, St.* Experimental investigation of different types of steel links for eccentrically braced frames. // Annual of UACEG, Volume 51, Issue 12, p. 95 – 113, 2018 (In Bulgarian), ISSN 2534-9759.
6. *Ge, H., Jia, L.* Ultra-low-Cycle fatigue Failure of Metal Structures under Strong Earthquakes. Springer, 2019, ISBN: 978-981-13-2660-8.
7. *Both, I., Zuba, C., Stratana, A., Dubina, D.* Cyclic behavior of European carbon steels. Eurosteel, Volume 1 (2), p. 3173 – 3180, 2017.
8. ECCS TC 13. Recommended Testing Procedure for Assessing the Behavior of Steel Elements under Cyclic Loads. 1986.
9. BDS EN 15129:2018. Anti-seismic devices. Comitee Europeen de Normalisation (CEN), Brussels.

10. ANSI/AISC 341-10. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Illinois, 2010.
11. *Krawinkler, H., Zohrei, M.* Cumulative damage in steel structures subjected to earthquake ground motions. *Computer and Structures*. Volume 16, Issues 1 – 4, p. 531 – 541, 1983.
12. *Castiglioni, C., Pucinotti, R.* Failure criteria and cumulative damage models for steel components under cyclic loading. // *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 65(4), p. 751 – 765, 2008.
13. *Calado, L., Castiglioni, C. A., Bernuzzi, C.* Low cycle fatigue of structural steel components: A method for re-analysis of test data and a design approach based on ductility. *ISET Journal of Earthquake Technology*, p. 47 – 63, 2000.
14. *Coffin, Jr.* A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. // *Journal of Applied Mechanics*, 76(6), p. 931 – 949, 1954.
15. *Tateishi, K., Hanji, T., Minami, K.* A prediction model for extremely low cycle fatigue strength of structural steel. // *International Journal of Fatigue*, no. 29, pp. 887 – 896, 2007.
16. *Arnaudov, N.* Low and ultra-low-cycle fatigue of steel elements, // *Annual of UACEG*, Volume 54, Issue 3, p. 563 – 580, 2021 (In Bulgarian), ISSN 2534-9759.
17. *Nip, K., Gardner, L., Davies, C., Elghazouli, A.* Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel. // *Journal of Constructional Steel Research*, 66, p. 96 – 110, 2010.

ASSESSMENT OF STEEL S235JR ELEMENT DURABILITY UNDER EXTREMELY LOW-CYCLE FATIGUE

N. Arnaudov¹

Keywords: steel structures, experimental investigation, extremely low-cycle fatigue

ABSTRACT

Extremely low-cycle fatigue (ELCF) is a process of degradation of steel elements caused by cyclic load leading to plastic deformations significantly above the yield limit. The paper presents an experimental study conducted to identify the failure mechanism under ELCF conditions. As part of the experimental program, ten steel specimens were tested with controlled cyclic deformations with strain ranges between 10 % and 20 %. During the tests, four characteristic damage stages were identified and described. The endurance of the steel elements was assessed using the amount of hysteresis energy dissipated. Experimentally derived curves were drawn, showing the relationship between the plastic strain range and the number of cycles to failure. Through the tests, the parameters of the *Coffin-Manson* and *Tateishi* equations were calibrated, and a comparison was made between the experimental curves and the results from analytical models. As a result of the study, a value for the coefficient of cyclic degradation of dissipated energy (α_{fr}) is proposed. It has been found that solid, compact square cross-sections demonstrate good resistance to extremely low-cycle fatigue.

¹ Nikolay Arnaudov, Eng., PhD student, Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: n.r.arnaudov@gmail.com