УНИВЕРСИТЕТ ПО АРХИТЕКТУРА СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ

СТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ

АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ

на тема

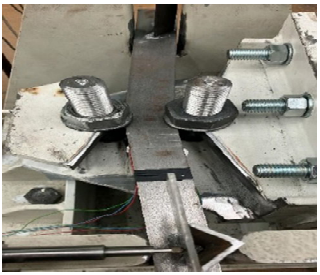
ОЦЕНКА НА ИЗДРЪЖЛИВОСТ НА СТОМАНЕНИ ЕЛЕМЕНТИ ПРИ НИСКОЦИКЛИЧНА УМОРА

за присъждане на образователна и научна степен „доктор“

инж. Николай Радославов Арнаудов

Научна специалност: 02.15.04

Строителни конструкции





София, 2026

УНИВЕРСИТЕТ ПО АРХИТЕКТУРА СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ

СТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ

ОЦЕНКА НА ИЗДРЪЖЛИВОСТ НА СТОМАНЕНИ ЕЛЕМЕНТИ ПРИ НИСКОЦИКЛИЧНА УМОРА

инж. Николай Радославов Арнаудов

EVALUATION OF THE FATIGUE RESISTANCE OF STEEL ELEMENTS UNDER LOW-CYCLE FATIGUE

dipl. eng. Nikolay Radoslavov Arnaudov

Класификацията на специалностите е отм. ДВ. бр.75 от 24 Септември 2010г.

Научна специалност: 02.15.04

Строителни конструкции

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Цветан Георгиев

София, 2026

Дисертационната работа съдържа 193 страници, включва 163 фигури и 23 таблици. Тя е структурирана в 4 глави. Глава I представлява въведение в темата. В нея е разгледано поведението на стоманата при големи нива на пластичните деформации под действие на монотонни и циклични товари. Глава II обхваща литературния обзор на проблема и формулира необходимостта и актуалността на научното изследване. Представени са актуални теоретични модели за определяне на издръжливостта на стоманата при екстремни нива на пластичните деформации и са представени част от научните изследвания, които са проведени по темата. Следва формулировка на целите и задачите. В Глава III е представено проведеното експериментално изследване, което обхваща изпитването на 19 броя експериментални образци. Представено е и численото изследване по темата. Глава IV обхваща анализа на експерименталните резултати. Накрая на главата е предложена кратка процедура за определяне на издръжливостта на компактни стоманени елементи, под действие на екстремно-нискоциклична умора. Формулирани са научни и научно-приложни приноси на автора, насоки за бъдещи изследвания, използвана литература и благодарности. Библиографията обхваща 110 заглавия, от които 23 на кирилица и 87 на латиница. Дисертацията завършва с описание на публикациите, свързани с темата на разработката и декларация за самостоятелност. По темата на дисертацията са направени 3 публикации – две самостоятелни и една в съавторство.

Дисертационната работа е обсъдена на научен семинар на катедра "Метални, дървени и пластмасови конструкции" към УАСГ на 22.01.2026г. и е насочена за защита.

Докторантът е зачислен за редовна докторантура към катедра "Метални, дървени и пластмасови конструкции" на УАСГ на 03.06.2020г. със Заповед №о 274 и срок за завършване на докторантурата: три години, считано от 01.06.2020г.

Публичното представяне на дисертационната работа ще се състои на ……. в зала …….. на УАСГ от ……. часа.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в кабинет 737 на блок Б на УАСГ и са качени на страницата на университета www.uacg.bg

Съдържание

Глава I. Въведение …….. 4

Глава II. Литературен обзор……. 5

II.1 Аналитични модели за определяне на издръжливостта на стоманата при екстремно-нискоциклична умора ……. 7
II.2 Експериментални изследвания на издръжливостта на стоманени елементи при ниско и екстремно-нискоциклична умора …….. 9

Глава III. Експериментална програма

III.1 Цели и задачи на експерименталната програма …… 10
III.2 Експериментална постановка ……..…… 11
III.3 Експериментални образци ……..……. 13
III.4 Тест за определяне на действителната работна диаграма на стоманата …… 13
III.5 Определяне на протокола на натоварване …… 15
III.6 Проведени тестове и наблюдения ……. 18
III.7 Изводи …….. 19

Глава IV. Анализ на експерименталните резултати. Оценка на издръжливост на елементите при екстремно-нискоциклична умора

IV.1 Отчитане на несъвършенствата в експерименталната постановка …… 19
IV.2 Механизъм за натрупване на повредата …… 20
IV.3 Изследване на деформираната схема …… 22
IV.4 Оценка на количеството дисипирана хистерезисна енергия ……. 25
IV.5 Определяне на зависимост между брой цикли до разрушение и диапазон на пластичните деформации …….. 29
IV.6 Функция за определяне на издръжливостта на стоманени елементи при ЕНЦУ…… 34
IV.7 Приложение на модела за определяне на издръжливостта на стоманени елементи при ЕЦНУ към системата INERD болтова става …… 37

Обобщаващи изводи от проведените научни изследвания по темата …….. 40

Научни и научно-приложни приноси …….. 41
Насоки за бъдещи изследвания …… 42
Благодарности ……..…… 43
Публикации, свързани с темата на дисертацията …….. 43
Литературни източници …….. 45

ГЛАВА I. Въведение

Елементите и възлите в стоманените строителни конструкциите могат да претърпят повреди и да достигнат до разрушение по различни причини. Сред основните фактори са цикличното натоварване, водещо до значително пластични деформации – например в резултат от силно земетресение, циклично прилагана температура или цикли на корозия.

Механизмът на разрушение от нискоциклична умора, особено при екстремни деформации, няколкото пъти надвишаващи деформацията при началото на площадката на провлачане, е сложен процес, който все още не е достатъчно проучен. *Kuwamura* [2] посочва, че процесът може да бъде разделен на няколко етапа:

- Развитие на пластични деформации водещи до провлачане в област от конструктивен елемент или съединение;
- Зараждане на пукнатини в зона с концентрация на напрежения, зона с наличие на заваръчен шев или структурни дефекти на стоманата;
- Развитие и удължаване на пукнатините;
- Окончателно физическо разрушаване на елемента;

Първите изследвания в тази област са проведени от *Shimada* и колектив [6] през 1987г, последвани от *Dufailly* и *Lemaitre* [7], и *Kanvinde* и *Deierlein* [8], които идентифицират този механизъм на разрушение като "екстремно-нискоциклична умора" *(extremely-low-cycle fatigue).* В България *Георгиев* и колектив [9] изследват модифицирани диагонали и идентифицират разрушения, причинени от това явление.

В настоящата дисертация авторът предлага следната дефиниция:

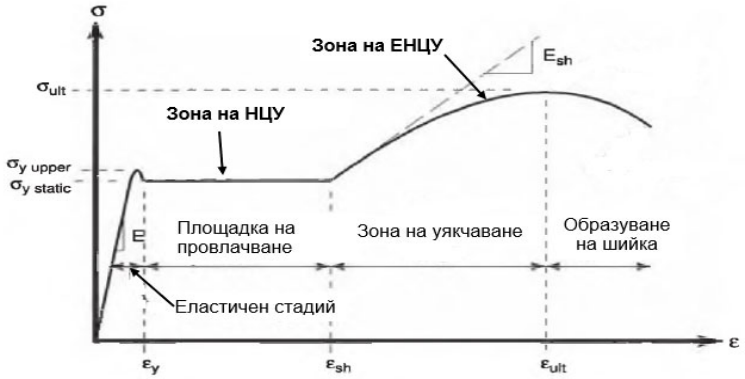
Екстремно-нискоцикличната умора (ЕНЦУ) е процес на изчерпване на носимоспособността на стоманен елемент, възел, или съединение, който се характеризира с развитието на пукнатини, под въздействие на знакопроменливо циклично натоварване. Това натоварване предизвиква пластични деформации със стойности, няколко пъти по-големи от 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 пукнатини.

При екстремно-нискоцикличната умора броят на цикли до разрушение е много малък (N_f< 100). Важно е ясно да се разграничи екстремно-нискоцикличната умора от класическата нискоциклична умора (НЦУ). Основната разлика е, че при екстремно-нискоциклична умора стоманата работи при напрежения и деформации в стадия на уякчаване и стойности близки до деформацията при якостта на опън ε_u. При нискоцикличната умора, стоманата работи при деформации около площадката

на провлачане, с деформации близки до деформацията при началото на провлачане (ε_y). Поради големите стойности на деформациите циклите до разрушение при екстремно-нискоцикличната умора са много малко (под 100), а пукнатините се зараждат още в първите цикли на натоварване. Тази разлика в механизма на повреда има своето значение при подходите за проектиране на елементи, подложени на големи диапазони на деформации, особено при сеизмични въздействия.

На ***Фиг. I-1*** са представени стадиите на работа на ниско-въглеродната конструкционна стомана и диапазоните на деформации при които се проявяват различните видове умора.



Фиг. I-1 *Стадии на работа на ниско-въглеродна стомана и обвързването им с дефинициите за ЕНЦУ*

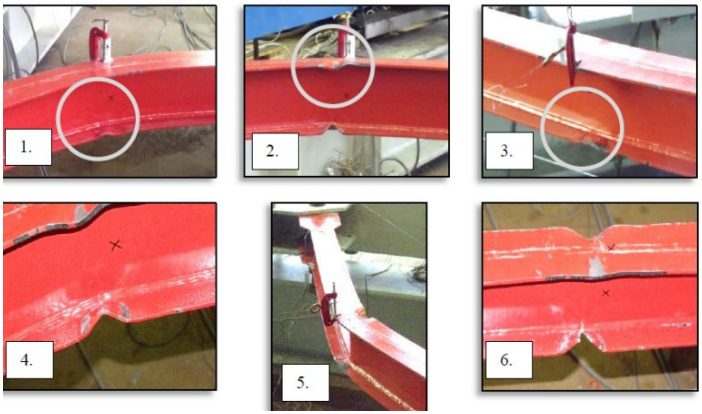
При разрушение под въздействие на натоварване, причиняващо екстремно-нискоциклична умора, пластичните деформации са значително по-големи в сравнение с конвенционалните инженерни проблеми. Създаването на модели за симулиране на поведението на стоманата при ЕНЦУ представлява предизвикателство пред научната общност. Предишни изследвания посветени на цикличното поведение на стоманата при екстремни деформации (над 5%) са ограничени по обхват и обикновено включват малък брой изпитани конструктивни елементи. Към момента липсват ясно формулирани правила и препоръки за анализ и проектиране на конструкции, подложени на подобни екстремни натоварвания. Тази празнина мотивира автора да фокусира изследването си върху тази тема.

ГЛАВА II. Литературен обзор.

Работата на стоманата, подложена на значително циклични еласто-пластично деформиране зависи от редица фактори като история на натоварването, големина на

пластичните деформации, наличие на концентратор на напрежение, заваръчни шевове, характеристики на материала и други.

В своето изследване *Райчева и колектив* [61] описват шест различни стадия на натрупване на повредата до разрушение на диагоналите на вертикални връзки с кръстосани диагонали, пресичащи се в етажна греда под действие на екстремни цикли натоварвания. Механизмът на разрушение визуално е представен на ***Фиг. II-1.*** Първоначално се реализира изкълчване на натиснатия диагонал (***Фиг. II-1-1***), което предизвиква местна загуба на устойчивост в натиснатата страна на огънатото средно сечение - (***Фиг. II-1-2***). При промяна на посоката на натоварване и удължаване на диагонала се реализират пластични деформации от опънното усилие в същото средно сечение Именно материалът в това сечение е подложен на ЕНЦУ. Следствие натрупването на значителни пластични деформации започва зараждането на уморни пукнатини (***фиг. II-1***) и тяхното последователно развитие. Пукнатините се появяват обикновено в зоните на наличие на дефекти – неравности, примеси в структурата на стоманата, остатъчни напрежения, а най-често при комбинация от тези фактори. След зараждане на пукнатините, с нарастване на броя на циклите на натоварване се наблюдава съществен спад на носещата способност на напречното сечение, на коравината и на количеството дисипирана енергия. Когато пукнатините достигнат критичен размер, се наблюдава разрушение на елемента чрез разкъсване на част от поясите (***Фиг. II-1-6***).



Фиг. II-1 *Стадии на развитие на пластичните деформации в диагоналите при провеждане на цикличен тест. Райчева и колектив [61]*

Съществуват два водещи подхода, които да прогнозират издръжливостта на стоманата при ниско и екстремно-нискоциклична умора. Един от тях е използването на *ε-N* кривите, като за база се използва уравнението на *Coffin-Manson* [27,28]. *Tateishi*

[35], *Kuroda* [36], *Krawinkler* [64] и други изследователи надграждат уравнението на *Coffin* и *Manson,* като предлагат различни корекционни коефициенти с които да обхванат диапазона на екстремно-нискоцикличната умора.

Другият подход, възприет от *Rice* и *Tracey* [56], *Kanvinde* и *Deierlein* [8], *Fell* [63] и др., е да се изследва процеса на създаване и развитие на дуктилни пукнатини. Дуктилните пукнатини са пукнатини, които се образуват след значителна пластична деформация на материала. Те може да се разграничат от уморните пукнатини, които се образуват след значителен брой цикли на натоварване. Подходът, най-често наричан модел на развитие на дислокациите (*void growth model*), дефинира условия за образуване и разпространение на пукнатините и дефинира гранична стойност, след която се наблюдава разрушение.

II.1 Аналитични модели за определяне на издръжливостта на стоманата при екстремно-нискоциклична умора

Редица автори, сред които *Shimada* [6] *Tateishi* [35], *Kuroda* [36], *Krawinkler* [64], *Castiglioni* [67], *Calado* [68], *Hatanaka* [71], *Xue* [75] и други, предлагат модели за прогнозиране на броя цикли до разрушение при различни диапазони на пластичните деформации. От проведените изследвания може да се направят някои обобщения за поведението на стоманата при ЕНЦУ:

- Поради големите стойности на пластичните деформации, еластичните деформации не се отчитат при определяне на натрупаната повреда [64] ;
- Следствие на дисипацията на енергия по време на цикличното натоварване се наблюдава локално нагряване на елементите, което води до натрупване на допълнителни температурни деформации в елемента [71];
- Когато деформациите са с диапазони над 5%, моделът на *Coffin-Manson* надценява издръжливостта на стоманата. С увеличаване на диапазона на деформациите $\boldsymbol{\Delta\varepsilon_{pl}}$, инициирането на пукнатините се измества от повърхността на елемента към вътрешността му [6];
- Разрушението от ЕНЦУ е следствие от кумулативното натрупване на повредата, което се ускорява с намаляването на способността на материала да дисипира енергия. Индексът на повредата $\boldsymbol{D}$ може да се раздели на три компоненти – $\boldsymbol{D_{tensile}}$, дължащ се на деформациите от опън, $\boldsymbol{D_{fatigue}}$, дължащ се на изразходване на пластичната работа по време на циклични деформации и $\boldsymbol{D_{crack}}$, дължащ се на разпространението на пукнатините. Сборът на $\boldsymbol{D_{tensile}} + \boldsymbol{D_{fatigue}}$ представлява повредата, причинена от изчерпването на пластичната носимоспособност $\boldsymbol{D_{ductile}}$. Разрушението настъпва когато сборът на трите компоненти стане равен на единица [36].

- С увеличаване на диапазона на деформациите се увеличава приноса на $\boldsymbol{D_{ductile}}$ към общата повреда, за сметка на цикличната повреда $\boldsymbol{D_{cyclic}}$ [35];
- Температурата започва да оказва съществен ефект при температури над 350 ^oC [75];
- При ЕНЦУ се наблюдава постепенен спад на коравината и носещата способност на елементите [67, 68];

Един от най-разпространените модели за определяне на издръжливостта на стоманени елементи е предложен от *Tateishi и колектив* (***фиг. II-1***) [35]. Моделът може да се приведе към уравнението на *Coffin-Manson* чрез въвеждане на коефициент $\boldsymbol{C_m}$, а физическият смисъл на този коефициент е да отчита пластичната повреда.

$$\frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{2} = \varepsilon_f'(2N_f)^c . C_m, \qquad (II\text{-}1)$$

$$C_m = \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon_f - \Delta\varepsilon_{max}}{\varepsilon_f - \varepsilon_{pD}}\right), \Delta\varepsilon_{max} > \Delta\varepsilon_{pD} \\ 1, \quad \Delta\varepsilon_{max} < \Delta\varepsilon_{pD} \end{cases}, \qquad (II\text{-}2)$$

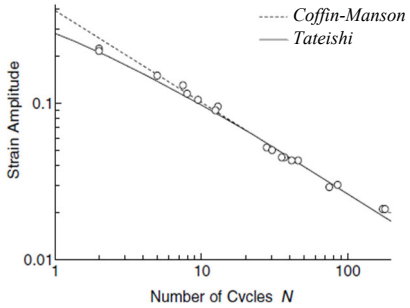
където ε_f е логаритмичното отношение на лицето на сечението на елемента преди и след изпитване;

ε_f' и c - константи от закона на *Coffin-Manson*;

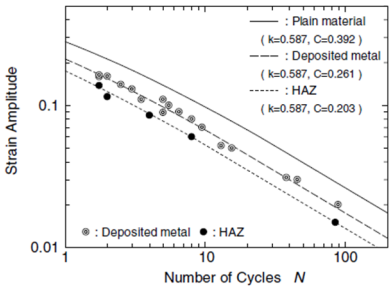
$\Delta\varepsilon_{max}$- максимално приложения диапазон на пластичната деформация;

$2N_f$ – брой полуцикли до разрушение;

ε_{pD} – прагова стойност на деформациите, при която започва да се наблюдава нарастване на повредата.



а) ε-N крива за стомана при константен диапазон на пластични деформации



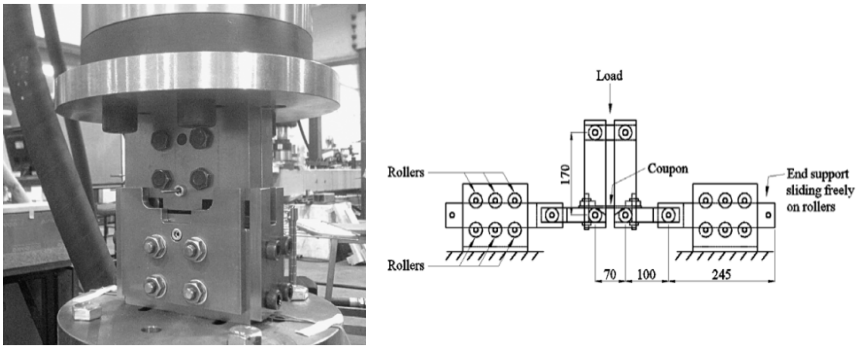
б) ε-N крива за заварени съединения при константен диапазон на пластични деформации

Фиг.II-2 *Резултати от проведените изследвания. Tateishi и колектив [35]*

II.2 Обзор на експерименталните изследвания на издръжливостта на стоманени елементи при ниско и екстремно-нискоциклична умора

В Европа са проведени относително малък брой изпитвания на европейски стомани от *Райчева*, *Георгиев* и *Ганчев* [55, 61, 69], *Ballio, Castiglioni, Calado и колектив* [67, 68], *Nip и колектив* [77], *Both и колектив* [78] и други. Изследванията са ограничени както по своя обхват, така и по конфигурацията на изпитваните елементи. Може да се отбележат няколко особености при експерименталното изследване на стоманени елементи при *ЕНЦУ*:

- Има риск от изкълчване по време на цикличните осови тестове, когато се използват сравнително стройни тънки елементи, с дебелина около 5-6mm. Поради тази причина по-консистентни резултати се получават при тестовете на огъване, където изкълчването е елиминирано, което позволява изпитването при по-големи диапазони на пластичните деформации [77];
- Броят на циклите до разрушение е сходен за различни материали, въпреки че те имат различна границата на провлачане и удължаване до скъсване [7];
- Въпреки използването на специализирана техника, измерването на пластичните деформации е трудно, поради екстремните им стойности. За получаване на крайните стойности на пластичните деформации може да се използва компютърен модел с крайни елементи [60, 78].



а) Осови тестове *б) четириточково огъване*

Фиг. II-3 *Експериментална постановка. Nip и колектив [77]*

Цели и задачи на научното изследване:

Критичния анализ на проведени до момента изследвания по света, постави като фокус на настоящата дисертация изучаването на поведението на стоманени елементи при екстремно-нискоциклична умора. Често това явление е пренебрегвано, а повечето експериментални изследвания, които изучават поведението на стоманени елементи при екстремни пластични деформации, използват 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). При силни земетресения диапазоните на пластични деформации са значителни, а броят на циклите до разрушение обикновено е между 10 и 100.

Настоящото изследване си поставя целта да натрупа национален опит по отношение на явлението екстремно-нискоциклична умора и да създаде експерименталната основа за създаване на аналитичен модел за определяне на издръжливостта на стоманените елементи при ниско и екстремно-нискоциклична умора. Поставените цели включват:

- Изучаване на механизма на разрушение на стоманени образци, подложени на три- и четириточково огъване от екстремно-нискоциклична умора;
- Експериментално определяне на действителната работна диаграма на стоманата;
- Оценка на дисипативността на стоманените елементи и количеството дисипирана хистерезисна енергия;
- Създаване на аналитичен модел за определяне на зависимост между диапазона на пластични деформации и брой цикли до разрушение.

За да се постигнат набелязаните цели са поставени следните задачи:

- Проучване на теоретичния и експериментален изследователски опит в сферата на екстремно-нискоцикличната умора на стоманени елементи;
- Провеждане на стандартен тест на опън за определяне на действителната работна диаграма на стоманата;
- Планиране, подготовка и провеждане на експериментално изследване при циклично знакопроменливо натоварване с контрол по преместване ;
- Обработка и анализ на получените резултати ;
- Създаване на изчислителен модел с крайни елементи за сравнение с експерименталните данни. Анализ на възможността за оценка на издръжливостта на стоманата чрез нелинеен анализ с модел с крайни елементи.

ГЛАВА III. Експериментално изследване

III.1 Цели и задачи на експерименталната програма

Експерименталната програма е разработена и проведена в периода 2022-2024г. като част от научен проект на тема "Оценка на издръжливост на стоманени елементи при екстремно-нискоциклична умора", финансиран от ЦНИП към УАСГ, гр. София. Програмата се състои в провеждането на лабораторни тестове на три серии образци. Първата серия включва изпитване на десет идентични призматични образци, а втора и трета серии включват изпитването на по пет образеца. Образците са натоварени с една или две сили, което отговаря на три и четириточково огъване. Произходът на подобен тип постановка може да се намери в две от предложените системи за дисипиране на енергията представени в мащабното изследване "*INNOSEIS*" [37]. В настоящото изследване натоварването е подбрано така, че във всеки образец да се поддържа постоянен диапазон на относителните пластични деформации: $\Delta\varepsilon$=10%, $\Delta\varepsilon$=12%, $\Delta\varepsilon$=15%, $\Delta\varepsilon$=18% и $\Delta\varepsilon$=20%. По този начин, чрез прилагане на циклично знакопроменливо натоварване се цели предизвикване на разрушаване от екстремно-нискоциклична умора.

Обект на изследване са:

- Механизмът на натрупване на повреди т.е. местата и начина на зараждането на пукнатините, както и механизма на тяхното развитие до пълно разрушаване;
- Влиянието на напречни заваръчни шевове като концентратор;
- Количеството разсеяна енергия в различните стадии на развитие на хистерезиса и механизма на разрушаване.

За изследване на набелязаните обекти са планирани и изпълнени следните задачи:

- Проектиране, производство и монтаж на двадесет броя експериментални образци;
- Провеждане на стандартен тест на опън на серия стандартни епруветки за определяне на действителната работна диаграма на стоманата;
- Разработване и калибриране на числов модел с крайни елементи;
- Експериментално изпитване на деветнайсет броя образци;
- Оценка на издръжливостта на стоманата при различни диапазони на пластични деформации, както и влиянието на различни неблагоприятни фактори като наличие на заваръчни шевове.

III.2 Експериментална постановка

Експериментите се провеждат в Учебната и научноизследователска лаборатория (УНИЛ) на катедра "Метални, дървени и пластмасови конструкции" (МДПК) към СФ на УАСГ, като се използва наличният универсален тестови стенд и наличният сервоактуатор "*Капрони*". Експериментите се провеждат с контрол по преместване, като целевото преместване $\boldsymbol{\delta}$ е зададено за върха на буталото на актуатора. Стендът се състои от две неподвижни опори, обединени със свързваща опорна греда. Призматичните пробни образци влизат в жлеб в опора от стенда (***Фиг.III-1***). Актуаторът задава циклично преместване с определена амплитуда в натоварващия прът, което причинява огъване в пробните тела до скъсването им.



Фиг. III-1 *Експериментална постановка.*

Величините, които се следят по време на експеримента, са осова сила, преместване в средата на опитния образец, преместване в опорите, брой цикли до поява на първа видима пукнатина и до разрушаване (скъсване). Като съпровождаща информация се записва и деградирането на силата, която месдозата измерва (реактивната осова сила). Преместването в средата на пробните образци се измерва чрез четири индуктивни датчика. Относителните деформации в елементите се измерват чрез два високочувствителни тензометрични датчика, които имат капацитет да измерват деформации $\boldsymbol{\varepsilon}$ до 10%. Проектирани са две натоварващи глави, които позволяват натоварването да се приложи в една или в две точки. По този начин експериментът може да се проведе в две конфигурации – при три и при четири-точково огъване.

III.3 Експериментални образци

Изпитани са общо деветнадесет броя стоманени образеца, разделени в три експериментални серии ***(Фиг.III-2а)***. Първите две серии се различават само в мястото на прилагане на силата. При експерименталните образци от серия 3, успоредно на посоката на натоварване, са заварени с ъглов заваръчен шев две стоманени плочи с дебелина 10mm (***Фиг.III-2б***). Стоманените плочи са поставени в средата на елементите. Катетът на заваръчния шев е 5mm. Сериите са подбрани така, че да позволят оценка на два различни фактора, влияещи върху пластичното поведение на материала. Това са ролята на дължината на зоната с големи пластични деформации (Серии 1 и Серия 2) и влиянието на ефектите от заваряването като заваръчни напрежения, промяна в структурата на стоманата в HAZ-зоната и други (Серия 3).



а) общ брой призматични стоманени образци *б)образци от експериментална серия 3*

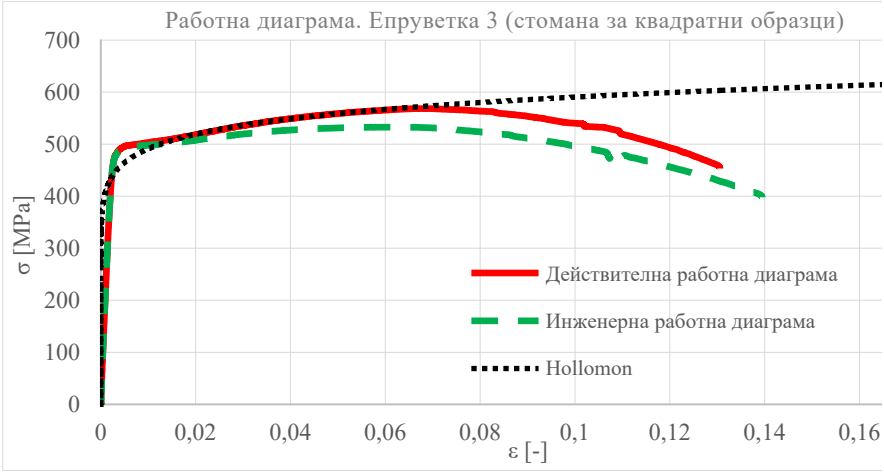
Фиг.III-2 *Експериментални образци*

III.4 Тест за определяне на действителната работна диаграма на стоманата

За установяване на действителните физико-механични и якостни характеристики на материала са произведени и изпитани 2 броя стандартни епруветки в съответствие с БДС EN ISO-6892-1 – приложение D [91]. Резултатите от тестовете са използвани за определяне на действителната работна диаграма на стоманата. Експериментът е проведен чрез използване на изпитвателната машина на УНИЛ на катедра МДПК.



Фиг.III-3. *Тест на опън*



Фиг.III-4*.Сравнение между инженерната и действителната работна диаграма на стоманата и функция на Hollomon*

Забелязва се, че стоманата от която са изготвени пробните образци, има значителна по-голяма граница на провлачане (***f_y*** = 490MPa*)* и якост на опън, (***f_u***=552MPa*)* от номиналните за стомана S235JR. По мнение на автора при тези

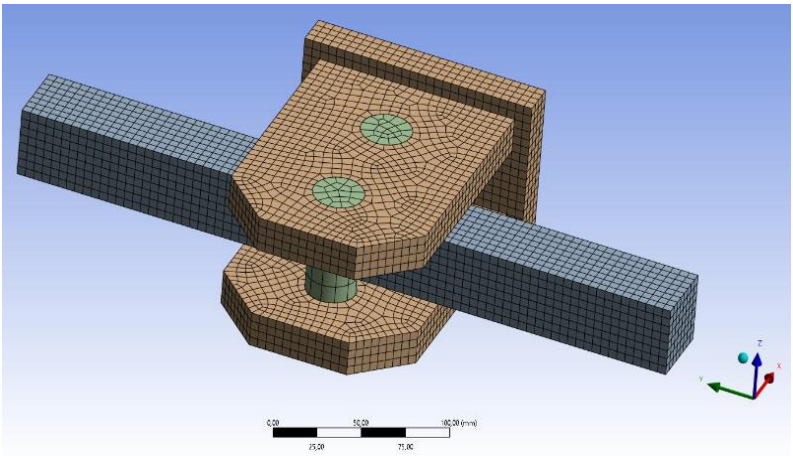
високи якостни характеристики, стоманата най-вероятно е S355JR, макар че според представения сертификат, материалът следва да е S235JR.

Таблица III-1. *Характеристики, получени от стандартния тест на опън*

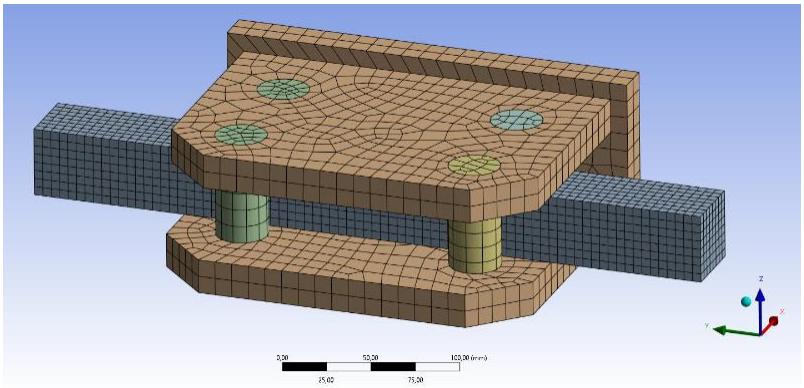
Епруветка	Площ на напречното сечение	Дължина на базата	Дължина на базата след разрушение	f_y	f_u	Максимална сила F_m	Относително удължение след разрушение
-	[mm^2]	[mm]	[mm]	[Mpa]	[Mpa]	[kN]	[%]
3	**156,14**	**106**	**118,8**	**490**	**552**	**83,15**	**12,08%**

III.5 Определяне на протокола на натоварване

За точно определяне на протокола на натоварване и проследяване в дълбочина на нелинейното поведение на проектираните експериментални образци, са разработени числени модели с крайни елементи посредством програмата *ANSYS 2022 R1* [53,54]. За всяка експериментална серия е създаден отделен тримерен изчислителен модел. Използвани са обемни крайни елементи, които дават възможност за по-прецизно представяне на действителната геометрия на напречното сечение. Общ изглед на моделите е представен на ***Фиг. III-5.***



а) изглед на модела при вариант с прилагане на силата в една точка



б) вариант с прилагане на силата в две точки

***Фиг.III-5** Общ вид на изчислителния модел в ANSYS*

Моделирани са изпитваните призматични елементи, натоварващите болтове и натоварващата глава. Видът на използваната мрежа е "*Hexa*", а методът на генериране на мрежата е "*MultiZone.* Изследвано е влиянието на гъстотата на мрежата, като е направено сравнение между резултатите, получени с крайни елементи с големина 10 mm и 5 mm. Пластичността на материала е дефиниран таблично чрез модула "*Multilinear Isotropic hardening*".

Контактът между болтовете и призматичния елемент е моделиран като фрикционен с коефициент на триене μ=0,3. Контактът между натоварващата глава и страниците на изпитвания елемент е дефиниран с μ=0 (без триене). Натоварването върху образците се осъществява с контрол на преместването. Търсените премествания са получени итерационно, като са зададени различни по стойност премествания до достигане на търсената амплитуда на пластичните деформации в средата на квадратните образци. При определяне на преместванията са отчетени съществуващите луфтове в експерименталната постановка, така че получените деформации максимално да се доближават до реалните. Дефинирани са опорни условия, които да отговарят на реалните опорни условия в експерименталната постановка. Възпрепятствани са хоризонталните и вертикални премествания по X и Z в края на стоманения образец, симулиращи стоманената опора (***Фиг. III-1)***. Забранени са вертикалните премествания (по Z и по Y) в натоварващата глава, което в реалната експериментална постановка се постига чрез допълнителната опора под натоварващия прът В натоварващата глава са приложени премествания по X, които симулират приложеното преместване от актуатора.

Получените финални премествания са представени в ***Таблица III-1***.

Таблица III-1. *Стойности на приложеното преместване в ANSYS*

Търсена амплитуда на деформацията ε_{pl}	*d* [mm] *Серия I*	*d* [mm] *Серия II и III*
5%	16	22
6%	19	25
7,5%	24	28
9%	26	31
10%	29	33

III.5.1 Протокол на натоварване

Натоварването се реализира чрез хидравличен сервоактуатор "*Капрони*" чрез прилагане на контролирано хоризонтално преместване. Тестът е цикличен, квази-статичен. Ходът на буталото на актуатора е около 5mm в секунда и зависи от големината на зададеното преместване, като скоростта се забавя значително при достигане на стойности близки до максималното преместване. Всички експерименти са проведени до физическо разрушение на образеца, а протоколите на натоварване за различните експериментални серии имат сходен вид.



Фиг. III-6 *Протокол на натоварване при приложен диапазон на деформациите* $\Delta\varepsilon$*=10%. Серия 1*

III.6 Проведени тестове и наблюдения

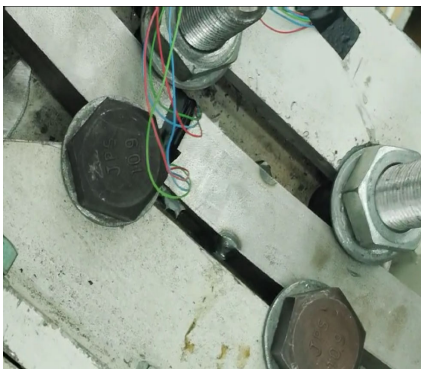
Изпитани са три експериментални серии. Серия 1 включва десет броя образци, като натоварването е приложено в една точка. Серия 2 включва четири броя образци, а натоварването е приложено в две точки. Серия 3 включва пет броя образци, натоварването е приложено в две точки, а в средата на елемента са заварени стоманени плочи (концентратори).



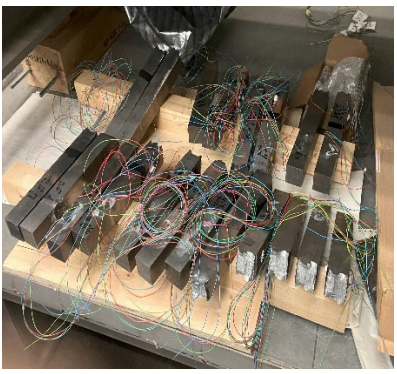
а) Поява на пукнатина (Серия 1)



б) Деформирано състояние (Серия 2)



в) Деформирано състояние (Серия 2)



г) Изпитани образци (Серия 1)

Фиг III-7. *Снимки на характерни състояния от тестовете*

III.7 Изводи

В резултат на проведената експериментална програма са направени някои предварителни заключения за поведението на изпитаните елементи и издръжливостта им на екстремно-нискоциклична умора.

1. Квадратните плътни стоманени елементи показват добра издръжливост при циклични натоварвания. Не се наблюдава местна или глобална загуба на устойчивост. Елементите имат значителна остатъчна издръжливост след първоначалното образуване на пукнатини;
2. При циклично знакопроменливо натоварване механизмът на разрушение е еднакъв при всички изпитани образци. Причината за разрушение е зараждането и образуване 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 ъгъла 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.
3. Прилагането на силата в две точки (Серия 1 и 2), вместо в една (Серия 3) удължава живота на стоманените елементи и е благоприятно за издръжливостта им при екстремно-нискоциклична умора.
4. Броят на циклите до разрушение зависи както от големината на приложената сила, така и от други фактори, като големи на пластичната зона и наличието на заваръчен шев;

ГЛАВА IV. Анализ на експерименталните резултати. Оценка на издръжливостта на материала при екстремно-нискоциклична умора

IV.1 Отчитане на несъвършенствата в експерименталната постановка

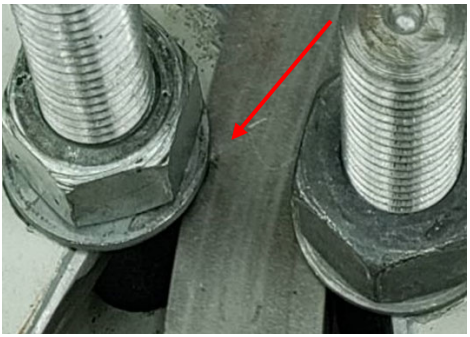
По време на експерименталните изследвания, се забелязва разлика между отчетите на преместванията, зададени в актуатора и тези регистрирани от индуктивния датчик, разположен на върха на натоварващата глава. Това се дължи на влиянието на неработните деформации в системата, които са резултат от наличните луфтове в произведените стоманени елементи и натоварваща система. Тези луфтове са измерени, документирани и описани. При анализ на експерименталните резултати са използвани пълните премествания, получени след приспадане на приноса на неработните премествания от поддавания в опорите и налични луфтове в системата.

IV.2 Механизъм на натрупване на повредата

Една от основните цели на експерименталното изследване е да се наблюдава и анализира механизмът на възникване и разпространение на повредите в изпитваните елементи. Независимо от различията между трите серии е установен сходен механизъм на натрупване на повредите, макар и с леки особености при всяка експериментална серия.

Стадий 1 - Зараждане на пукнатина

Пукнатините се зараждат още в първите цикли на натоварване, като тяхното зараждане е винаги в зона, където са максималните пластични деформации. За образците от серия 1 и серия 2 това е мястото на допир между натоварващия болт и изпитвания елемент, докато при образците от серия 3 пукнатината се заражда в зоната около заваръчния шев (***Фиг.IV-1***).



а) зараждане на пукнатина (Серия 1)



б) зараждане на пукнатина(Серия 3)

Фиг.IV-1 *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. Не се наблюдава нито местна, нито обща загуба на устойчивост.

Стадий 2 - Бавно разпространяване на пукнатините

След момента на първоначално зараждане, пукнатините започват да се разпространяват бавно под действие на цикличното знакопроменливо натоварване Този стадий е най-дълъг, като при него се реализира дисипацията на енергия. По време на стадий 2 се наблюдава плавна деградация на измерената осова сила в месдозата, както и на количеството дисипирана енергия.



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



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

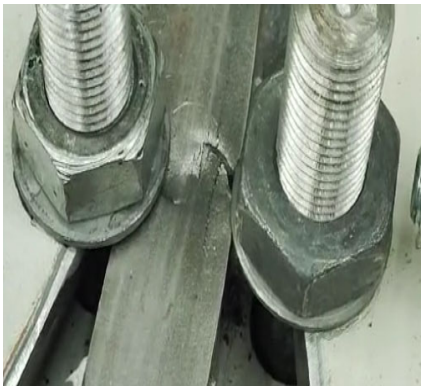
***Фиг.IV-2** Разпространение на пукнатините (Стадий 2)*

Стадий 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 дисипира енергия.



а) Тест 1 – ускорено разпространение на пукнатите (бутане на актуатора)

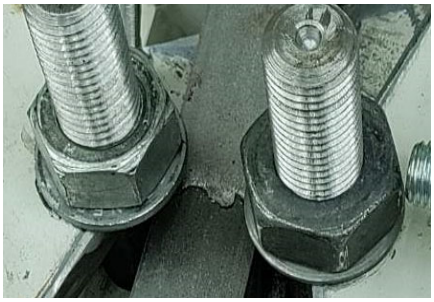


б) Тест 1 – ускорено разпространение на пукнатите (дърпане на актуатора)

***Фиг.IV-3** Ускорено разпространение на пукнатините непосредствено преди разрушение (Стадий 3)*

Стадий 4 - Съединяване на пукнатините и 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.



а) Тест 4 – съединяване на пукнатините



б) Тест 17 – съединяване на пукнатините

***Фиг.IV-4** Съединяване на пукнатините и разрушаване на елемента (Стадий 4)*

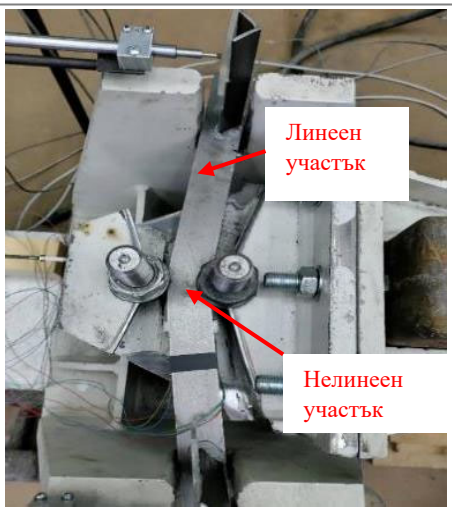
Наблюдаваният механизъм на разрушение съответства с описаните в предходни изследвания [61, 69, 79], проведени с елементи с отворени напречни сечения.

IV.3 Изследване на деформираната схема

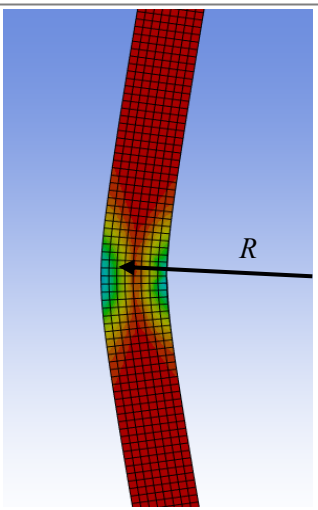
Интерес представлява намирането на зависимост между приложено преместване v и диапазона на пластичната деформации $\Delta\varepsilon$. Подобна зависимост би била много удобна при практически задачи, където създаването и изследването чрез сложни тримерни числени модели по МКЕ е много трудоемко.

Деформираната схема на изпитваните елементи може да се апроксимира с два участъка – линеен и нелинеен. Измерванията, извършени по време на тест 9 показват, че общата дължина на нелинейна зона е приблизително **80 mm** – стойност, равна на два пъти дебелината на напречното сечение на изпитвания елемент. Тази зона съответства на областта, в която относителните деформации са по-големи от деформацията при границата на провлачане $\varepsilon > \varepsilon_y$. Същата зона е видима и в числения модел (***Фиг.IV-5***).

С помощта на аналитичната геометрия може да се получи функция, описваща деформираната схема. Дефинирана е координатна система с оси v и s, като началната точка е в средата на изпитвания елемент. Разстоянието между центровете на двете опори е означено с L.



а) деформирана схема Тест 4



б) деформирана схема числен модел

Фиг.IV-5 *Сравнение на деформираните схеми от експерименталната част и числения модел*

Прието е ***x*** да бъде дължината от центъра на гредата до точката, в която фунцкията на деформираната схема преминава от линейна в нелинейна. Функцията има вида:

$$v(s) = \begin{cases} C_1.s^2 + C_2.s + C_3, & |s| < x \\ a|s| + b, & |s| > x \end{cases}, \qquad (IV\text{-}1)$$

където $v(s)$ е вертикалното преместване като функция на разстоянието *s;*

C_1, C_2, C_3, a, b.са параметри, които ще се намерят от граничните условия.

След намиране на неизвестните и преобразуване, функцията на деформираната схема добива вида:

$$u(s) = \begin{cases} \frac{1}{2\rho}.s^2 + \frac{x^2}{2\rho} - \frac{L.x}{2\rho}, & |s| \le x \\ \frac{x}{\rho}|s| - \frac{L.x}{2\rho}, & |s| > x \end{cases}, \qquad (IV\text{-}2)$$

където $v(s)$ е вертикалното преместване като функция на разстоянието *s;*

ρ е кривината;

L е разстоянието между центровете на опорите, mm;

x е дължината от центъра на гредата до точката, в която фунцкията на деформираната схема преминава от линейна в нелинейна, mm. В настоящото изследване авторът предлага дължината $\boldsymbol{x}$ да се намира по израза:

$$x = \beta . h \qquad (IV\text{-}3)$$

В ***Таблица IV-1*** е представено сравнение между числения модел с крайни елементи и аналитичната функция, при приложен коефициент $\boldsymbol{\beta}$**=0,85**.

Таблица IV-1. *Сравнение между деформации получени след използване на корекционен коефициент* β=0,85 *и чрез числен модел с крайни елементи*

Диапазон на пл. деформации	$\Delta\varepsilon_{pl}$ [%]	10	12	15	18	20
Отчетено преместване от числен модел	δ [mm]	32	38	48	52	58
Отчетено преместване от аналитичен модел	δ [mm]	31,2	37,4	46,6	56	62,2
Разлика [%]		2,50	1,58	2,92	7,69	7,24

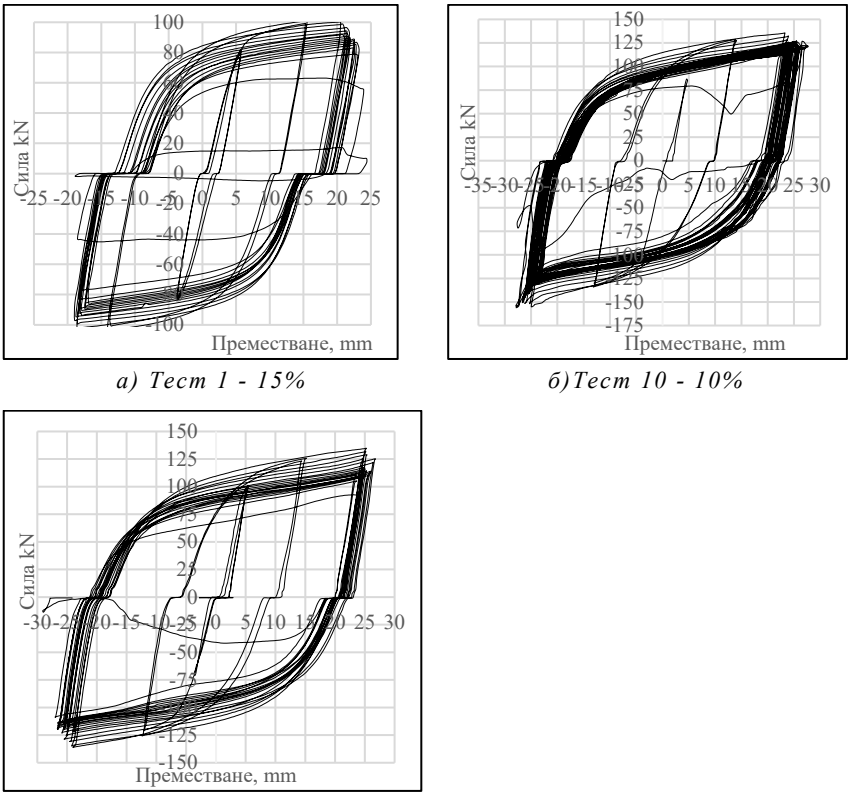
Резултатите показват добро съвпадение между двата подхода. Поради сложното напрегнато и деформирано състояние на изпитваните елементи, численият модел с крайни елементи е в състояние по-прецизно да отчете локализираните пластични деформации, докато аналитичната апроксимация дава обобщена картина, базирана на предположения за плавна деформирана геометрия на изпитания елемент.

Въпреки, че израз (*IV-2*) не отразява в пълнота действителното поведение на материала, поради чисто математическия си характер, апроксимацията може да даде стойности на преместванията, сходни с действителните. Основното предимство на израз (*IV-2*) е, че не е ограничен от предпоставката на *Bernoulli* за равнинност и недеформируемост на сечението, което позволява уравнението да се използва и при големи стойности на пластичните деформации. Използването на коефициента $\boldsymbol{\beta}$ за определяне на разстоянието от центъра на елемента до точката на преход между линейна и нелинейна функция $\boldsymbol{x = \beta . h = 0,85 . h}$, дава стойности близки до експерименталните и може да се използва за бързо намиране на зависимостта между приложено преместване и реализиран диапазон на пластична деформация.

Трябва да се отбележи, че израз (*IV-2*) е валидиран за сравнително къси елементи, при които $\boldsymbol{L = 10 . h}$. Като насока за бъдещи експериментални тестове остава да се докаже дали зависимостта между приложено хоризонтално преместване и реализирана пластична деформация е валидна и за по-дълги елементи, например когато $L = 100 . h$.

IV.4 Оценка на количеството дисипирана хистерезисна енергия

Количеството на дисипираната хистерезисна енергия е получена посредством експериментално изведената зависимост сила-преместване. Тя е критерий за дуктилността на стоманените елементи. На ***Фиг.IV-6*** са представени хистерезисните криви, получени от изследванията.



а) Тест 1 - 15% *б)Тест 10 - 10%*

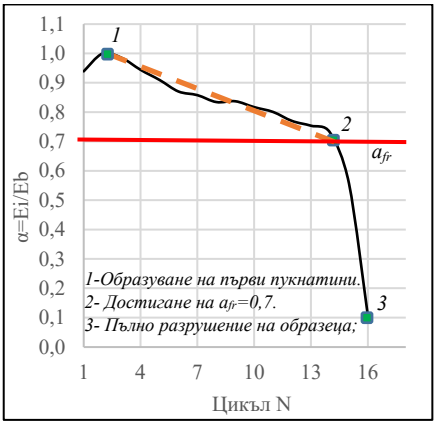
в) Тест 19 - 15%

Фиг.IV-6 *Хистерезисни криви*

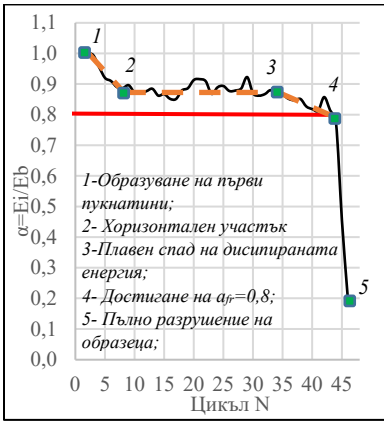
Наблюдава се характерен празен ход (леко прищипване) при всички криви, който се дължи на неработните премествания на актуатора. Те са причинени от смачкването на образеца и се увеличават с увеличаване на броя цикли на

натоварване. Не се забелязват значителни разлики между тестовете с една и съща амплитуда на преместванията. При всички проведени тестове появата на пукнатини води до деградация на коравината и на количеството дисипирана енергия.

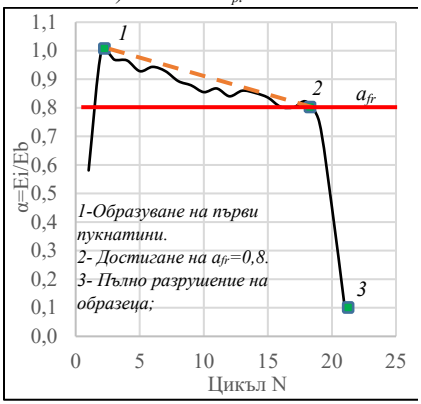
Експериментално получените зависимости сила-преместване са използвани за определяне на коефициента за цикличен спад на дисипирана енергия $a_{f,i}$ ***(Фиг.IV-6)***. Коефициентът отразява отношението на дисипираната енергия в първия цикъл на пластично деформиране E_b към енергията, дисипирана при всеки цикъл на натоварване $E_{b,i}$.



а) Тест 1 - $\Delta\varepsilon_{pl}$ = 15%



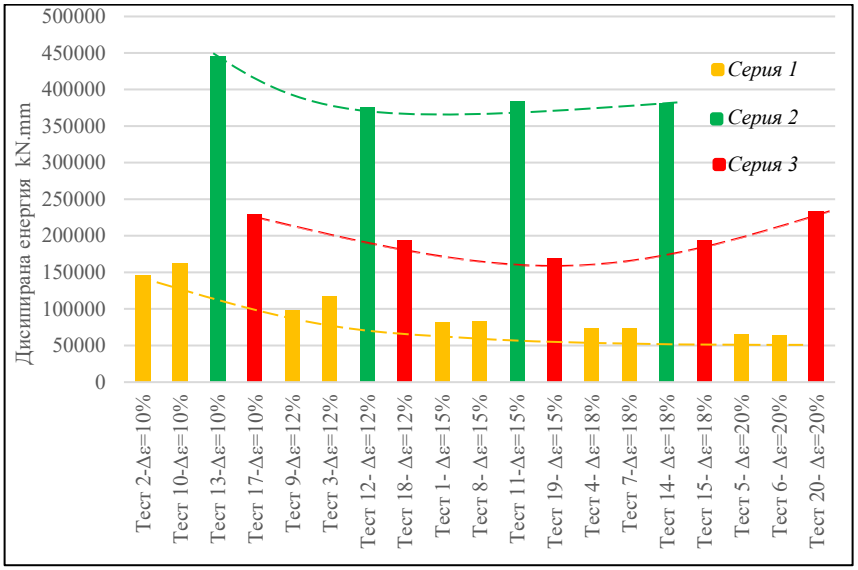
в) Тест 11 - $\Delta\varepsilon_{pl}$=15%



в) Тест 19 - $\Delta\varepsilon_{pl}$ = 15%

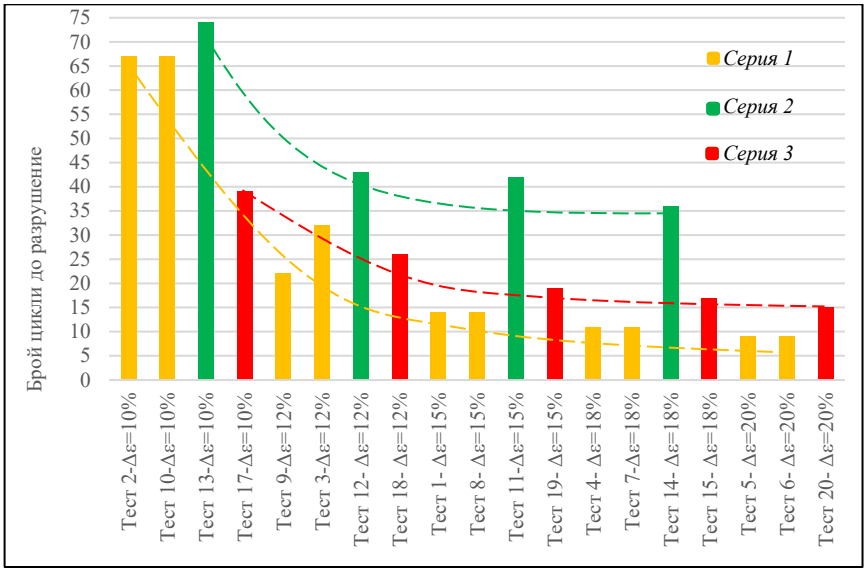
Фиг.IV-7 *Коефициент за цикличен спад на дисипираната енергия $a_{f,i}$*

При елементите от Серия 1 и Серия 3 могат да се разграничат три характерни точки по експерименталната крива (отбелязани със зелено). Точките съответстват на четирите характерни стадия описани по-рано. Първата точка, дефинирана при стойности на коефициента $a_{f,i}$**=1**, маркира началото на пукнатинообразуване (край на Стадий 1 и началото на Стадий 2). Обикновено това се случва още в първия цикъл на максимално натоварване. След този момент деградацията на дисипираната енергия може да се апроксимира с права линия (в оранжево) до достигане на втората характерна точка, която е a_{fr}. Тази точна характеризира края на Стадий 2 и началото на Стадий 3. Тя е дефинирана като долна граница на коефициента на цикличен спад на дисипираната енергия a_{fr}**.** При елементите от Серия 2 се наблюдава рязък спад на коефициента от 1 до около 0,9 в първите пет цикъла на натоварване. След това коефициентът остава почти константен в границите около $a_{f,i}$ **=0,9** до достигане на a_{fr}. След достигане на a_{fr}, пукнатините се разпространяват много бързо, а стоманеният елемент вече е изразходил по-голямата част от издръжливостта си. Последната, трета (пета за Серия 2), характерна точка е дефинирана в момента на цялостно скъсване на изпитвания елемент, което съответства на Стадий 4. Прието е достигането на a_{fr} = 0,7 за Серия 1 и 0,8 за Серия 2 и 3 да бъде критерий за разрушение. Разрушаването се дефинира като значителен спад на възможността за дисипиране на енергия, поради натрупването на повреди. Броенето на циклите на натоварване се прекратява при достигането на тази стойност.



Фиг.IV-8 *Сравнение на пълната дисипирана енергия*

На ***Фиг.IV-8*** е направено сравнение на пълната дисипирана енергия за всички тестове. Изпитаните стоманени елементи демонстрират значителен капацитет да дисипират енергия, преди да се разрушат. От фигурата може да се види, че елементите работещи при четириточково огъване (Тестове 10 до 19) могат да дисипират повече енергия, отколкото тези при триточково огъване, независимо от диапазона на пластичните деформации, на които са подложени. При Серия 1 се наблюдава отчетлива деградация в количеството дисипираната енергия с увеличаване на диапазона на пластичните деформации. Подобна тенденция не се наблюдавана отчетливо при елементите от Серия 2 и Серия 3.



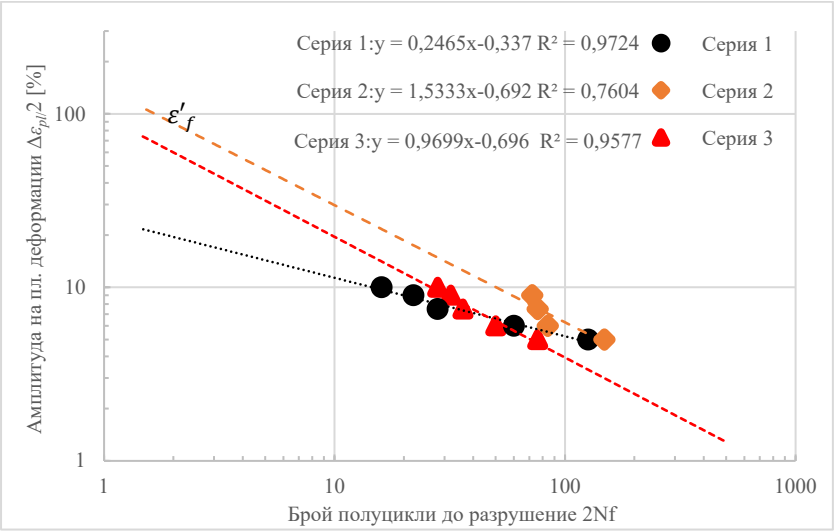
Фиг.IV-9 *Сравнение на брой цикли до разрушение за всички тестове*

На ***Фиг.IV-9*** е направено сравнение на брой цикли до разрушение за всички тестове. При Серия 3, въпреки че дисипираната енергия надвишава тази при Серия 1, броят на издържаните цикли е значително по-нисък. Това показва, че наличието на концентратор, какъвто е заваръчния шев, влияе негативно на издръжливостта на екстремно-нискоциклична умора на стоманата, независимо от доброто ѝ свойство за дисипация на енергия.

IV.5 Определяне на зависимост между брой цикли до разрушение и диапазон на пластичните деформации

На базата на експериментално получените полуцикли до разрушение са определени кривите на броя полуцикли до разрушение спрямо амплитудата на пластичните деформации. Редица автори [35, 36, 50] възприемат линейна зависимост между логаритъма на амплитудата на пластични деформации и логаритъма на броя на полуциклите до разрушение. Някои от най-популярните модели, които служат за определяне на броя полуцикли до разрушение за променлива амплитуда на пластичните деформации са предложени от *Coffin-Manson* [27, 28] и *Tateishi* [35].

На ***Фиг.IV-10*** са представени експериментално получените зависимости между амплитудите на пластичните деформации и броя полуцикли до разрушение, представени в логаритмичен вид. Материалните константи ε'_f и c в настоящото изследване са получени с помощта на резултатите от проведените цикличните знакопроменливи тестове.



Фиг.IV-10 *Експериментални криви в координати амплитуда на пластичните деформации/ брой полуцикли до разрушение, представени в логаритмичен вид.*

Коефициентът ε'_f представлява пресечната точка на ординатата с експерименталната крива, а коефициентът c представлява тангенсът на ъгъла на наклона на експерименталната крива. *Coffin-Manson* и *Tateishi* предлагат линейна

зависимост между логаритъма на амплитудите на пластичните деформации и логаритъма на броя полуциклите до разрушение. В настоящата дисертация също е възприето експерименталните криви да се апроксимират с права линия, макар че това не съответства напълно на действителния им вид. Независимо от това приближение, приемайки същата линейна зависимост може да се направи сравнение със съществуващите модели и получените в дисертацията резултати. Получените стойности на материалните константи са представени в ***Таблица IV-2.***

Таблица IV-2

	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

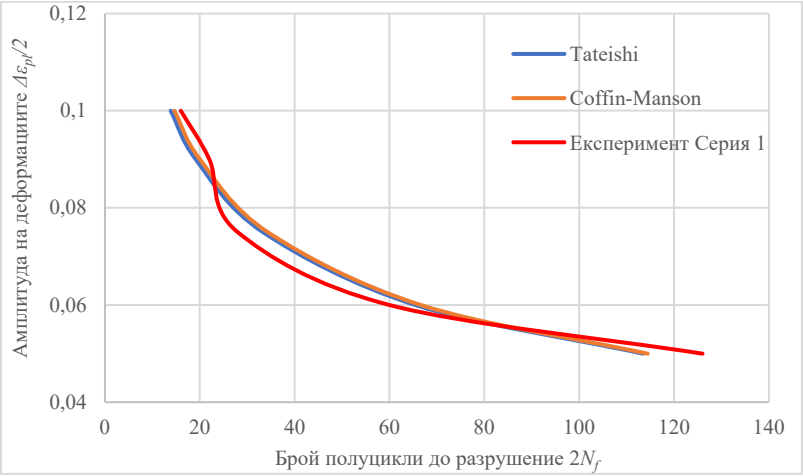
Серия 1 – триточково огъване

В ***Таблица IV-3*** са представени експериментално получените полуцикли до разрушение при Серия 1, сравнени с прогнозираните стойности от двата представени по-рано модела.

Таблица IV-3. *Серия 1 – Сравнение между експериментални резултати и съществуващи модели за предсказване на броя полуцикли до разрушение*

$\Delta\varepsilon_{pl}$	$\Delta\varepsilon_{pl}/2$	C_m	$2N_f$ *(Tateishi)*	$2N_f$ (*Coffin-Manson)*	$2N_f$ (*Експеримент Серия 1*)	Разлика (%)
0,10	0,05	0,992	113	114	126	-9,95%
0,12	0,06	0,983	65	67	60	9,15%
0,15	0,075	0,970	33	34	28	19,02%
0,18	0,09	0,957	19	20	22	-13,04%
0,20	0,10	0,947	14	15	16	-13,37%

На ***Фиг.IV-11*** сравнението е представено графично. На нея се вижда, че двата съществуващи модела дават достоверни резултатите за издръжливостта на елементите. Наблюдава се по-съществена разлика при амплитуда на пластични деформации около ε_{pl}=0,075.



Фиг.IV-11 *Сравнение между експериментално получените брой полуцикли до разрушение и прогнозираните с моделите на Tateishi и Coffin-Manson. Серия 1*

Серия 2 – четириточково огъване

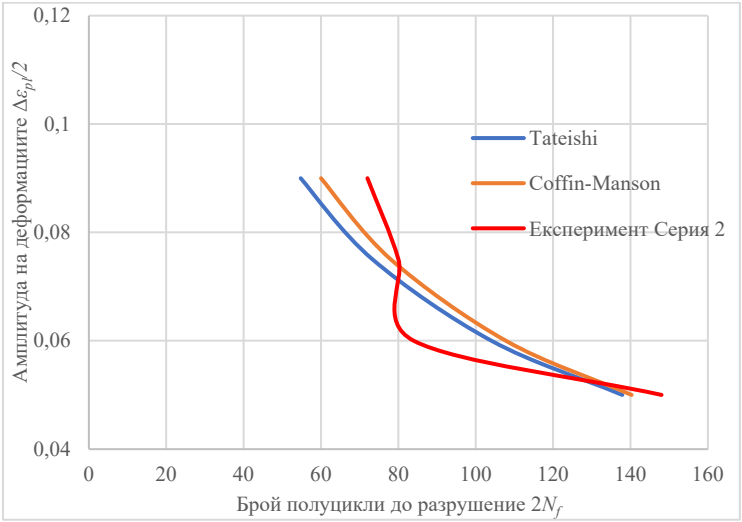
При серия 2 съществуващите модели отново предсказват стойности, близки до експерименталните. При тази серия разликата е най-съществена при амплитуда на пластичните деформации около 6%, а при амплитуда от 9% моделите започват да подценяват действителната издръжливост на изпитаните образци. На ***Таблица IV-4*** са представени резултатите от Серия 2.

Таблица IV- 4. *Серия 2 – Сравнение между експериментални резултати и съществуващи модели за предсказване на броя полуцикли до разрушение*

$\Delta\varepsilon_{pl}$	$\Delta\varepsilon_{pl}/2$	C_m	$2N_f$ *(Tateishi)*	$2N_f$ (*Coffin-Manson)*	$2N_f$ (*Експеримент Серия 1*)	Разлика (%)
0,10	0,05	0,983	138	140	148	-6,84%
0,12	0,06	0,966	104	108	84	23,90%
0,15	0,075	0,939	73	78	80	-8,33%
0,18	0,09	0,913	55	60	72	-23,95%

За разлика от другите серии, при Серия 2 броят на полуциклите до разрушение не намалява плавно с увеличаване на амплитудата на пластичните деформации. Явлението е благоприятно за издръжливостта на изпитвания елементи.

На база на по-големия брой полуцикли до разрушение, както и на голямото количество дисипирана енергия (***Фиг.IV-12***), може да се заключи, че изпитваните елементи имат по-добро поведение, когато дължината на пластичната зона е по-голяма.



Фиг.IV-12 *Сравнение между експериментално получените брой полуцикли до разрушение и прогнозираните с моделите на Tateishi и Coffin-Manson. Серия 2*

На ***Фиг.IV-12*** се вижда, че експерименталната крива променя своя наклон при амплитуда на пластичните деформации около 0,06. След тази стойност броят на полуциклите до разрушение намалява по-бавно с увеличаване на амплитудата на деформациите. Най-вероятното обяснение за този ефект се коренини в опитната постановка. Авторът счита, че се реализира частично запъване в мястото на контакт между изпитваните елементи и опорните плочи. При Серия 2 приложената сила е по-голяма, отколкото при Серия 1, докато самата стойност на преместването е относително еднаква. В резултат на запъването възникват огъващи моменти в краищата на елемента, които водят до преразпределяне на усилията и изменят напрегнатото и деформирано състояние на елемента. Това явление води до по-благоприятно разпределение на деформациите, което променя наклона на експерименталните криви и формално увеличава издръжливостта на ЕНЦУ.

Серия 3 – четириточково огъване и заваръчен шев в средата

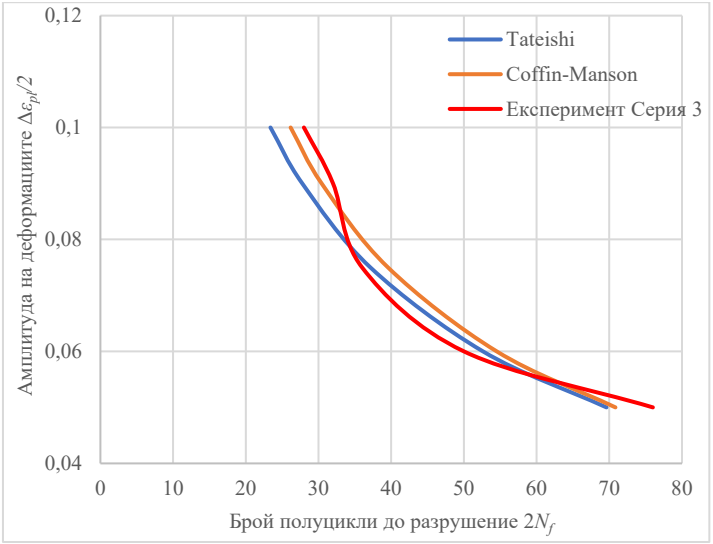
При елементите от Серия 3 моделите на *Tateishi* и *Coffin-Manson* отново могат да дадат апроксимация на издръжливостта за всички изпитани образци. Съдейки от

резултатите, представени в ***Таблица IV-5***, броят на полуциклите до разрушение намаля плавно с увеличаване на амплитудата на деформациите. Тази тенденция се наблюдава и при елементите от Серия 1.

Таблица IV-5. *Серия 3 – Сравнение между експериментални резултати и съществуващи модели за предсказване на броя полуцикли до разрушение*

$\Delta\varepsilon_{pl}$	$\Delta\varepsilon_{pl}/2$	C_m	$2N_f$ *(Tateishi)*	$2N_f$ *(Coffin-Manson)*	$2N_f$ *(Експеримент Серия 3)*	Разлика (%)
0,10	0,05	0,983	70	71	76	-8,41%
0,12	0,06	0,965	53	55	50	5,24%
0,15	0,075	0,939	37	40	36	3,17%
0,18	0,09	0,912	28	30	32	-13,22%
0,20	0,10	0,894	23	26	28	-16,44%

Елементите от серия 3 показват двойно по-малък брой полуцикли до разрушение в сравнение с елементите от серия 2, въпреки еднаквата статическа схема и протоколи на натоварване.



Фиг.IV-13 *Сравнение между експериментално получените брой полуцикли до разрушение и прогнозираните с моделите на Tateishi и Coffin-Manson.Серия 3*

IV.6 Функция за определяне на издръжливостта на стоманени елементи при ЕНЦУ

В настоящата дисертация са изследвани две зони в които се наблюдават завишени стойности на пластичните деформации – зона с локално смачкване, породена от механичния контакт между двата стоманени елемента (натоварващ болт и образец) и зона в която има напречен ъглов заваръчен шев. От резултатите представени на ***Фиг.IV-11*** до ***Фиг.IV-13*** може да се заключи, че съществуващите теоретични модели за апроксимиране на издръжливостта на стоманата при ЕНЦУ могат да дадат обективна оценка, когато в изследваните елементи има такива зони. Въпреки това, при някои амплитуди на пластичните деформации, съществуващите модели надценяват реалната издръжливост на стоманата. Това налага да се обмисли предложение за модифициране на теоретичните модели, така че те да може да се прилагат при практическо изследване на конструкции.

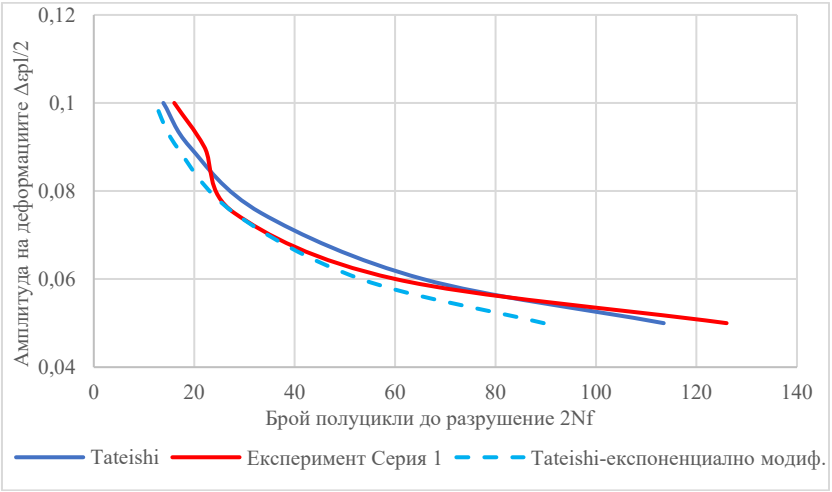
Поради множеството сложни за отчитане фактори, които влияят върху издръжливостта на стоманата, като например скоростта на зараждане и разпространение на пукнатини, големината на началните несъвършенства, качеството на заваръчните шевове и др., е трудно да се даде конкретна формула, която е лесна за прилагане и може да обхване всички описани фактори. Един от възприетите подходи в науката е да се използва емпиричен корекционен коефициент, получен на базата на експериментални резултати. Ако се направи сравнение между отношението на логаритъма на броя полуцикли до разрушение, предсказан с модела на *Tateishi* и експериментално получените стойности, съотношението винаги е между 0,95 и 1,05 за всички изследвани елементи. Това поражда основание да се предложи експоненциална зависимост за интерпретация на резултатите, която има вида:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{2} = (\varepsilon_f'(2N_f)^c . C_m)^{\varepsilon_{lg}}, \qquad (IV\text{-}4)$$

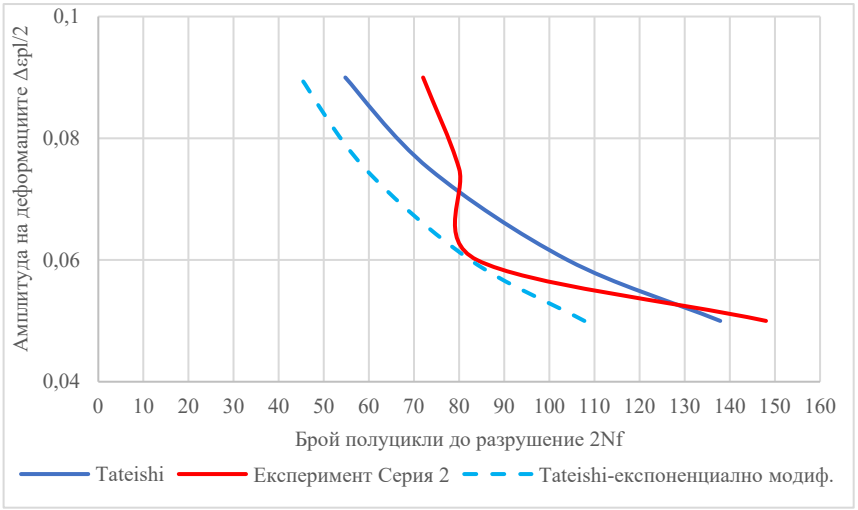
където ε_{lg} е корекционен коефициент. Стойността на коефициента ε_{lg} се предлага да бъде еднакъв за всички изпитани серии:

$$\varepsilon_{lg} = 0{,}95 \qquad (IV\text{-}5)$$

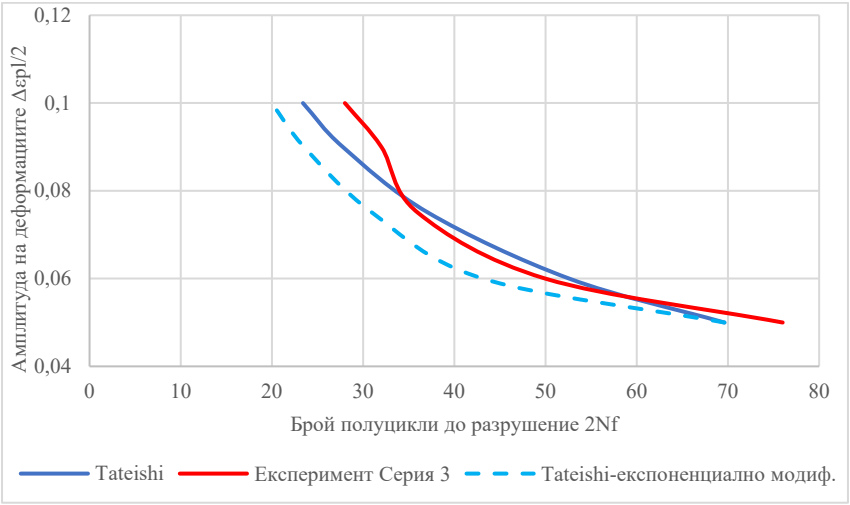
На ***фиг.IV-14*** са представени коригираните криви получени с израз (*IV-4*) и предложената модификация, използвайки коефициентът ε_{lg} изчислен по (*IV-5*).



а)Серия 1



б)Серия 2



в)Серия 3

Фиг.IV-14 *Сравнение между експерименталните криви и експоненциално модифицираното уравнение за Серия 2 и Серия 3*

В таблица ***IV-6*** е направено сравнение между експериментално получения брой полуцикли до разрушение и тези предсказани чрез логаритмично модифицираното уравнение на *Tateishi*, използвайки израз (*IV-4*) .

Таблица IV-6					
Серия 1					
$\Delta\varepsilon_{pl}$	$2N_{Tat.,1}$	$2N_{Експ,1}$	ε_{lg}	$2N_{Tat.,modif,1}$	Разлика
0,1	113	126	0,95	90	-28,92%
0,12	65	60	0,95	53	-11,45%
0,15	33	28	0,95	28	-0,12%
0,18	19	22	0,95	17	-24,97%
0,2	14	16	0,95	12	-24,04%
Серия 2					
$\Delta\varepsilon_{pl}$	$2N_{Tat.,1}$	$2N_{Експ,1}$	ε_{lg}	$2N_{Tat.,modif,1}$	Разлика
0,1	138	148	0,95	108	-27,18%
0,12	104	84	0,95	83	-1,78%

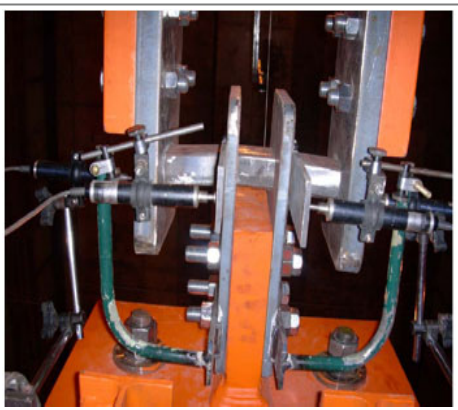
0,15	73	80	0,95	59	-26,04%
0,18	55	72	0,95	45	-37,74%
Серия 3					
$\Delta\varepsilon_{pl}$	$2N_{Tat.,1}$	$2N_{Експ,1}$	ε_{lg}	$2N_{Tat.,modif.1}$	Разлика
0,1	70	76	0,95	56	-25,92%
0,12	53	50	0,95	43	-13,68%
0,15	37	36	0,95	31	-13,89%
0,18	28	32	0,95	24	-26,51%
0,2	23	28	0,95	20	-28,62%

От таблицата се вижда, че разликата между модифицираните резултати и експерименталните е в порядъка на 15 до 30% и винаги е в полза на сигурността.

Прилагането на уравнението на *Tateishi* без допълнителни корекции може да даде достоверна оценка за броя полуцикли до разрушение. Предложеният емпиричен корекционен коефициент $\boldsymbol{\varepsilon_{lg}}$ (израз (*IV-4*)) може да се използва като инструмент при оценка на издръжливостта на плътни, сравнително къси (дължина по-малка от 20 пъти височината), квадратни или правоъгълни елементи от нисковъглеродна стомана, подложени на екстремни цикли на натоварвания в присъствието на конструктивни несъвършенства (концентратори), каквито на практика са неизбежни в реалните конструкции.

IV.7 Приложение на модела за определяне не издръжливостта на стоманени елементи при ЕНЦУ към системата INERD болтова става

Тук накратко ще се представи процедура за приложението на предложения в дисертацията модифициран модел на *Tateishi* за определяне на натрупаната повреда в конструкция подложена на силни земни движения. Процедурата може да се използва за реалистична оценка на степента на повреда за рамки с центрично включени диагонали по системата *INERD* болтова става [37]. Поведението на щифтът от системата *INERD* е идентично с това на изпитаните в настоящото изследване елементи. То може да се апроксимира чрез модел на гредови елемент, подложен на три- или четириточково огъване.



а) Тестове проведени от Calado и колектив [84]



б) Тестове проведени в УНИЛ-МДПК изследвания

***Фиг. IV-15** Визуална съпоставка на системата INERD болтова става и настоящото експериментално изследване*

Поради случайния, цикличен характер на сеизмичното въздействие, при едно реално земетресение в дисипативните елементите от конструкцията (в случая щифтовете) ще се реализират значителен брой цикли на натоварване с различни диапазони на пластичните деформации. Чрез подходящ метод за схематизиране на циклите (например *метод на дъждовния поток*) може да се трансформира историята на междуетажното преместване в история на осовото преместване в диагонала $\boldsymbol{\delta}$ и оттам в спектър на преместванията. Тези осови премествания се явяват стрелката при огъването на щифта. Създаването на числени модели за всеки различен диапазон на приложеното преместване, респективно реализираната деформация, на практика би било много трудоемък и бавен процес, превръщаш този подход в неприложим за реални проекти. За опростяване на подхода и ускоряване на процеса може да се приложи израз (*IV-2*).

На базата на изрази (*IV-4*) и (*IV-5*) може да се определи каква повреда е натрупала конструкцията, в частност нейния дисипативен елемент, като се използва закона на *Palmgren-Miner* [31,32].

Процедурата за приложение на модела разработен в тази дисертация за определяне не издръжливостта на стоманения щифт от системата INERD болтова става при ЕНЦУ предизвикана от силно земетресение или серия от земетресения е следната:

- Избор на конструкция прототип с прилагане на INERD болтова става, например двуетажна търговска сграда;

- Създаване на изчислителен модел за нелинеен анализ и провеждане на серия от динамични нелинейни анализи с използване на акселерограми (три, седем или по-голям брой);
- Получаване на историята на хоризонталното междуетажно преместване;
- Определяне на историята на удължението (скъсяването) в диагонала $\boldsymbol{\delta}$ от РЦВД;
- Сортиране и преброяване на циклите на натоварване по диапазони на преместването, например с помощта на метода на дъждовния поток;
- Определяне на реализираните диапазони на пластични деформации за всеки цикъл на натоварване и съставяне на спектър на диапазони на пластични деформации в щифта;
- Определяне на максималния брой цикли до разрушение за съответните диапазони на пластичните деформации по израз (*IV-4*);
- Определяне на натрупаната повреда $\boldsymbol{D_i}$ за всеки различен диапазон на пластичните деформации.
- Определяне на общата повреда по закона на *Palmgren-Miner* $D = \sum D_i$.
- Окончателна оценка на индекса на натрупаната повреда $\boldsymbol{D}$ и определяне на остатъчния му ресурс.
- Оценка на граничното състояние (нивото на поведение), до което дадено земетресение е довело проектирана конструкция, както и оценка на нейния остатъчен ресурс за следващи трусове.

Така предложената процедура за оценка на издръжливостта на дисипативния щифт в системата INERD болтова става може да се прилага посредством динамичен нелинеен анализ или посредством стъпково-нарастващ динамичен нелинеен анализ (IDA) чрез използване на нормален софтуер за практически цели.

Заключение

Работата, представена в тази дисертация, има за цел да изследва поведението на стоманени елементи в условия на натоварвания, предизвикващи екстремно-нискоциклична умора. Специално внимание е обърнато на няколко фактора, които влияят върху поведението на стоманата като наличие на заваръчен шев и дължината на зоната в която се образуват пластични деформации.

Получените експериментални резултати показват, че съществуващите модели за определяне на издръжливостта на стоманени елементи може достоверно да предскажат броя цикли до разрушение при различни амплитуди на приложените деформации. Въпреки това в съвременни нормативи липсва предписания за изследване на реални конструкции при подобни екстремни натоварвания.

Обобщаващи изводи от проведените научни изследвания по темата

Проведената експериментална програма доведе до формулирането на следните заключения за поведението на квадратни стоманени елементи от ниско въглеродна стомана S235 и издръжливостта им на екстремно-нискоциклична умора.

1. Квадратните плътни стоманени елементи, подложени на огъване, показват добра издръжливост при циклични натоварвания. В елементите не се реализира местна или обща загуба на устойчивост.
2. Стоманените елементи имат значителна способност да дисипират енергия при циклично знакопроменливо натоварване, дори след първоначалното образуване на пукнатини;
3. Причината за разрушение на елементите е екстремно-нискоциклична умора. Основният двигател на процеса на разрушаване е зараждането, образуването и разпространението 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 концентратора и по-конкретни в ъгъла 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 големината на пластичната зона (вида на моментовата диаграма и диаграмата на срязващи сили);
4. Прилагането на силата в две точки (Серия 2 и 3), вместо в една (Серия 1) увеличава дължината на пластичната зона и води до удължаване на живота на стоманените елементи (броя цикли до разрушаване). Това явление е благоприятно за издръжливостта им при екстремно-нискоциклична умора. Елементите работещи при четириточково огъване (Серия 2 и 3) могат да дисипират повече енергия, отколкото тези, работещи при триточково огъване;
5. Наличието на заваръчен шев намалява издръжливостта на елементите при екстремно-нискоциклична умора;
6. При елементите от Серия 1 се наблюдава ясна деградация в количеството дисипирана енергия с увеличаване на диапазона на пластичните деформации. Подобна зависимост не е наблюдавана при елементите от Серия 2 и Серия 3;
7. Числен модел с обемни крайни елементи може прецизно да симулира реалното поведение на изпитаните стоманени образци;

Научно и научно-приложни приноси

В резултат на своята изследователска работа по тази дисертация, авторът претендира за следните научни и научно-приложни приноси:

1. Предложена е дефиниция на явлението екстремно-нискоциклична умора основано на систематичен анализ на теоретичните и експериментални научни изследвания, както и на база собствен изследователски опит.
2. Планирана е и е реализирана мащабна експериментална кампания включваща тестове на 19 броя образци от квадратни плътни профили, разделени в три серии, подложени на натоварване предизвикващо екстремно ниско-циклична умора. По експериментален път е получена действителната работна диаграма на стоманата, от която са произведени образците. Изготвено е сравнение между експерименталните резултати и резултатите получени чрез числено параметрично изследване на квадратни плътни профили с помощта на числен модел с обемни крайни елементи. Сравнението е направено за всяка от изпитваните серии.
3. Дефиниран е механизъм за натрупване на повредите и разрушаване на квадратни стоманени плътни елементи, подложени на огъване следствие на циклично знакопроменливо натоварване. След прилагане на енергетичен метод за оценка на издръжливостта са предложени конкретни гранични стойности на коефициента на цикличен спад на дисипираната енергия α_{fr} за дефиниране на настъпване на инженерен стадий на разрушение за всяка от експерименталните серии;
4. Предложен е аналитичен модел и формули (израз (*IV-4*)) за определяне на зависимостта между преместване и реализирана относителна деформация на къси квадратни стоманени елементи, подложени на огъване. Предложена е процедура за прилагане на аналитичния модел при елементи със сходна форма и използвани като компоненти от конструктивна система за оценка на тяхната издръжливост на ЕНЦУ при сеизмични въздействия.
5. Предложен и валидиран с експерименталните резултати е корекционен израз за модифициране на аналитичния модел на *Tateishi* . Изразите служат за определяне на броя цикли до разрушение при определен диапазон на пластичните деформации, когато в стоманените елементи има наличие на два различни вида концентратори. Изведените зависимости може да бъдат използвани при оценка на издръжливост на стоманени елементи, при които не настъпва местна загуба на устойчивост, в присъствието на конструктивни несъвършенства или заваръчни шевове.

Насоки за бъдещи изследвания по темата

1. Прецизиране на дефиницията за екстремно-нискоциклична умора. Прецизиране на границите между екстремно- и нискоциклична умора.

2. Разширяване на експерименталната програма, така че да включва изследване на елементи с различни форми и размери на напречното сечение (напр. правоъгълни, кръгли и отворени напречни сечения от стоманени профили). Анализ на влиянието на различни видове заваръчни шевове – ъглови, челни и т.н. Анализ на елементи за ЕНЦУ при комбинирано натоварване, например огъване съчетано със срязване.

3. Обогатяване на модела за натрупване на повредите чрез въвеждане на параметри, отчитащи натрупването на пластичните деформации. Необходимо е валидирането на α_f при други геометрии, натоварвания и условия на околната среда (включване на температурата или корозията в изследванията).

4. Изследване на приложимостта на аналитичния модел за определяне на броя цикли до разрушение за различни конфигурации на напречното сечение, натоварване и вид концентратор.

5. Изследване и предлагане на различни подобрения в геометрията на елементите с цел избягване влиянието на концентраторите.

6. Провеждане на серия от динамични анализи с прилагане на процедурата предложена в точка IV-8.

Благодарности

Искам да изкажа своите искрени благодарности към научния ми ръководител доц. д-р инж. Цветан Георгиев за подкрепата, търпението, приятелското и професионално отношение през годините. Благодаря за безценните съвети и напътствия, които получих както в професионален, така и в личен план. Благодаря за огромното отделено време и внимание, които позволиха създаването на този дисертационен труд.

Искам да благодаря на семейството си за търпението и подкрепата по време на разработването на дисертацията.

Благодаря на всички членове на катедра МДПК за отзивчивостта, подкрепата, съветите и градивните коментари, които получих по време на разработването на дисертационния труд.

Благодаря на ЦНИП към УАСГ за разпознаването на потенциала на научния проект и подкрепата по време на неговото реализиране, както и на МОН за предоставеното финансиране по договор Д-146/22.

Благодаря на екипа на УНИЛ към катедра МДПК и специално на доц. д-р инж. Вътю Танев за отзивчивостта, отделеното време и труд по организацията и провеждането на експерименталната програма. Проведените изследвания нямаше да са възможни без тях.

Публикации, свързани с темата на дисертацията

1. *Арнаудов Н.,* "Ниско- и екстремно-нискоциклична умора на стоманени елементи", Годишник на УАСГ, том 54, брой 3, стр. 563-580, 2021;
2. *Арнаудов Н.,* "Модели за определяне на издръжливостта на стоманени елементи при екстремно-нискоциклична умора", I Младежка научна конференция с международно участие, 4-5 ноември София, 2021;
3. *Арнаудов Н., Георгиев Цв., Танев В.,* "Особености при експерименталното изследване на цикличното поведение на стомана клас S235JR при големи пластични деформации", Годишник на УАСГ, том 56, брой 4, 2023;

Коя публикация по-точно?

До момента е известно 1 цитиране на разработената публикация в:

1. *Георгиев, Цв.,* "Стоманени рамки с центрично включени диагонали. Основни аспекти на сеизмичното поведение", УАСГ, ISBN 978-954-724-177-0, 2024;

Д Е К Л А Р А Ц И Я
З А О Р И Г И Н А Л Н О С Т

от **Николай Радославов Арнаудов,** докторант към катедра "**Метални, дървени и пластмасови конструкции**", **Строителен факултет**, зачислен на **01.06.2020**, **редовна** форма на обучение
със Заповед № 274 на Ректора на УАСГ,
с научен ръководител/консултант **доц. д-р инж. Цветан Стефанов Георгиев**

Долуподписаният Николай Радославов Арнаудов,

Д Е К Л А Р И Р А М
с ъ г л а с н о ч л . 2 7 , а л . 2 о т
П П З Р А С Р Б :

1. Представената от мен за защита дисертация за присъждане на образователната и научна степен "доктор" на тема: "**Оценка на издръжливост на стоманени елементи при нискоциклична умора**" е моя оригинална авторска разработка. Дисертационният ми труд съдържа резултати с приноси за оригиналност, на базата проведени от мен научни изследвания по темата и описани в дисертацията, както следва:

- Предложена е дефиниция на явлението екстремно-нискоциклична умора
- Дефиниран е механизъм за натрупване на повредите и разрушаване на квадратни стоманени плътни елементи, подложени на огъване следствие на циклично знакопроменливо натоварване.
- Предложен е аналитичен модел и формули за определяне на зависимостта между преместване и реализирана относителна деформация за къси квадратни стоманени елементи, подложени на огъване.
- Предложени са корекционни изрази за модифициране на аналитичния модел на *Tateishi*.

Д Е К Л А Р И Р А М :

2. Спазил съм изискванията за авторско право по отношение на използваните източници и не съм използвал неправомерно чужди трудове, без да посоча техния автор и източник.

3. Настоящият дисертационен труд не е представян пред други университети, институти и други висши училища за придобиване на образователна и научна степен.

Известно ми е, че за деклариране на неверни данни в настоящата декларация нося отговорност по НК.

Дата: ……
Докторант: ……....

ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ:

1. *Bruneau M., Uang C., Sabelli R.,* "Ductile Design of Steel Structures", Second Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc, ISBN 978-0-07-162395-7, 2011;
2. *Kuwamura H., Yamamoto K.*, "Ductile crack as trigger of brittle fracture in steel", Journal of Structural Engineering, Volume 123, Issue 6, 1997;
3. *Ge H., Jia L.*, "Ultra-low -Cycle fatigue Failure of Metal Structures under Strong Eearthquakes", Springer, ISBN 978-981-13-2661-5, 2019;
4. БДС EN 1993-1-1:2022: Еврокод 3 - Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-1: Общи правила за сгради, 2022;
5. БДС EN 1998-1-1:2024. Еврокод 8: Проектиране на конструкциите за сеизмична устойчивост. Част 1-1: Общи правила и сеизмични въздействия, 2024;
6. *Shimada K., Komotori J., Shimizu M.,* "The applicability of the Manson–Coffin law and Miner's law to extremely low cycle fatigue", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, 53 (491), p.1178-1185, 1987;
7. *Dufailly J., Lemaitre J.*, "Modeling Very Low Cycle Fatigue", International Journal of Damage Mechanics, Volume 4 (2), 1995;
8. *Kanvinde A., Deierlein G.,* "Cyclic Void Growth Model to Assess Ductile Fracture Initiation in Structural Steels due to Ultra Low Cycle Fatigue", Journal of Engineering Mechanics, Volume 133(6), 2007; (37)
9. *Георгиев Цв., Ганчев О., Цветкова Тр.*, "Експериментално изследване на модифицирани диагонали за нискоциклична умора", Годишник на УАСГ 51 (12), с.67-82, ISSN 2534-9759, 2018;
10. *de Castro e Sousa A.,* "Ultra-low cycle fatigue of welded steel joints under multiaxial loading- Thesis", Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), 2017*;*
11. *Midorikawa M., Nishiyama I., Tada M., Terada T*., "Earthquake and tsunami damage on steel buildings caused by the 2011 Tohoku Japan Earthquake", Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, Tokyo, 2012;
12. *Брайнов М., Венков Л*., "Стоманени конструкции", Техника, УДК 624.014(075.8), София, 1991;
13. ESDEP-European Steel Design Education Programme: Lecture 12.2: Advanced Introduction to Fatigue, 1991;
14. *Цачев Ст.*, "Стоманени строителни конструкции", КИИП София-град, ISBN 978-619-90034-2-8, 2013;
15. *Рангелов Н.,* "Стоманени конструкции от тънкостенни студеноформувани елементи. Теоретични основи и проектиране съгласно БДС EN 1993-1-3 и БДС EN 1993-1-5", КИИП София-град, ISBN: *978-619-90034-0-4; 2018;*
16. *Stephens I.R., Fatemi A., Stephens R.R., Fuchs H.,* "Metal Fatigue in Engineering", Second Edition, John Wiley & Sons, ISBN 978-0-471-51059-9, 2001;
17. БДС EN 1993-1-9:2025: Еврокод 3 - Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-9: Умора, 2025;

18. *Георгиев Л.,* "Оценка, ремонт и усилване на стоманени мостове", Дисертация, УАСГ, София, 2007;
19. http://www.difference.minaprem.com/joining/difference-between-weld-metal-and-heat-affected-zone-haz/ - Посетен на 05.01.2025;
20. *Komotori J.*, *Shimizu M.*, "Grain size effect in low cycle fatigue of steel under mean strain", Proceedings of the 7th international conference on fracture, Pergamon Press, p. 1213-1220, 1989;
21. *Bauschinger J.,* "On the change of the position of the elastic limit of iron and steel under cyclic variations of stress", Mitt. Mech-Tech. Lab., Volume 13, No. 1, 1886;
22. *Griffith A.,* "The phenomena of rupture and flow in solids", Trans. Roy Soc., Volume A221 p.163, 1920;
23. *Irwin G.R.*, "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate" Trans. ASME, Volume 24, p.361, 1957;
24. *Kim Y., Hwang W*. "High-Cycle, Low-Cycle, Extremely Low-Cycle Fatigue and Monotonic Fracture Behaviors of Low-Carbon Steel and Its Welded Joint", Materials, Volume 12 (24), 2019;
25. *Basquin O.H.,* "The experimental law of endurance tests", Proc. ASTM, Vol. 10, p.625, 1910;
26. https://www.jfe-tec.co.jp/en/tech-consul/fatigue13.html - Посетен на 05.01.2025;
27. *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;
28. *Manson S.S.,* "Fatigue a complex subject – some simple approximations", National Aeronautics and space administration, 1965;
29. Ansys Theory Reference Release 2021 R2, 2021;
30. *Vayas I., Ermopoulos J., Ioannidis G.,* "Design of steel structures to Eurocodes", Springer, ISBN 978-3-319-95474-5, 2019;
31. *Palmgren A.,* "Die Lebensdauer von Kugellagern", ZDVDI, Vol. 68, p.339, 1924;
32. *Miner M.A.,* "Cumulative damage in fatigue", Journal of Applied Mechanics, 12(3) A159, 1945;
33. https://sdcverifier.com/structural-engineering-101/rainflow-counting-approach - Посетен 26.05.2025;
34. *Tu S., Ren X., He J., Zhang Zh.*, "Stress-strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: A review", Fatigue and fracture engineering materials and structures, Volume 43, Issue 1, p.3-19, 2020;
35. *Tateishi K., Hanji T. and Minami K.*, "A prediction model for extremely low cycle fatigue strength of structural steel", International Journal of Fatigue, no. 29, pp. 887-896, 2007;
36. *Kuroda M.,* "Extremely low cycle fatigue life prediction based on a new cumulative fatigue damage model", International Journal of Fatigue, Volume 24, p.699-703, 2001;
37. *Vayas I.,ed.*, "Innovative anti-seismic devices and systems", 1st edition, European Convention for Constructional steel (ECCS), Brussels, ISBN:978-92-9147-136-2, 2017;
38. *Lemaitre J., Chaboche J.,* "Mechanics of solids", English edition, Cambridge university press, ISBN 978-0-521-47758-1, 1990;

39. *Hollomon J.H.*, "Tensile deformation" Transactions of AIME, 162, p.268-290, 1945;
40. *Doege E., Hallfeld T.,* "Metal Working: Stretching of sheets", Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition), p.5518-5521, 2001;
41. *Ramberg W, Osgood WR.* "Description of stress-strain curves by three parameter", National advisory committee for aeronautics, technical note NO. 902, 1943;
42. *Ludwik, P.,* "Elemente der Technologischen Mechanik", Springer Berlin 1909;
43. *Voce, G.*, "A theoretical relationship between stress and strain in work hardening". Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Volume 3(3), p.221-229;
44. *Callister W., Rethwisch D.,* "Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th Edition", Wiley, ISBN 9781119405436, 2019;
45. *Choudhary B.*, *Edwin I.*, "Tensile stress-strain and work hardening behavior of 316NL austenitic stainless steel", Materials Science and Technology, Volume 17, 223, 2001;
46. *Ling Y.,* "Uniaxial true stress-strain after necking", AMP Journal of Technology, Volume 5, 1996;
47. *Li J., Yang G., Siebert T., Shi M., Yang Lianxiang Y.,* "A method of the direct measurement of the true stress-strain curve over a large strain range", Optics and Lasers in Engineering Volume 107, p.194-201, 2018;
48. *Gruewa P., Tanev V., Stoilov G., Pashkouleva D.*, "Experimental assessment of the post-and-plank walls behavior", Engineering Sciences, LIX, No.3, 2022;
49. *Von Mises, R.*, "Mechanik der festen Korper im plastisch-deformablen Zustand", Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, p.582-592, 1913;
50. *Prager W.*, "Recent developments in the mathematical theory of plasticity", Journal of applied psychics, Volume 20, p.235-241, 1949;
51. *Baruah S., Singh I.*, "Low-cycle fatigue simulation of ductile materials using elasto-plastic gradient damage approach", Internal Journal of Mechanical Sciences, Volume 276, 2024;
52. *Huang Y.*, "Simulating the Inelastic Seismic Behavior of Steel Braced Frames Including the Effects of Low-Cycle Fatigue", PhD Thesis, University of California, Berkeley, 2009;
53. *Желев Д.*, "Дуктилно поведение на възли с фланцеви съединения", дисертация, УАСГ, София, 2015;
54. *Rust W.,* "Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen mit ANSYS WORKBENCH", Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-31421-7, 2020;
55. *Raycheva L., Georgiev. Tzv.,* "Assessment of fatigue damage accumulation in Split-X concentrically braced frames", Annual of the UACEG, volume 51 (4), ISSN 2534-9759, p.211-230, 2018;
56. *Rice J.R., Tracey D.M.,* "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Volume 17(3), p.201-217 1969;
57. *Gurson A.L.*, "Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. Part I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media", Brown University, 1975;
58. *Tvergaard V, Needleman A*, "Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar", Acta Metallurgica, Volume 32, Issue 1, p.157-169, 1984;

59. *Георгиев, Цв.,* "Изследване на сеизмичното поведение на рамки с центрично включени диагонали", Дисертация, УАСГ, София, 2012;
60. *Jia L. Koyama T., Kuwamura H.*, "Experimental and numerical study of post buckling ductile fracture of heat-treated SHS stub columns", Journal of Structural Engineering, Volume 140, Issue 7, 2014;
61. *Raycheva L., Georgiev. Tzv., Ganchev O, Raykov St.,* "Experimental investigation of Split-X concentrically braced frames", Annual of the UACEG, ISSN 2534-9759, Sofia, 2017;
62. *Topkaya C., Azad S., Bozkurt M.,* "Low-cycle fatigue testing of shear links and calibration of a damage law", Journal of Structural Engineering, Volume 144(10), 2018;
63. *Fell B., Myers A., Deierlein G., Kanvinde A.*, "Testing and simulation of ultra-low cycle fatigue and fracture in steel braces", Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering 2006;
64. *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;
65. *Wang Q., Zhu P., Correia J., de Jesus A., Lesiuk Grz.,* "Fatigue of Materials and Structures. Physics and Data Science", Chapter 5 Ultra-low -Cycle Fatigue, p.167-191, CRC Press, 2025;
66. *Xu Y., Li X. Zhang Y., Yang J.,* "Ultra-low Cycle Fatigue Life Prediction Model- A review", Metals 13(6), p.1142, 2023;
67. *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;
68. *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;
69. *Райчева Л.*. "Изследване на сеизмичното поведение на вертикални връзки с кръстосани диагонали, пресичащи се в етажна греда", Дисертация, УАСГ, София, 2018;
70. *Georgiev Tzv.,* "Improvement of X-CBF hysteresis behavior by introduction of MCS", 8th Hellenic National Conference on Steel Structures, Tripoli, Greece, p.75, 2014;
71. *Hatanaka K., Fujimitsu T.*, "Some Considerations on Cyclic Stress-Strain Relation and Low cycle Fatigue life", Japanese Society of Mechanical Engineers, Volume 50, p.291, 1984;
72. *Dusicka P., Itani A. Buckle I.G.,* "Cyclic response of plate steel under large inelastic strains", Journal of Constructional Steel Research, Volume 63, p.156-164, 2017;
73. *Tateishi K., Hanji T.*, "Low cycle fatigue strength of butt-welded steel joint by means of new testing system with image technique", International Journal of Fatigue, Volume 26, p.1349-1356, 2004;
74. *Lemaitre J., Desmorat R*., "Engineering damage mechanics", Springer, ISBN 978-3-540-27293-9, 2005;
75. *Xue, L.*, "A unified expression for low cycle fatigue and extremely low cycle fatigue and its implication for monotonic loading", International Journal of Fatigue, Volume 30(10-11), p.1691-1698, 2008;

76. *Ballio, G., Castiglioni, C.,* "A unified approach for the design of steel structures under low and/or high cycle fatigue", Journal of construction steel research, Volume 34, 1995;
77. *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;
78. *Both I., Zuba C., Stratana A., Dubina D.*, "Cyclic behavior of European carbon steels", Eurosteel, 1 (2), p. 3173-3180, 2017;
79. *Ганчева Б., Георгиев Цв., Ганчев О., Райков Ст.*, "Експериментално изследване на различни типове сеизмични свързващи елементи в рамки с нецентрично включени диагонали", Годишник на УАСГ, Том 51, Брой 12, ISSN 2534-9759, 2018;
80. *FEMA 461, Applied Technology Council*. Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, 2007;
81. *Георгиев, В.*, "Изследване на възли от тръбни стоманени конструкции с възлови плочи", Дисертация. УАСГ, 2014;
82. ECCS TC 13: Recommended Testing Procedure for Assessing the Behavior of Steel Elements under Cyclic Loads, 1986;
83. *Райков. Ст.,* "Изследване на поведението на открити бази на стоманени колони при поемането на срязващи сили чрез анкерните болтове", Дисертация, УАСГ, София 2015;
84. *Calado L., Ferreira J. and Feligioni S.,* "Characterization of dissipative connections for concentric bracing systems in steel frames in seismic areas", Detailed Report “IST Lisbon, 2004;
85. *Vayas, I., Karydakis, Ph., Dimakogianni, D., Dougka, G., Castiglioni, C. A., Kanyilmaz, A.,* "Dissipative devices for seismic resistant steel frames - The FUSEIS Project, Design Guide", Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, 2012;
86. *Dimakogianni D., Dougka G., Vayas I.,* "Innovative seismic-resistant steel frames (FUSEIS 1-2) experimental analysis", Steel Construction Design and Research, 5(4), 212-221, 2012;
87. *Calado L., Proenca J., Espinha dos Santos M.,* "Hysteretic behavior of dissipative bolted fuses for earthquake resistant steel frames", Journal of Constructional Steel Research, 85(1), 151-162, 2013;
88. *Hassan M, Salawdeh S. Goggins J*., "Advanced finite elements simulation of ductile structural steel incorporating a crack growth model", Structures, Volume15, p.94-114, 2018;
89. *Арнаудов Н., Георгиев Цв., Танев В.,* "Особености при експерименталното изследване на цикличното поведение на стомана клас S235JR при големи пластични деформации", Годишник на УАСГ, том 56, брой 4, ISSN 2534-9759, 2023;
90. ASTM E606/E606M-12: Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012;
91. БДС EN ISO 6892-1:2020: Метални материали. Изпитване на опън. Част 1:Метод за изпитване при стайна температура, 2020;
92. БДС EN 10025-2:2019: Hot rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels, Comitee Europeen de Normalisation (CEN), 2019; (76)

93. *Popov. E.,* "Engineering mechanics of solids", Prentice-Hall, ISBN 0-13-279258-3, 1990; (30)
94. БДС EN 15129:2018. Anti-seismic devices Comitee Europeen de Normalisation (CEN), Brussels, 2018;
95. ANSI/AISC 341-10. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Illinois, 2010;
96. *Yazici C*., "Mechanical Properties of S235 Steel Protected with Intumescent Coatings Under High Temperatures: An Experimental Study", Advanced Materials and Novel Technique in Civil Engineering Volume 14(6), p.1597, 2024;
97. *Alencar G., Correia J.A.F.O*, "A user-friendly tool for fatigue assessment of steel structures according to Eurocode 3", 5th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Porto; 2016
98. *Chen W.F., Han D.J*., "Plasticity for Structural Engineers", Springer-Verlag, ISBN 978-1-932159-75-2, 1988;
99. *Kaufman E.J., Metrovich B., Pense A.W.,* "Characteristics of Cyclic Inelastic Strain Behavior on Properties of A572 Gr. 50 and A913 Gr.50 Rolled Sections", ATLSS Report No 01-13, Lehigh University, 2001;
100. *Georgiev Tzv*., "Experimental Investigation of Modified Steel Braces for Ultra-low Cycle Fatigue Endurance", STESSA 2024, LNCE 519, pp. 1111-1122, 2024;
101. БДС EN1993-1-2:2024: Еврокод 3: Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-2: Проектиране на конструкции срещу въздействие от пожар, 2024;
102. *Johnson G.R, Cook, W.H.*, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", Procedings of the 7th International Symposium on Ballistics, p.541-574, 1983;
103. *Ge H., Kang L., Tsumura Y.*, "Extremely Low-Cycle Fatigue Tests of Thick-Walled Steel Bridge Piers", Journal of Bridge Engineering, Volume 18, p. 858-870, 2013;
104. *American society for testing and materials*, "Manual on Low Cycle Fatigue Testing", 1969;
105 *Huber P.*, "Robust estimation of Location Parameter", The annals of mathematical statistics, 35(1), p.73-101, 1964;
106 *Георгиев, Цв*., "Стоманени рамки с центрично включени диагонали. Основни аспекти на сеизмичното поведение", УАСГ, ISBN 978-954-724-177-0, 2024;
107 *Castiglioni C. A., Brescianini J., Crespi A., Dell' Anna S. and Lazzarotto L.,* "INERD – Dissipative connections for concentric bracing systems for steel frames in seismic areas – Final Report", Politecnico di Milano, 2004;
108 *Thanopoulos P*., "Behavior of seismic resistant steel frames with energy absorbing devices", PhD Thesis, NTUA, 2006;
109 БДС EN 1993-1-5:2024: Еврокод 3 - Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-5: Пълностенни конструктивни елементи, 2024;
110 *Rangelov N., Penelov Ch., Hadjiyaneva Ir., Radoslavov G.,* "Volume with information brochures for 4 seismically quialified joints – bulgarian edition", ECCS, 2018;