

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ
УНИВЕРСИТЕТ
"СВ.ИВАН РИЛСКИ"**



**UNIVERSITY OF MINING AND
GEOLOGY
"ST. IVAN RILSKI"**

МИННОТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА „ПОДЗЕМНО СТРОИТЕЛСТВО“

МАГ. ИНЖ. АНТОНИО ВИЛИЯНОВ ШОПОВ

**ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА КОРОЗИЯТА ВЪРХУ
МЕХАНИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА СТРОИТЕЛНА
СТОМАНА ЗА ПОДЗЕМНИ СЪОРЪЖЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

**НА ДИСЕРТАЦИОННИЯТ ТРУД ЗА
ПРИСЪЖДАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНАТА И НАУЧНА СТЕПЕН „ДОКТОР“**

Научна област: 5. Технически науки
Професионално направление: 5.7 “Архитектура, строителство и геодезия”
Докторска програма: Подземно строителство

НАУЧЕН КОНСУЛТАНТ: проф. дн Валери Митков

**София
2021**

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Подземно строителство“ към Миннотехнологичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, на 24.11.2021 г., съгласно Ректорска заповед № Р-870 от 15.11.2021 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № Р-912 от 06.12.2021 г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на 16.02.2022 г. от 10:00 ч. в зала 235 „Видекс“ на Миннотехнологичен факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. проф. д-р Димитър Стоянов Анастасов – МГУ, катедра „РПИ“
2. проф. д-р Маринела Иванова Панайотова – МГУ, катедра „Химия“
3. проф. д-р Лена Анастасова Михова – УАСГ
4. проф. д-р Славейко Господинов Господинов - УАСГ
5. проф. д-р Валентина Стефанова Николова - БАН

Резервни членове:

1. доц. д-р Милко Константинов Бернер – МГУ, катедра „ПС“
2. проф. д-р Станчо Петков Петков - БАН

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1.
2.

Дисертационният труд „Изследване влиянието на корозията върху механичните свойства на строителна стомана за подземни съоръжения“ се състои от увод, четири глави, основни изводи, заключение, научни и научно-приложни приноси, списък със собствени публикации по темата и библиография. Общият обем на дисертационния труд 156 страници, включително: 114 фигури, 43 таблици, списък на използваната литература (110 от които 6 на кирилица и 104 на латиница).

Фигурите и таблиците в текста на автореферата следват оригиналната номерация от главите на дисертацията.

Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора. В акредитирана лаборатория на „Контролтест“ ООД (Орган за контрол от Вид “А” - Сертификат № 52ОКА). през периода м.09.2018 – м.03.2019 г.

Автор: *маг. инж. Антонио Вилиянов Шопов*

Заглавие: *Изследване влиянието на корозията върху механичните свойства на строителна стомана за подземни съоръжения*

СЪДЪРЖАНИЕ

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОНИЯТ ТРУД	3
1 Актуалност на темата	3
2 Цел и задачи на дисертационият труд	3
II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОНИЯТ ТРУД	4
Глава I Основни обстоятелства	4
1 Встъпление	4
2 Подземна корозия	5
3 Ускорена корозия	5
4 Стрес корозия	7
5 Анализ на нормативната уредба	8
6 Влияние на корозията върху работна диаграма на материала	8
7 Влияние на корозията при циклично натоварване	10
8 Влияние на корозията при високи температури	10
9 Влияние на корозията при усукване	11
10 Загуба на устойчивост при наличие на корозия	11
11 Моделиране чрез метод на крайните елементи	11
12 Детерминистичен модел	12
13 Стохастичен модел	12
14 Полипонална апроксимация	13
Изводи от глава I	14
Глава II Материали и методи	15
1 Материали	15
2 Методики	16
Глава III Експериментална част	18
III.A Пробни тела	18
1 Основни положения	18
2 Електрохимична ускорена корозия	20
III.B Изследване на механични свойства	26
1 Изследване на пробни тела без корозия	26
2 Изследване на пробни тела с корозия	28
3 Анализ на резултатите	34
4 Микроструктурно изследване	35
Изводи в глава III	37
Глава IV Прогнозиране на корозионното въздействие	38
IV.A Теоретично моделиране	38
1 Встъпление	38
2 Модел на корозионния процес	38
3 Прогнозиране развитието на корозионния процес	38
4 Прогнозиране при устойчиво развитие	46
IV.B Прогнозиране на остатъчна якост и относителна деформация	48
Изводи в глава IV	50
III. ОСНОВНИ ИЗВОДИ	51
IV. НАУЧНО И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ	52
V. СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОНИЯТ ТРУД	53
VI. ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА	54

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОНИЯТ ТРУД

1. Актуалност на темата

Отговорните подземни конструкции и подземни стоманени крепежни елементи са подложени едновременно на корозионно въздействие и механично натоварване. С времето се наблюдава влошаване на якостните и деформационните характеристики на стоманите.

От гледна точка на безопасността конструктивните решения трябва да са такива, че носещата конструкция и най-отговорните конструкционни елементи на изделието да не се разрушават по време на експлоатационния срок и при настъпване на евентуални аварии като пожар, земетресение и др.

В редица страни загубите от корозионното въздействие са прекалено големи. В САЩ е известно, че за ремонт и рехабилитация на корозирали подземни съоръжения към 1989 г. се харчат по 20 милиарда долара годишно, което илюстрира важността на проблема. Световно известните данни удостоверяват, че през 2015 година - 30% от експлоатираните подземни тунелни конструкции са подложени на корозия, като 10% от годишния световен добив на метали се губи във вид на корозионни продукти (ръжда). След извършени промени в нормативната уредба, касаеща управлението на строителните отпадъци и влагането на рециклирани строителни материали, проблемът е придобил значимост и на европейско равнище. Възможността да се използва корозирала стомана, като основен носещ елемент в подземни съоръжения, води до намаляване на използваните полезни ресурси, влияе пряко върху климатичните промени и е щадяща за околната среда.

Обстоятелството да се определи в кой момент във времето даден основен стоманен елемент с корозия не удовлетворява нормативните изисквания, води до значително оптимизиране на експлоатационния ресурс, възможностите за предотвратяване на аварии, предварително планиране на ремонтните дейности и други.

2. Цел и задачи на дисертационият труд

Целта на настоящият дисертационен труд е да изследва промяната и да се прогнозира механичните свойства на корозирала строителна стомана S355JR с помощта на разрушителни методи, други представителни методи за анализ, както и провеждане на експерименти за прогнозиране на влиянието на корозията върху механичните свойства на стоманата. Установяване на зависимости – промяната на относителната деформация и якостта в зависимост от времето при съответните корозионни категории.

Тази цел е постигната чрез решаване на следните задачи:

- 1.** Да се създаде надеждна методика за ускорена корозия на пробни тела от стомана S355JR.
- 2.** Да се изследва промяната на механичното поведение на корозирала строителна стомана S355JR при чист опън, при стайна температура.
- 3.** Да се създаде числен метод за прогнозиране на влиянието на корозията върху напреженията и настъпилите промени.
- 4.** Да се предложи изчислителен модел за определяне на якостта и съответната относителна деформация на корозирали стоманени елементи във времето.

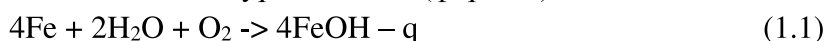
II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯТ ТРУД

Глава I. Основни обстоятелства

1. Встъпление

Съществуват множество фактори, причиняващи корозия на металите, съответно съществуват много видове корозия, които най-общо се делят на две групи – химична газова корозия и корозия в неелектролити и електрохимична, атмосферна, подземна, микробиологична, в цепнатини, подслойна, по ватерлинията, ножева, слоева, ерозионна, кавитационна, фретинг корозия, корозионна умора и др. . [67, 68, 71, 79, 110]. Стандарта в които са изброени е БДС ISO 8044-94. В зависимост от агресивността на средата, корозията може да протича с различна скорост, съответно влиянието и върху механичните свойства може да се прояви по специфични начини във функция на времето.

Корозията е процес на разрушаване на стоманите вследствие на въздействие от агресивни фактори. Известно е, че всяко вещество се стреми към своето изходно състояние, тъй като от енергийна гледна точка формата е най-устойчива. Процесът на корозия при желязото се описва с уравнението (фор. 1.1):



Стоманите влизат в контакт с определени вещества от въздуха или водата, преминават през химическа промяна, която намалява целостта на стоманата. Кислород, сяра, сол и други материали повишават скоростта на корозия. Когато качествата на стоманата се влошават, не може да понесе необходимото въздействие, както преди корозията. Конструктивната стомана, използвана в мостове, железопътни линии и сгради, е подложена на корозия. Затова е необходимо да се наблюдава и управлява корозията, за да се избегне аварийно състояние.

Съществуват изключително много изследвания върху механизма на протичане на процеса, като са обобщени два основни вида корозия – химична и електрохимична.

Класифицирането на корозионната категория е залегнало в стандарт ISO 9223, свързан с корозията в следствие на въздействието на околната среда. Класификацията е подходяща за конструктивните стомани, как околната среда въздейства върху тях, чрез корозионното развитие и се класифицират на база загуба за 1 година в зависимост в средата, в която се намира конструктивният елемент (табл.1.1).

Таблица 1.1 Корозионни категории в зависимост от скоростта на корозията

корозионна категория	C1	C2	C3	C4	C5	CX
влияние	много слабо	слабо	средно	силно	много силно	екстремно
скорост на корозията [mm/год]	< 0.0013	< 0.025	< 0.05	< 0.08	< 0.2	< 0.7

2. Подземна корозия

Причината е аерацията, която съществува в подземните съоръжения и достъпа на кислород до стоманения материал, който стимулира развитието на корозията [110]. В резултат на съвместното действие на влагата, температурата и факторите на средата, върху повърхността на металите се образува слой, в резултат на което те корозират [72, 78, 88, 110]. Важен фактор за подземните конструкции, работещи в силно агресивна среда – тунели, убежища, мини, подземни тръбопроводи и др. Проблемът е значим при стоманените подземни конструктивни елементи, тъй като стоманата корозира и нейните механични свойства намаляват с времето [72, 78, 88, 92, 93, 96, 110].

Корозията в подземните съоръжения обикновено е неравномерна и създава петна, язви и точки (питинг) – фиг.1.1.



Фигура 1.1 Влияние на корозията върху подземните метални крепежни елементи

Независимо, че корозията при металните крепежни елементи е бавно протичащ процес, влиянието ѝ върху механичните свойства е актуален проблем. Обикновено за целта се взимат пробни тела от конструкции, престояли 20-40 години под въздействието на околната среда причиняваща съответната корозионна категория [1, 3, 4, 35].

3. Ускорена корозия

Ускорената корозия представлява изкуствен метод за създаване на корозия. Съществуват пет основни метода за ускорена корозия [71], които се използват - корозия в солена мъгла; цикличен корозионен тест; скрап тест; потапяне в корозионен разтвор и електрохимичен метод.

3.1. Корозия в солена мъгла

Методът с 5% разтвор на NaCl (pH 6.5 ÷ 7.2) при температура 35 °C [109]. Образците от стомана се поставят в камерата за солена спрей [15, 16, 95, 109] в съответствие със стандарт ASTM B117-94 и ISO 9227 [109]. Пробите се изваждат от камерата, почистват се с вода и се изсушават [109]. Следва отстраняване на корозивен продукт, окислен слой от ръжда с остра четка [109]. Наличието на окислен слой води до загуба на тегло от пробата [109]. Загубата на тегло се установява чрез тегловният метод [109]. Установено е [10], че загубата се увеличава с времето [109]. Стереоскопичният тест показва, че след 10 дни, по метода на солена спрей, на повърхността ще си развие питингова корозия. Загубата на тегло е около 11% за период от 60 дни [7, 109].

3.2. Цикличен корозионен тест

Това е реалистичен метод за ускорена корозия. Използва се камера с програмно управление [48], която създава комбинации от циклите на промяна на параметри като температура, влажност, влажна/суха среда, концентрация на разтвора, ултравиолетова радиация. Направено е изследване [9] върху поцинкована ламарина подложена на 12 седмично въздействие от този тип метод и е установено, че корозията, която е получена се равнява на 1 годишно корозионно въздействие на тропически климат.

3.3. Скрап тест

Образците от стомана се поставят на открито под ъгъл от 45 °, обърнат на юг [29]. Те се напръскват с 3% разтвор на NaCl [40, 43, 45] през определено време. Тестът продължава около 6 месеца [109]. Изпитването е стандартизирано в ISO 11474:2014. Това е метод за ускорена корозия, който включва и цикли на намокряне / сушене, промяна на концентрацията на разтвора, температура и ултравиолетова слънчева радиация. Методът е трудоемък и продължителен във времето, поради което не намира приложение в тестовете за якост на опън.

3.4. Потопяне в корозионен разтвор

Удобен е за реализиране от техническа гледна точка. Времето за достигане на желаната степен на корозия зависи от химическия състав на разтвора и от корозионната устойчивост на стоманата [109]. В [11] е използвана естествена морска вода, експериментът е продължил една година, якостта на опън е намалена с 14,5%. В [8, 12] са използвани 20% разтвор на NaCl и плоски тестови тела с напречно сечение 20 × 4 mm. За 8 дни се постига загуба на тегло от 36 - 55%. Особено в цилиндрични образци от стомана и в разтвори, близки до естествената работна среда т.е. 3,5% - 5% NaCl [17, 30, 34, 92], скоростта на корозия е твърде малка. За предпочитане е процесът да бъде ускорен допълнително, обикновено чрез преминаване на електрически ток през него [109].

3.5. Електрохимичен метод

Корозионният процес се ускорява чрез използване на външен източник на постоянен ток и анодно разтваряне на стоманата [2, 24, 27, 41, 49, 81, 91]. Образците за изпитване са свързани към положителния полюс на източника, а към отрицателния се свързва пластина от неръждаема стомана или друг инертен в случая метал. Подава се постоянен ток с определена стойност за определено време, за постигане на степента на корозия [108]. Методът е известен като галваностатичен. Прилага се разтвор от 5% NaCl [17, 19, 24, 49, 55, 81, 90, 91, 108] и плътност на тока 0,1÷20 mA/cm² [1, 17, 26, 31, 32, 42, 49, 50, 53, 54, 70, 81, 91]. В [5] е постигната загуба на маса η е 2÷80%, чрез прилагане на постоянен ток I [A] за период от време t [s], определено по закона на Фарадей (фор. 1.3):

$$t = \frac{\eta \cdot W \cdot z \cdot F}{M \cdot I}; \quad I = A \cdot i \cdot 10^{-3} \quad (1.3)$$

където W е теглото на оригиналния стоманеният образец [g], z е валентността на йона (z = 2,5 е средната стойност за Fe²⁺ и Fe³⁺ на корозионните продукти), F = 96484 C/mol е константата на Фарадей, M = 56 g/mol е атомната маса на ферийона, A е повърхностната площ [cm²]. За да се осигури по-добра точност, в процеса на корозия токът I се проверява до стойност на базата на плътността на тока и остатъчната площ на повърхността A (формула 1.4):

$$A = 2 \sqrt{\frac{\pi l}{\rho} W(1 - \eta)} \quad (1.4)$$

където $\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$ е плътността на стоманата, а l е дължината на изпитвания участък [cm]. Методът дава възможност да се използват различни разтвори на NaCl и различна сила на тока, както се използва от други изследователи [63].

4. Стрес корозия

Това е форма на корозия, която е проблемна област на подземното строителство. Възниква, когато материалът е в инертна среда, но корозира от приложено напрежение. Напрежението може да бъде приложено външно или остатъчно [87, 117]. Корозията няма видими фактори преди счупване и може да доведе до катастрофална повреда. Обикновено се отнася до разграждането и/или образуването на ръжда на дадена метална повърхност в електрохимична среда, подложена на опъни сили в остатъчна или директна форма [87, 117]. Корозията под напрежение ерозира микроскопичния гранулиран състав на метална повърхност, като често причинява напукване и разпадане на повърхността [87, 117]. Много стоманени сплави изпитват корозия под напрежение. Остатъчно напрежение може да бъде напрежението, което остава в материала след формоването, или напрежение, дължащо се на заваряване. Намаляването на стрес-корозията обикновено води до повреда на материала, която може да има тежки последици, тъй като признаците почти не съществуват, преди да се получи аварията [87]. Този вид корозия в някой случай е форма на галванична корозия, където напрегнатите участъци на материала са анодирани към ненапрегнатите сегменти на материала [87]. На практика най-добрият начин за контролиране на корозионната устойчивост е да се ограничат или намалят напреженията, при които материалът се намира под корозионна атмосфера. Механизмът е чрез огъване и не се третира въпроса за отстраняване на остатъка на напреженията [87]. Областите на повишено напрежение ще бъдат анодни за останалите области. Външната част на елемента ще има остатъчно напрежение, тъй като е частта която ще се удължи. Вътрешността на елемента ще има остатъчно напрежение на натиск, защото това е страната, която ще се свие, заради наличния завои (фиг. 1.2).



Фигура 1.2 Схема на действието на стрес корозията

5. Анализ на нормативната уредба

В момента са в действие следните стандарти, имащи отношение към корозията - БДС EN ISO 6892-1:2016 – Метални материали. Изпитване на опън. Част 1: Метод за изпитване при стайна температура. БДС 6372:1986 – Метали. Метод за изпитване на

срязване. БДС 1196:1971 – Метали. Метод за изпитване на усукване. БДС EN ISO 7438:2016 – Метални материали. Изпитване на огъване. БДС 5297:1983 – Метали. Методи за изпитване на умора. БДС EN ISO 6892-2:2011 – Метални материали. Изпитване на опън. Част 2: Метод за изпитване при повишена температура. EN ISO 7539 - Корозия на метали и сплави – Изпитвания на корозия под напрежение. Могат да се използват най-разнообразни форми и размери на пробните тела, като най-често използваните са описани в EN ISO 7539-4 и EN ISO 7539-6.

Пробните тела се изпитват при постоянно натоварване, нарастващо натоварване или при ниска скорост на деформация. Изпитванията могат да включват довеждане на пробното тяло до пълно разрушаване и оценка на начина на разрушаване с цел определяне на склонността към корозионно напукване или прекратяване на изпитването на някакъв междинен стадий и след това определяне степента на зараждане или нарастване на пукнатини. За оценка на склонността към корозионно напукване под напрежение се използва сравнението между идентични пробни тела, експонирани в корозионна и в инертна среда, приложено за един или повече от следните параметри: време за разрушаване; пластичност, оценена например чрез намалението на площта или удължаването при разрушаване; максимален достигнат товар.

6. Влияние на корозията върху работна диаграма на материала

Съществуват данни, че от 1967 година са извършвани изследвания за влиянието, което оказва корозията върху механичните свойства [22], изследвани са два вида стомани – Ст.2 и Ст.3, като е установено, че влиянието което оказва се състои в две основни направления – намаляване на дуктилността и трансформиране на стоманата в крехък материал. В [1] се твърди, че степента на корозия не влияе на якостта на опън, ако се изчислява с действителната площ на напречното сечение, като изследването което е направено е за армировъчна стомана, а степента на корозия достига до 80%, диаметърът започва от 11,75 мм и в следствие на корозията спада до 4,50 мм. В [2] са изпитани пробни тела също от армировъчна стомана, но с корозия до 17,19%. В [3] за пресмятане на напреженията е използвана ефективната (а не номиналната) площ на напречното сечение в лома. В дисертацията [4] се изследва корозирала армировъчна стомана и върху остатъчното механично представяне на корозирала стоманобетонни греди. В дисертация [14], изследваща ефекта на корозията върху физичните и механичните свойства на стоманобетон се установява, че корозията указва своето влияние и там. Източник [5] е насочен основно към влиянието, което оказва натоварването в процеса на експлоатация върху развитието на корозията. В [6] са използвани цилиндрични пръти от стомана А36, от които са получени пробни тела тип епруветки чрез струговане в мерния участък, със стандартна геометрия съгласно стандарт ASTM А-370 и е използвана универсална машина за изпитване на опън. Източник [7] предлага механични изследвания на образци от стомана В420St, подложени на ускорена корозия, а също и на образци, извадени от реални стоманобетонни греди от крайбрежието на Гърция и от индустриална сграда, на около 30-40 години. [15] и [16] са свързани със [7], като е изследвана армировъчна стомана В500St. В [16] е изследвано как се отразява върху влошаването на механичните свойства на армировъчната стомана В500с при наличие на корозия. Използваните плоски пробни тела в [8] са разделени на групи, една от които е контролна. В [12] е изследвано влиянието на питинг-корозията върху кривата на деформиране на материала при опън. Предложена е емпирична формула за пресмятане на намалената якост и деформируемост

в зависимост от големината на корозията. Показано е, че това намаление може да се определи или с емпирични формули, или със симулация по метод на крайните елементи, или като се използва якостен коригиращ фактор, по данни от други изследвания [20, 27, 28]. В [17] е изследвано влиянието на корозията върху механичните свойства при стоманени влакна. В [27] е направено изследване, но със стоманени елементи от армировъчна стомана, установена е емпирична формула. В [20] са изследвани плоски пробни тела, отрязани от мост, изложен на атмосферна корозия в близост до Тихия океан в Япония, след около 100 години експлоатация. В [21] експериментално е изследвано влиянието на корозията върху механичните свойства на армировъчни пръти от стомана B500D при статично и променливо натоварване. В [24] армировъчна стомана е положена на ускорена електрохимична корозия с разтвор на 5% натриев хлорид. Изследовател е установил [13] намаляване на дуктилността като следствие от корозионното въздействие при стомана Gr.70 съгласно стандарт ASTM A516 използвана за контейнери. Съществува публикация [69], в която е изследвано разрушаване на кабелни жици на мостова конструкция в следствие на корозията. В [29] са разработени зависимости за деградация на механичните свойства на корозирани стоманени плочи от стомана Q235 чрез експериментален метод и метод за числено симулиране, базиран на топография на повърхността, като получените резултати отчасти се припокриват с тези от [25]. При публикация [35] стоманобетонни греди стоят 27 години в солена мъгла (3,5% NaCl), след което се вади армировката, която е от стомана B420St и се изпитва на опън. В [54] е изследвана армировъчна стомана с корозия в стоманобетонова греда подложена на огъване. Изследователите в [39] установяват числен метод, чрез апроксимална зависимост от първи ред на корозирали стоманени плочки, твърдейки, че са установили зависимостта чрез експеримент, но липсват данни за вида на стоманата, начинът по който е корозирала, както и потвърждение на получения резултат. Информацията в [41], представлява значително по-подробно изследване в областта на влиянието на корозията върху механичните свойства. Група изследователи в [57], изследват корозирали пробни тела, изработени от материала на съществуващ мост на 75 години. Изследване [62] на стомана Q235 отговаряща на S235, съгласно стандарт EN 10025, установява промяна в зоната на провлачване вследствие на корозионното въздействие, т.е. в площадката на провлачване настъпва момент, в който то изчезва и се установява крехко разрушаване. Съществува публикация [66], в която се изследва влиянието на локалната корозия върху къси стоманени колони, които се използват като мостови пилоти. Друга публикация [84] показва влиянието, което оказва атмосферната корозия върху съществуващи стоманени мостове на реки в Чехия, където корозирали стоманени елементи се прикрепват върху мостовата конструкция, заключението е, че се очаква през 2026 година да бъдат оповестени първите резултати. В [90] се изследва механичното поведение на корозирани високоякостни стоманени пръти от стомана HRB500 под статично и динамично натоварване. Предложен е модифициран модел на якост на Johnson-Cook от корозирали стоманени пръти с висока якост при динамично натоварване с отчитане влиянието на степента на корозия. Проучване [94], изследва различни видове армировъчна стомана B500c, B450c, B400c и B500b. Изследване [95], разглежда корозионно поведение и механичните свойства на стомана Q345 отговаряща на S355 съгласно стандарт EN 10025, чрез изпитване на опън, като са представили процеса на начална корозия и са анализирани характеристиките на долната повърхност и горната

повърхност на корозирания образец. Представена е стохастичната функция на разпределение и зависимостта от времето и на коефициента на загуба на маса. Установено е влиянието на корозия върху крайното удължение, съотношенията, модул на еластичност, напреженията и максимална якост на изследваната стомана.

7. Влияние на корозията при циклично натоварване

В [21] експериментално е изследвано влиянието на корозията върху механичните свойства на стомана B500D при статично и променливо натоварване. В [28], авторите предлагат линейна формула за определяне промяната на Е-модула във функция на променения диаметър, вследствие на корозионното въздействие. В [33] се разглежда остатъчната якост на умора в корозирани стоманени греди на мостова конструкция, съставена от заварени 2Т греди от стомана A588. Дадени са множество криви на умора [28, 33, 46, 50]. Машинните елементи, страдат от деградация на стоманата причинена от корозията. От изследванията, могат да се установят зависимости между „умора - напрежение“ [40, 42, 43, 48]. Дадени са зависимости между „брой цикли“ и „образуването на пукнатина“ [44]. Извършвани са оценки на разсейване на енергийната плътност, в зависимост от брой цикли и деформациите, които са настъпили и промяната в праволинейната ос на елемента [46, 50]. В [40] динамичното натоварване е с честота 95 Hz (5700 rpm) за 5x10⁶ цикли приложено върху стомана AISI 4140. В други източници се използва различно динамично натоварване - 10 Hz за 108 цикли и неръждаема стомана SUS 316L [42]. Честота 50 Hz, докато елемента се скъса на съответното опъново усилие (270, 333, 382, 449 и 515 МПа) от стомана AISI 4340 [43]. Опъново усилие в размер на 1610 МПа и динамично натоварване с честота 5 Hz, стомана BS250 A53 [44]. Ортопедичните имплантанти се изработват от стомана 316L, която е неръждаема, но изследване в [47] е установило, че се появява питинг корозия вследствие на физиологичния разтвор, който се влива в тялото на човек и отчитайки цикличното натоварване на импланта е налице загуба на носимоспособност. В [50] чрез използване на сила 250 kN с константна деформация 0,0003 деформация/секунда, върху образци с диаметър 12 mm от стомана B500. Динамично натоварване с машина с честота 1 Hz за 20 часа, за 28 дена [55]. Динамично натоварване чрез усукване 5x10⁵ цикли, на пробни тела от нисковъглеродна стомана AISI 1020, като е направен и микроструктурен анализ [56]. Динамично натоварване с честота 50 Hz, микроструктурен анализ, за което е използвана стомана AISI 409 SS [63]. В [82] е направено изследване с динамично натоварване с машина с честота 0,5 Hz за стомана S400, отговаряща на S275 съгласно стандарт EN 10025. В публикация [92] е представено изследване на стомана S235JR. Получените резултати показват незначително подобрене на механичните и експлоатационни свойства на стоманата в условията на корозия при постоянно натоварване. При променливи натоварвания и експлоатационна корозия резултатите от умората на стоманата не потвърждават благоприятния ефект.

Прегледът в тази област установи, че извършените до момента изследвания представляват емпирични зависимости и са обвързани с развитието на корозията, както и с промяна на геометричните характеристики и в частност със структурните изменения които тя причинява, но не са обвързани във времето.

8. Влияние на корозията при високи температури

Изследвания са извършени [31, 32, 34], където са определяни механичните характеристики на корозирани елементи, подложени на температури от 120 °C до

1000 °C. Изпитванията на високи температури се извършват в различен диапазон. В [31] температурният диапазон е от 850 °C до 1000 °C, като са изпитвани цилиндрични пробни тела с диаметър 4 мм от стомана AISI 318 LN по стандарт ASTM E9. Изследвания са правени в температури от 150 °C до 1500 °C [70]. Изследванията установяват, че твърдостта и якостта бележат увеличение, но намаляват еластичността и ударната жилавост. Установява се промяна в микроструктурата на стоманата. От представените резултати не са изведени формули, не са търсени зависимости, както по отношение на развитието на корозията, така и влиянието, което тя оказва върху напреженията и относителната деформация.

9. Влияние на корозията при усукване

В изследване [75], е направено изпитване на усукване на машинен елемент с налична питингова корозия. Резултатите установяват, че корозията е идентифицирана като основна първопричина на преждевременна повреда на вал. Дупки, причинени от корозията, ще доведат до много големи натоварвания на глюкокортикоиди и до улесняване на иницирането на умора пукнатина. Ефект от корозия ще намали значително издръжливостта и границата на валове под усукващо натоварване.

10. Загуба на устойчивост при наличие на корозия

Според [2] поведението на корозиралата армировъчна стомана при натиск и при циклично натоварване има значение за поведението на цялата стоманобетонна конструкция в условията на земетръс. В [51] са изследвани натиснати тръби и е анализирана връзката между загуба на дебелината на стената на стоманена тръба, причинена от корозия и натисковата сила. В изследване [61], е направено изследване върху влиянието на корозията върху стеблото на стоманена греда и нейната загуба на устойчивост. В [73] са отразени изследвания върху загуба на устойчивост на стебло и/или на натиснат елемент. В публикация [83] е направено изследване върху корозирани ъглови стоманени профили. В [10] е направен експериментален и числен анализ на корозирани стоманени пластини, подложени на натиск и загуба на устойчивост. В [11] е направен анализ с програма по метода на крайните елементи на корозирани пръти с L-образно напречно сечение, подложени на натиск и загуба на устойчивост. В [18] се изпитват на натиск и изкълчване 24 бр. пръти с L-образно напречно сечение, корозирани в различна степен по галваничен метод. В [39] се третират въпроси като в [20, 23], касаещи атмосферна корозия, мостова конструкция, плоски пробни тела, 3D-сканиране, МКЕ-моделиране. Натоварването е на натиск и се изследва остатъчната критична сила при загуба на устойчивост.

11. Моделиране чрез метод на крайните елементи

В източник [5] е направено моделиране на корозията чрез метод на крайните елементи. В публикация [9] по метод на крайните елементи с помощта на програма са получени криви на деформиране на материала при чисто срязване на идеални плочи, при наличие на питинг корозия. Публикация [23] е свързана с [20] и представя изключително успешно моделиране на ефектите от корозията върху механичните свойства. В [36] е изследвано влиянието на питинг корозията върху якостта на натиск. В публикация [73] са направили модел по метода на крайните елементи след извършване на съответните изпитвания. В публикация [74], изследователите са моделирали чрез метода на крайните елементи развитието на питингова корозия подложена на усукване. В публикация [77] е представен реалистичен модел за симулиране на влиянията на корозията върху

стоманена тръба. Интересното при този модел е, че първо е взета тръбата, след което на местата където ще се появи корозията е поставена мрежа и впоследствие е изграден модела.

12. Детерминистичен модел

В математиката, компютърните науки и физиката, детерминистичният модел е система, в която никаква случайност не е включена в развитието на бъдещите състояния на системата [58, 98]. Ето защо детерминистичният модел винаги ще произвежда същия резултат от дадено начално състояние или първоначално състояние [98]. В математиката, системите които изучават теорията на хаоса, са детерминистични [98]. Ако първоначалното състояние е точно известно, тогава бъдещото състояние на такава система теоретично може да бъде предсказано [98]. В компютърните науки и технологии, детерминистичният модел на изчисление показва, че последователните състояния на машината и операциите, които трябва да се изпълнят, са напълно определени от предходното състояние [98]. При това, основната машина винаги преминава през същата последователност от състояния [98]. Възможно е да се прилагат недетерминистични алгоритми, които да работят на детерминистична машина, като например: алгоритъм, който разчита на случайно избрани числа. Като цяло, за такива случайни избори се използва генератор на псевдослучайни числа, но се използва и някакъв външен физически процес, като например последните цифри на времето, дадено от компютърния часовник [98]. Генераторът на псевдослучайни числа е детерминистичен алгоритъм, който е проектиран да произвежда последователности от числа, които се държат като случайни последователности [98]. Този вид модел не може да се прилага като надежден, защото корозията оказва въздействие, зависещо от случайното развитие на несвързани величини.

13. Стохастичен модел

В теория на вероятностите стохастичен процес (случаен процес) е противоположност на детерминистичен процес. В този метод свързаните с него области от стохастични (случайни) величини са процес в математически обект (обекта на изследване), който обикновено се определя като съвкупност от случайни променливи [52, 58, 59, 60]. Исторически, случайните променливи са свързани или индексирани от набор от числа, които обикновено се разглеждат като точки във времето, давайки интерпретация на стохастичен процес, представящ числени стойности на някаква система, която се променя с времето [52, 58, 59, 60]. Стохастичните процеси се използват широко като математически модели на системи и явления, които изглеждат случайни. Те имат приложения в много дисциплини, включително науки като биология, химия, екология, неврология, и физика, както и в технологични и инженерни области като обработка на изображения, обработка на сигнали, информационна теория, компютърни науки, криптография и други [52, 58, 59, 60]. Термините стохастичен процес и случаен процес се използват взаимозаменяемо, често без специфично математическо пространство за множеството, което индексира случайните променливи [52, 59, 60]. Но, често тези два термина се използват, когато случайните променливи се индексират по цели числа или интервал от реалната линия. Ако случайните променливи се индексират от декартовата равнина или някакво по-високомерно евклидово пространство, тогава събирането на случайни променливи обикновено се нарича случайно поле [52, 59, 60]. Въз основа на техните математически свойства, стохастичните процеси могат да бъдат

разделени на различни категории, които включват случайни разходки, мартингали, марковски процеси, процеси на Леви, гаусови процеси, случайни полета, процеси на обновяване и процеси на разклоняване [52, 59, 60]. Изследването на стохастичните процеси използва математически знания и техники от вероятност, смятане, линейна алгебра, теория на множествата и топология, както и клонове на математическия анализ като реалния анализ, теорията на мерките, анализа на Фурие, и функционален анализ [52, 59, 60]. Вместо да се работи само с една възможна реализация на процеса във времето (като в случай например на решенията на обикновено диференциално уравнение), в стохастичния (случаен процес) има една неопределеност за неговото бъдещо развитие (еволюция), описано от вероятностни разпределения [52, 58, 59, 60]. Това означава, че дори ако началното условие (или начална точка) е известна, има много възможности за това как процесът може да се развие, като някои реализации може да са по-вероятни, отколкото други [52, 59, 60]. За корозирала стомана, изучаването на определени параметри предполага, че те са независими случайни величини [89], което обуславя, че моделът за обработка на данните следва да е стохастичният метод.

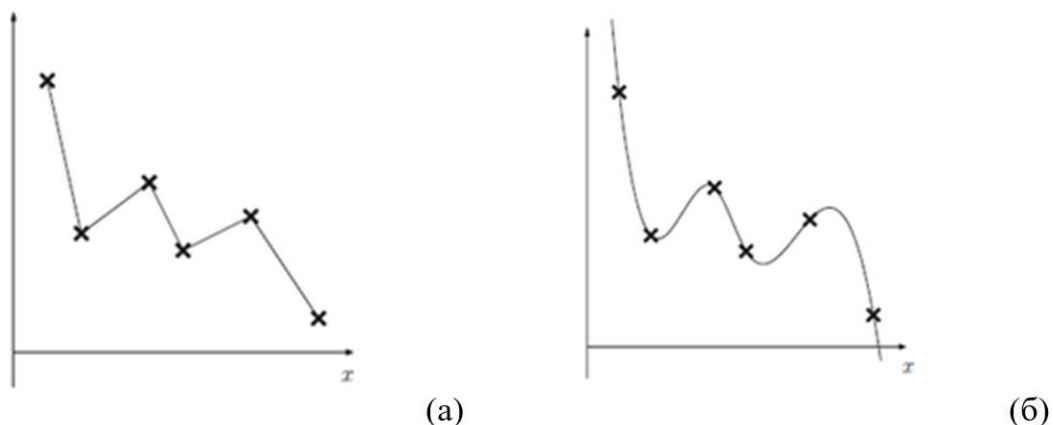
14. Полипонална апроксимация

В математиката теорията на апроксимацията се занимава с това как най-добре могат да се апроксимират функциите с по-прости функции и с количествено характеризирани на въведените от тях грешки [64, 80, 85, 86]. Отчитайки, че това което се разбира под най-добро и по-просто, ще зависи от приложението. Тясно свързана е темата с апроксимацията на функциите чрез обобщени редове на Фурие, т.е. приближения, базирани на сумиране на поредица от термини, базирани на ортогонални полиноми [64, 80, 85, 86]. Един от проблемите, които представляват особен интерес, е апроксимирането на функция, като се използват операции, с цел сближаването да бъде възможно най-близко до действителната функция, обикновено с точност, близка до тази на аритметиката с плаваща запетая на основния параметър [64, 80, 85, 86]. Това се постига чрез използване на полином с висока степен и / или стесняване на областта, над която полиномът трябва да приближи функцията [64, 80, 85, 86]. Полиномите са функции с полезни свойства. Тяхната сравнително проста форма ги прави идеални, за да бъдат използвани като апроксимации за по-сложни функции [64, 80, 85, 86].

Полиномът в $f(x)$ е функция на формата [64, 80, 85, 86] (фор. 1.5):

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + \dots + a_n \cdot x^n \quad (1.5)$$

Ако разглеждаме случаите, в които вместо да знаем израз за функцията, имаме стойности на точки [64, 80, 85, 86]. Достатъчно е да се намери полином, който минава през тези точки, и искаме полиномът да премине точно през дадените данни, т.е. интерполиращ полином [64, 80, 85, 86]. Нека да приемем, че знаем (или избираме да пробваме) функция $f(x)$ точно в няколко точки и която искаме за да се сближи поведението на функцията между тези точки [64, 80, 85, 86]. В най-простата си форма това е еквивалентно на линейно сглобяване (фиг. 3.21(а)), но често е по-точно е да се търси крива, която няма “ъгли” в нея (фиг. 3.21(б)) [64, 80, 85, 86].



Фигура 1.3 (а) Линеино свързване на принципа „точка-по-точка“ [64, 80]; (б) Свързване „точка-по-точка“ чрез функция (няма „ъгли“) [64, 80]

В случай, че имаме експериментални опитни данни след провеждане на експеримент следва да се направи линия (функция), като се премине възможно най-близо и точно до данните, които са получени [64, 80, 85, 86].

ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА I

1. В направения литературен преглед, няма информация за изследвания свързани с прогнозирането на влиянието на корозията върху механичните свойства на стомана S355JR. Цитираните източници показват различни подходи и многообразието в търсене на конкретни решения върху влиянието, което оказва корозията върху механичните свойства, но липсват научни съобщения за прилагането на изчислителни модели за прогнозиране на корозионното влияние върху стоманените конструктивни елементи.

2. Извършени са голям брой изследвания върху корозията. На практика не са изследвани комплексно характеристиките за стомана S355JR с оглед нейната утилизация и възможности за нейното практическо приложение.

3. Съществуват литературни данни за анализ на корозирала стомана, но не бяха намерени анализи с отчитане влиянието и възможностите за утилизация на строителна стомана с корозия.

4. Няма разработена система за ускорена корозия, която да включва теоретично и практично развитие на стомана S355JR

5. Отсъстват научни съобщения за промяната и прогнозирането във времето и какво въздействие оказва това върху механичните свойства на корозирани строителни стоманени елементи. Не са проведени изследвания за възможностите за утилизация и прогнозиране на корозията за стомана S355JR, която е конструктивна стомана.

6. Няма съобщения за сравнения на корозията с реалните механични изпитвания, липсва база данни за корозията, разработвани са множество методи и стимулационни модели за определяне на влиянието на корозията върху конструктивни елементи, но те изискват неоправдани разходи от време и финансиране за тяхното реализиране, и ниско ниво на достоверност на резултатите за различни видове стомани и конкретно за стомана S355JR.

Глава II. Материали и методи

1. Материали

- Стомана S355JR, съгласно стандарт EN 10025:1:2004 „Горещовалцувани продукти от конструкционни стомани“ от „ТисенКруп - Юпитер Стомана“ ООД (България)

- Разтвор на 5% натриев хлорид – изготвя се като в дестилирана вода се поставя 58,4 g/l натриев хлорид (NaCl), разбърква се до пълното разтваряне на натриев хлорид, готовият разтвор е произведен в съответствие със стандартите ISO 3696 / BS3978, като се използват соли с висока чистота, дейонизирана вода, сертифицирани разтворители, аналитични везни и стъклария от клас А в контролирана среда, контролирани със сертифицирани термометри.



Фигура 2.1 Материали които се използват – (а) Разтвор на 5% натриев хлорид; (б) Сух спирт; (в) Дестилирана вода; (г) Солна киселина.

- Дестилирана вода - вода, която е пречистена от всички примеси чрез процеса на дестилация. Производство на фирма „Ароматик“ ООД (България)

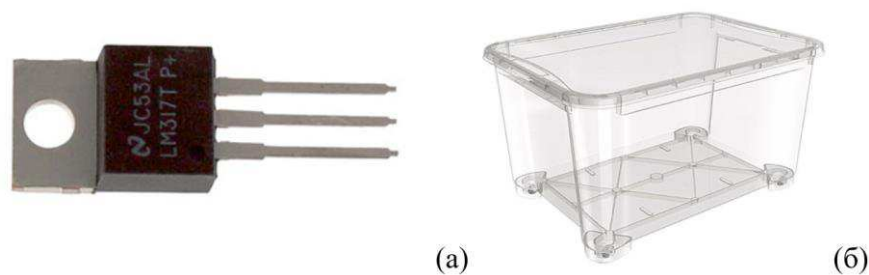
- Солна киселина – обикновено се произвежда при реакцията на водород с хлор, след което хлороводородът се разтваря във вода, а другият начин е реакцията на готварска сол със серен диоксид, стандарт ISO 905:1976.

- Сух спирт (хексаметилентетрамин) - е химично вещество, получено при реакцията между 6 мола формалдехид и 4 мола амоняк, производство на фирма „Химакс фарма“ ЕООД (България)

- Електрически ток – 220V , 50 Hz

- Стабилизатори на ток модел LM317 – производство на фирма STMicroelectronics (Швейцария)

- Пластмасова кутия – 145 литра, изработена от полимерни материали. Производство на фирма Regalux GmbH (Германия)



Фигура 2.2 Помощно оборудване – (а) Стабилизатор на ток LM317; (б) Пластмасова кутия - 145 литра

2. Методики

- Електрохимична ускорена корозия – пробните тела се поставят в кутия (вана) с разтвор от 5% натриев хлорид, като са свързани със стабилизатора на ток по отделно и представляват анод. През тях протича прав ток (100 mA, 200 mA, 300 mA, 400 mA и 600 mA) за период от 72 часа, след което се изваждат, почистват, измерва се теглото им, промяната на напречното сечение (диаметъра) в рамките на 24 часа.

- Химичен метод за почистване на корозионни продукти (ръжда) съгласно стандарт БДС ISO 8407:2014. Начинът на действие е: корозиралото пробно тяло се потапя в стъклен цилиндър с разтвора, окачено на медна жица и престоява в разтвора 10 минути. След което се изважда и при необходимост се почиства с четка.

- Стохастичен метод - В началото на 30-те години Александър Хинчин дава първата математическа дефиниция на стохастичния процес като семейство от случайни променливи, индексирани от реалната линия [52, 59, 60]. При експериментите, представлява математически обект, който се определя като колекция от случайни променливи.

- Полипонална апроксимация - В математиката, теорията на апроксимацията се занимава с това как най-добре могат да се апроксимират функциите с по-прости функции и с количествено характеризиране на въведените от тях грешки [80]. Тясно свързана тема е апроксимацията на функциите чрез обобщени редове на Фурие, т.е. приближени, базирани на сумиране на поредица от термини, базирани на ортогонални полиноми.

- Механични изпитвания на опън съгласно стандарт БДС EN ISO 6892-1:2016 с универсална машина за изпитване на опън модел ВЕТА200-7/6x14 (фиг.2.3(б)) на фирма Messphysik Materials Testing GmbH (Германия).

- Сканираща електрона микроскопия с използването на SEM модел JSM 5510 (фиг. 2.3(а)) на фирма JEOL Ltd. (Япония).

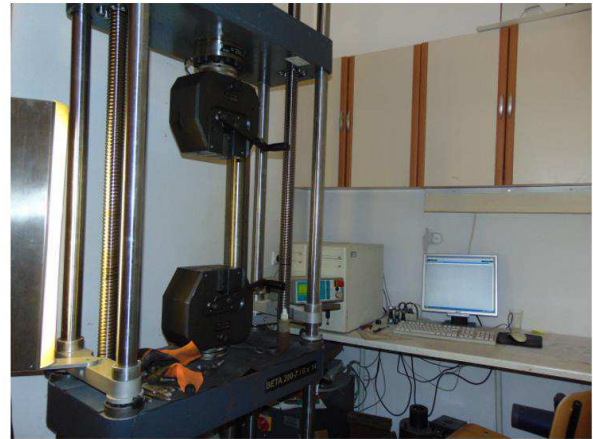
- Определяне на химичния състав чрез използване на спектрално устройство “Spectrotest – ТХС02; S/N 4S0007; analyzer: Fe-01MO; standard sample: RH 31/12,

S3-2; type of probe: SL75060798 на фирма SPECTRO Analytical Instruments GmbH (Германия).

- Определяне на елементен състав чрез използване на оптичен емисионен спектрометър SPAS-02 на фирма Active Co. Ltd. (Русия).



(a)



(б)

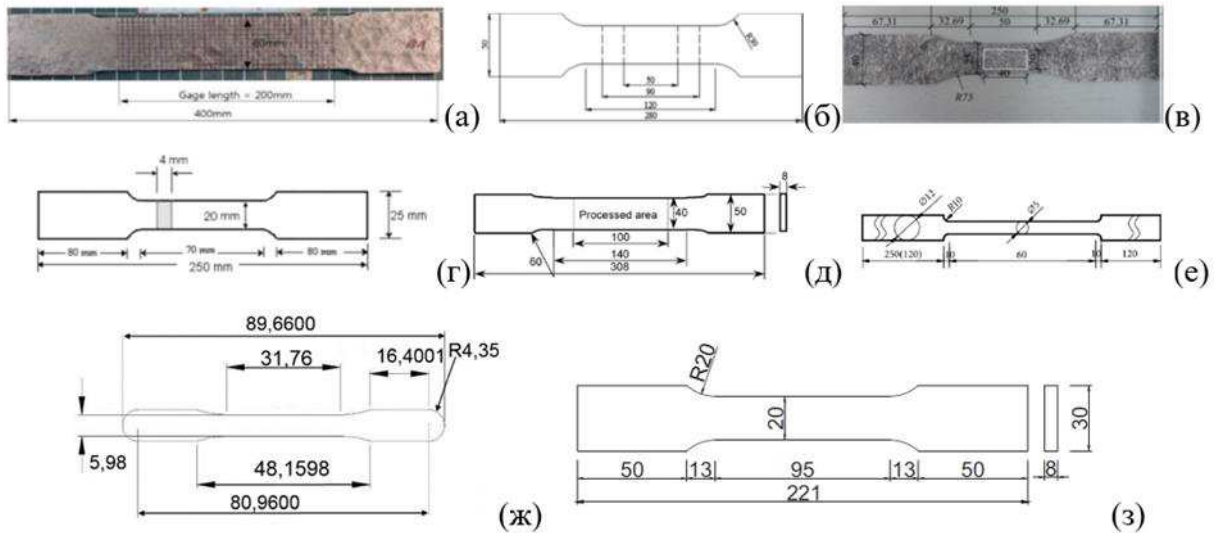
Фигура 2.3 (а) Сканираща електрона микроскопия модел JSM 5510; (б)
Машина за изпитване на опън модел ВЕТА200-7/6x14

Глава III. Експериментална част

III.A. Пробни тела

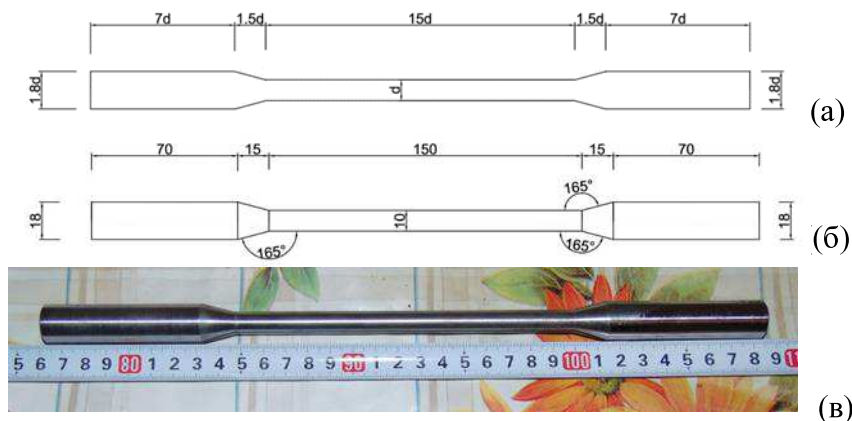
1. Основни положения

Изборът на стоманено пробно тяло е сложна задача и зависи от стандарта по който ще се изпитва, вид на изпитването, напречното сечение на пробното тяло и т.н. Изследователите [8, 12, 29, 57, 62, 65, 90, 95] използват най-различни по вид и форма пробни тела (фиг. 3.1).



фиг. 3.1 Размери и вид на пробните тела
– (а) [57]; (б) [62]; (в) [29]; (г) [8]; (д) [12]; (е) [90]; (ж) [65]; (з) [95]

Използвайки теория по съпротивление на материалите, се препоръчва паралелната дължина на пробното тяло да бъде $15d$ [75, 76], като в [76] твърдят, че именно при тази дължина се избягва влиянието на концентрацията на напреженията в зоните с променливо сечение. Стандартът за изпитване на опън е ISO 6892-1:2016, отбелязан с минималната паралелна дължина на пробното тяло, но не и максималната такава (фиг. 3.2):



Фигура 3.2 (а) Принципни съотношения на размерите на пробно тяло във функция на диаметър в паралелната дължина [49]; (б) Размери на пробното тяло [81, 91, 107-109]; (в) Снимка на пробно тяло съгласно размерите от стомана S355JR [49]

Съгласно стандарт EN 10025:1:2004 „Горещовалцувани продукти от конструкционни стомани“, са дефинирани видовете стомани, които могат да се използват като конструктивни. Съгласно действащият стандарт, химичният състав на стомана S355JR е посочен в табл. 3.1, а границата на провлачване е минимум $f_{p,0.2} = 355$ МПа.

Таблица 3.1 Химичен състав на стомана S355JR, съгласно стандарт EN 10025:1:2004

химичен елемент	С въглерод	Mn манган	Si силиций	P фосфор	S сяра	N азот	Cu мед	CEV други
макс.процентно съдържание, [%]	0.240	1.600	0.550	0.040	0.040	0.012	0.550	0.450

Изработени са 125 броя пробни тела от стомана S355JR. От тях, 116 броя пробни тела са корозирани чрез метода за ускорена корозия, 8 броя пробни тела са изпитани на опън без корозия и 1 пробно тяло без корозия е запазено като контролно. Преди да бъдат подложени на ускорената корозия на всяко тяло му е измерено теглото, с везна KERN, модел РМJ 600 – 3М, с точност 0,001 грама (фиг. 3.3)

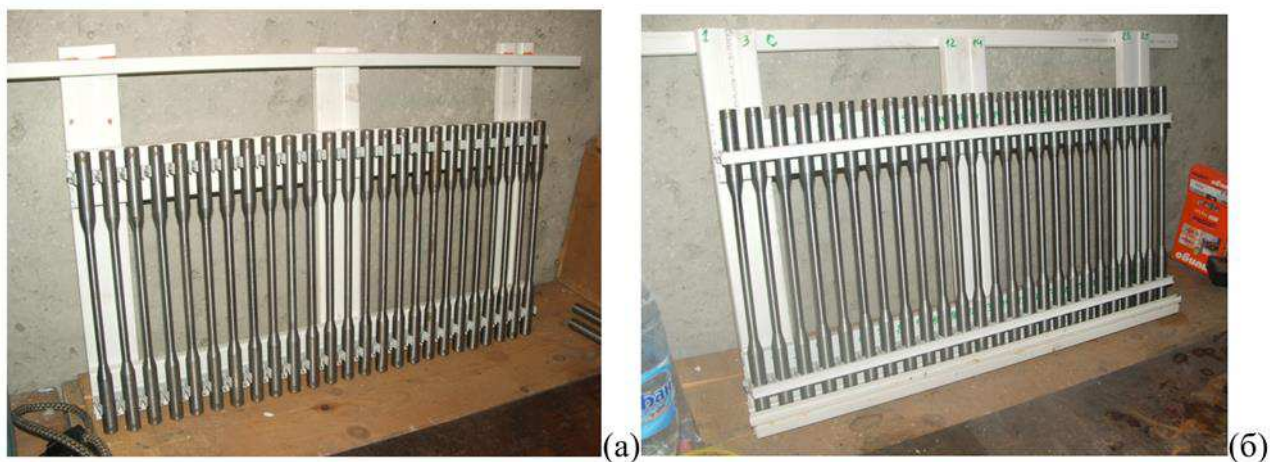


Фигура 3.3 Момент от първоначално замерване на пробни тела

Върху пробно тяло е с шампован номер в двата края, така, че то е еднозначно определено. Разделени в 5 групи за корозирание, при стойности на тока – 100 mA, 200 mA, 300 mA, 400 mA и 600 mA. Броят на всяка група е както следва (таблица 3.2):

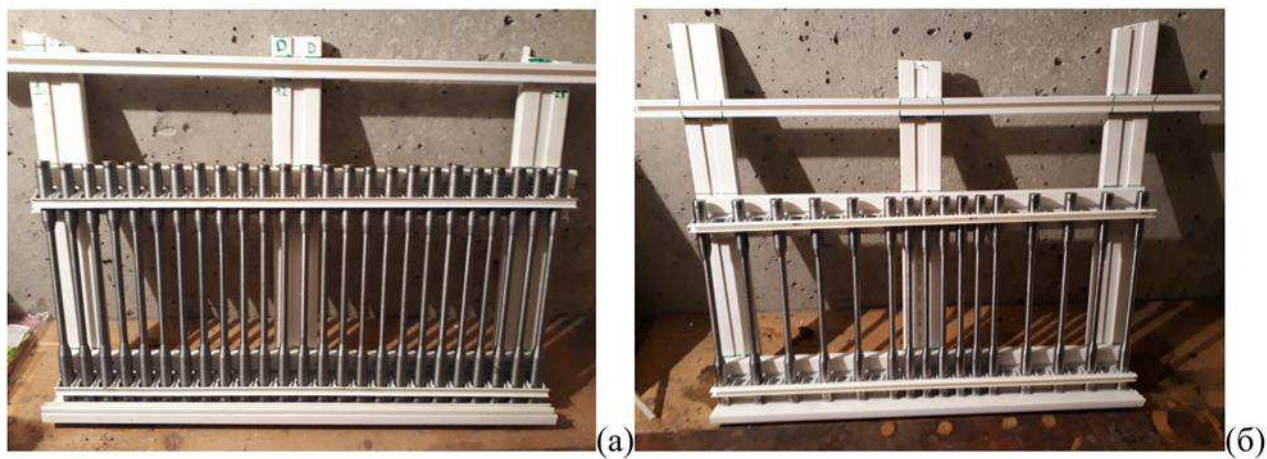
Таблица 3.2 Брой пробни тела във всяка група и тока който се използва

група	I	II	III	IV	V
ток [mA]	100	200	300	400	600
брой пробни тела	25	25	25	25	16



Фигура 3.4 Пробни тела в съответните матрици (а) Група I; (б) Група III;

За прилагане на метода на ускорена корозия, съгласно схемата, са изработени 5 броя матрици с капацитет 25 броя пробни тела (фиг. 3.4 и фиг. 3.5). Всяка група се слага в съответната матрица, и след това във вана с 5% NaCl разтвор [49, 91] и се подключва към съответната платка и/или (когато е необходимо) съответното успоредно свързване на стабилизаторите, които предварително са настроени с необходимия ток.



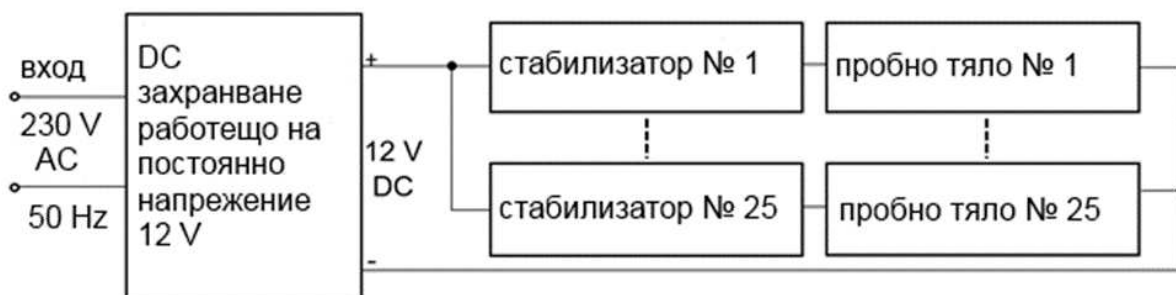
Фигура 3.5 Пробни тела в съответните матрици (а) Група IV; (б) Група V

2. Електрохимична ускорена корозия

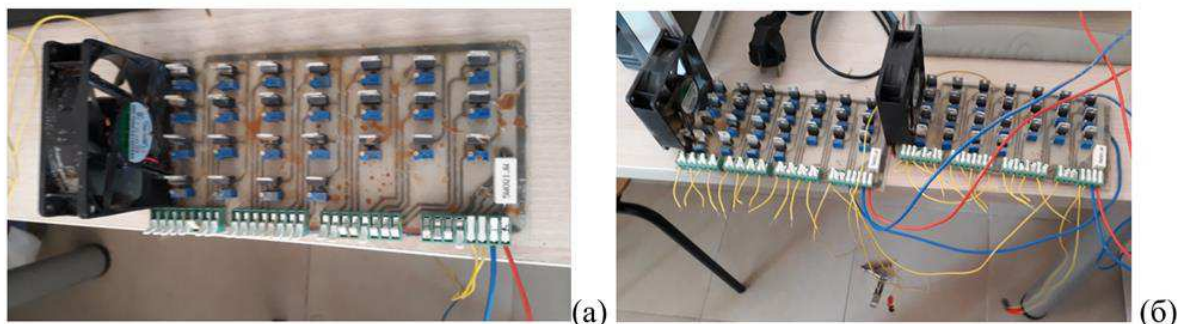
Избран е електрохимичен метод за получаване на ускорена корозия. В процеса на загуба на материал се изменя електрическото съпротивление на пробното тяло [91]. Изменя се химическия състав на електролита, респективно неговото електрическо съпротивление [91]. От формулата на Фарадей следва, че загубата на маса вследствие на корозията е право пропорционална на протичащия ток през пробното тяло [91]. Следователно ако се използва потенциостатичния метод ще е необходима периодична корекция на напрежението, за да се поддържа константна скорост на загуба на материал [91]. Стойността на тока зависи от съпротивлението на пробното тяло и съпротивлението на електролита. Токът през пробното тяло може да се определи от закона на Ом [91, 107-109] (фор.3.1):

$$I_{\text{specimen}} = \frac{V_{\text{A-K}}}{R_{\text{specimen}} + R_{\text{electrolyte}}} \quad (3.1)$$

където I_{specimen} – електрически ток, протичащ през пробното тяло, R_{specimen} – електрическо съпротивление на пробното тяло, $R_{\text{electrolyte}}$ – електрическо съпротивление на електролита, $V_{\text{A-K}}$ – напрежение между анод и катод [91]. За настоящето изследване е разработена система за електрохимична корозия, използваща галваностатичен метод, която е приложима и при изследването на други видове метални елементи, използвани в строителството [91]. Системата представлява 25-канален регулируем стабилизатор на ток [91]. Блокова схема на разработената система е показана на фиг. 3.7 и външен вид на фиг.3.8

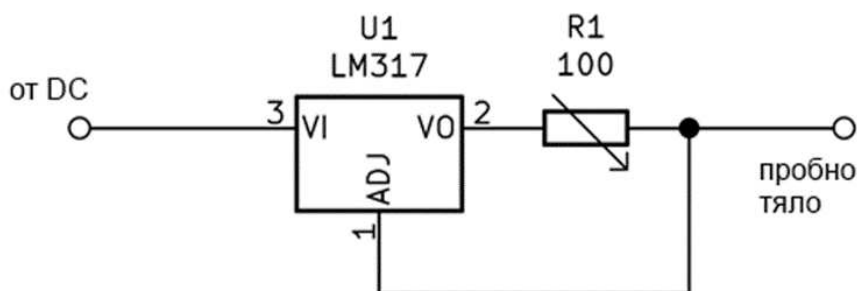


Фигура 3.7 Блок диаграма на разработената система за електрохимична корозия [49]



Фигура 3.8 (а) Единична система за електрохимична корозия чрез ток преди свързване с образците, капацитет от 16 mA до 200 mA; (б) Двойна система за електрохимична корозия чрез ток преди свързване с образците, капацитет от 200 mA до 400 mA [108]

За реализацията на отделните канали е използван интегралният стабилизатор LM317, работещ в режим на стабилен ток [91]. Принципната схема на един канал е показана на фиг. 3.9 [97].



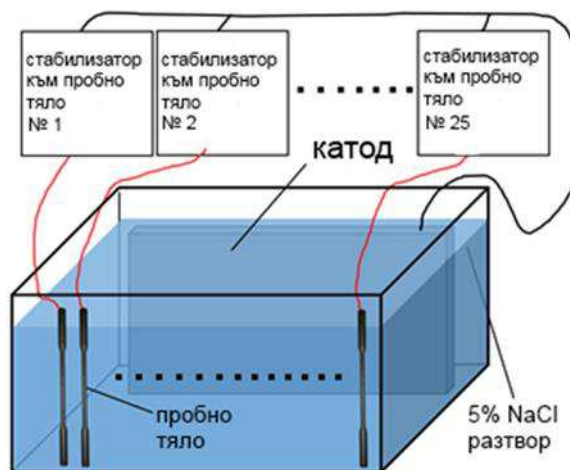
Фигура 3.9 Схема на един канал [91]

Изходният ток на всеки канал може да се регулира плавно в границите от 16 mA до 200 mA при избраната стойност за R1 от 100 Ω [91]. Използваната интегрална схема LM317 има вградена топлинна защита, при която се ограничава отделяната мощност [97]. Това означава, че можем да избираме различен ток – 100 mA, 200 mA, 300 mA, 400 mA и 600 mA в зависимост от начина им на свързване и настройките на генераторите. Процента на загуба на материал за едно денонощие, използвайки формулата на Фарадей, за всеки тип различен ток е отразен в табл. 3.5.

Таблица 3.5 Процентна загуба на материал за едно денонощие

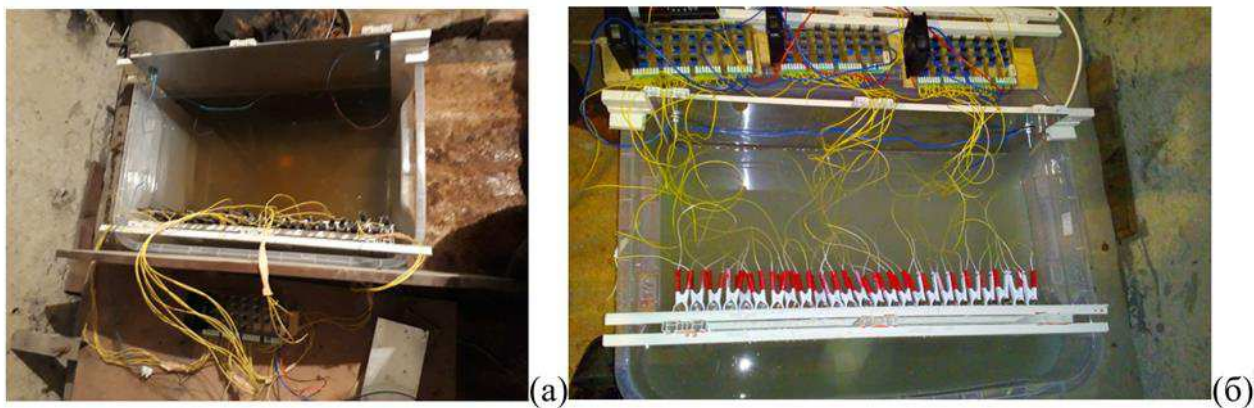
ток [mA]	100	200	300	400	600
загуба на маса – η [%]	0.54	1.07	1.62	2.14	3.21

На фиг. 3.10 е показана принципна схема на разработения метод за ускорена корозия. За да се реализира избраният ток от 300 mA, всеки образец за изпитване се свързва към три паралелно свързани канала с определен стабилизиращ ток за всеки канал от 100 mA, за да се избегне риска от ограничаване на тока поради вградената термична защита, активирана в случай на прегряване [91]. Евентуално прегряване и последващото намаляване на тока ще намалява скоростта на корозия за образците за изпитване.

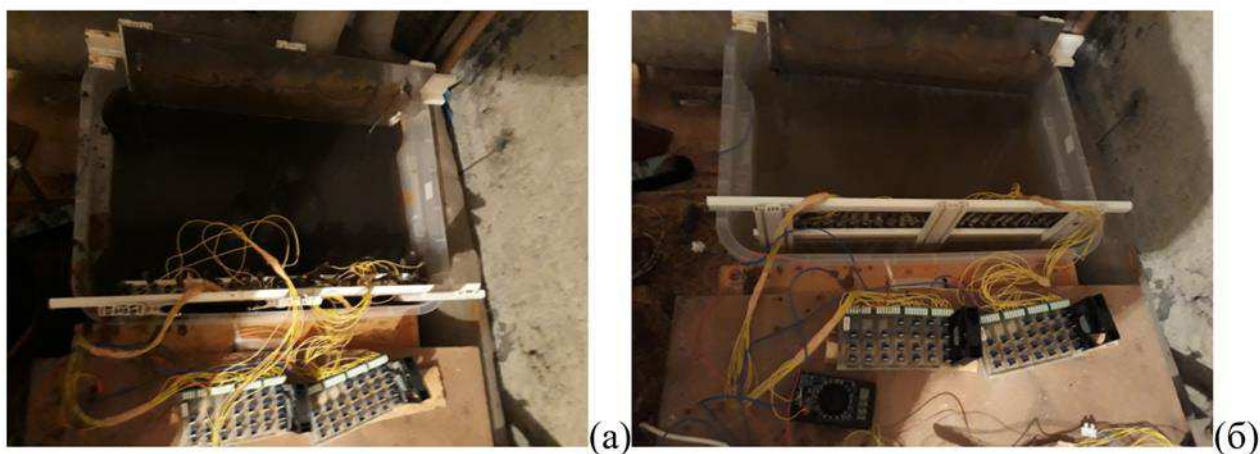


Фигура 3.10 Схема на разработения метод за ускорена корозия [49, 107-109]

След като бъдат разпределени пробните тела в матрици, те са подложени на електрохимична корозия, по данните в таблица 3.2 – фиг. 3.11 и фиг.3.12 (моменти от електрохимичната корозия).



Фигура 3.11 Моменти от ускорената електрохимична корозия (а) Група II [49];
(б) Група III [91];



Фигура 3.12 Моменти от ускорената електрохимична корозия
(а) Група V; (б) Група IV

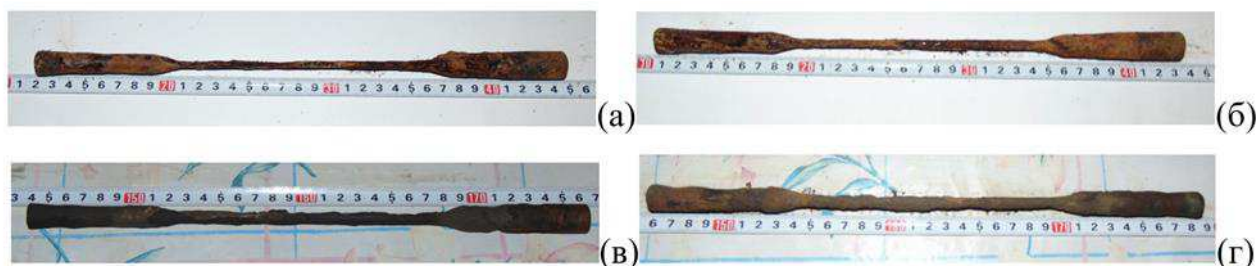
Графика на следене на корозионното развитие е дадена на фиг. 3.13. Пробните тела се подложени на електрохимична ускорена корозия за период от 72 часа.



Фигура 3.13 График на следене на корозионното развитие в пробните тела

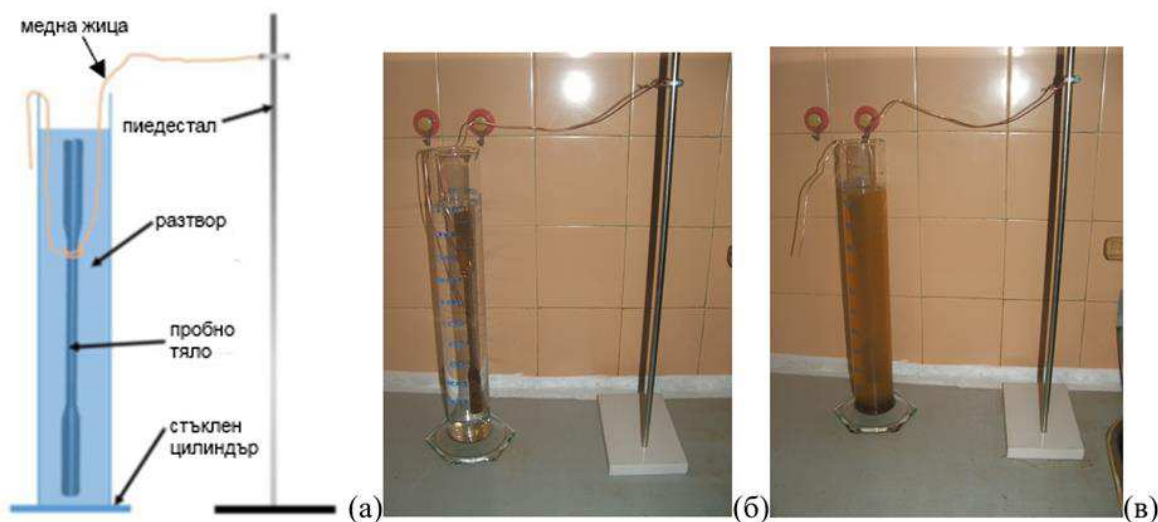


Фигура 3.14 Пробни тела след изваждане от електрохимичната корозия

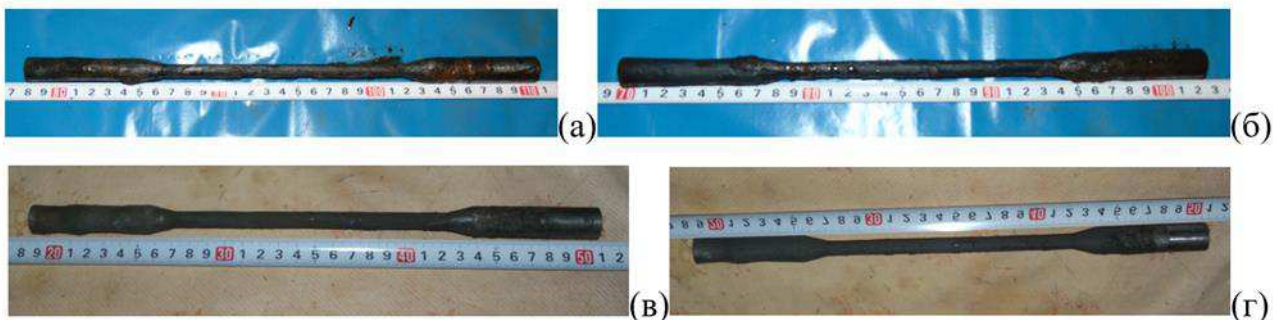


Фигура 3.15 Пробни тела преди почистване на корозионните продукти;(б) [91]

Почистването на пробните тела от стомана S355JR след електрохимичната ускорена корозия, се извършва чрез химичен метод, съгласно стандарт БДС ISO 8407:2014, като от изложените начини в стандарта, най-подходящ е метод с означение „С.3.5“ – 10 минути в разтвор от 500 мл. HCl (солна киселина), 1000 мл dH₂O (дестилирана вода) и 3.50 грама (CH₄)₆N₄ (хексаметилентетрамин) [49, 81, 91, 107]. Методът също е упоменат като приложим метод и в стандарт ISO 9226 (приложение А). На фиг. 3.16 е показан момент от отстраняването на корозионни продукти с принципна схема. На фиг. 3.17 са показани пробни тела след отстраняването на корозионните продукти.

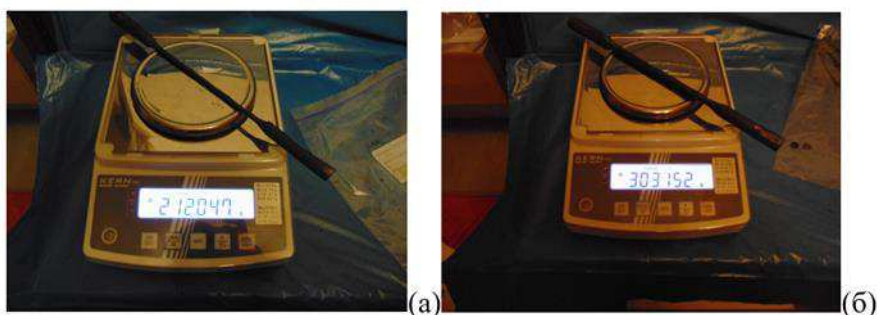


Фигура 3.16 Моменти от отстраняването на корозионни продукти; (а) Принципна схема за почистване на пробно тяло [91,108]; (б) В началото [91]; (в) В края [108]



Фигура 3.17 Пробни тела след почистване на корозионните продукти; (б) [81]

След като се установи, че даденото пробно тяло е достигнало степента си на корозиране, се извършва замерване на неговото тегло (за установяване на загубата на маса) и на неговият диаметър в паралелната дължина (за установяване на загубата на сечение). На фиг. 3.18 са показани моменти от замерване на теглото, а на фиг. 3.19 моменти от замерване на диаметъра.

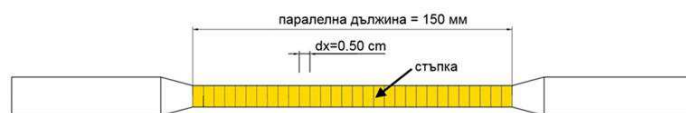


Фигура 3.18 Измерване на пробни тела след ускорената корозия; (б) [81]



Фигура 3.19 Измерване на диаметъра на корозиралите пробни тела [109]

При извършеното замерване, се установи, че загубата на маса не е равномерна, а загубата на сечение също е неравномерна. Поради тази причина е извършвано допълнително замерване през стъпка (dx) 0,50 см в участъка на паралелната дължина на пробното тяло (фиг.3.20), за да се установи как се е променило напречното сечение.



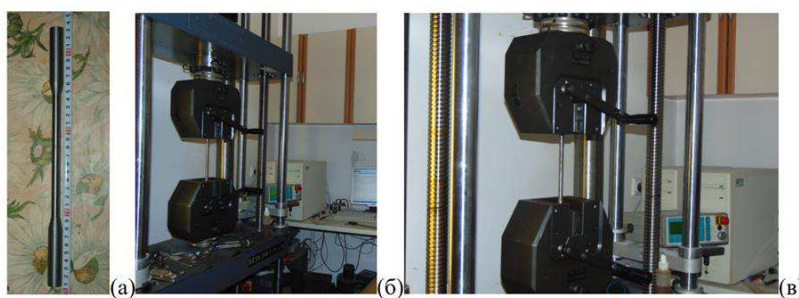
Фигура 3.20 Начин на замерване на промяната на диаметъра в паралелната дължина

Технологията на производство на строителната стомана, определя нейните механични показатели, химичния състав, якостните параметри и други [89]. Величините имат разпределение, което съвпада със закона за нормалното разпределение на вероятностите [89]. От числовата ос на механичните показатели е избрана стойност, която има надеждност най-малко 95% и е фиксирана като съответната якостна характеристика на стоманата. Когато тази стойност бъде разделена на коефициент на сигурност, в зависимост от нормативните изисквания, се установяват и нейните изчислителни стойности [89]. С появяването на корозия по стоманата започва мигновеното ѝ въздействие, което най-общо се изразява в: намаляване на геометричните характеристики, промяна в якостните показатели, повърхностни дефекти и структурни промени [89]. При извършването на експерименти се използват пробни тела, които отговарят на заложените теоретични и нормативни изисквания [89]. Едни от тези изисквания са еднородност на материала и липса на повърхностни дефекти. При пробните тела с корозия, тези изисквания практически не могат да бъдат изпълнени [89]. В резултат на това се получават емпирични данни, за които следва да се приложи математически модел за обработка и получаване на краен резултат. Този резултат, трябва да бъде с достатъчна надеждност за да се използва при изследователска работа и да има практическа значимост [89]. При избора на метод за обработка на данни, следва да се търси връзка с математическите вероятностни модели с цел осигуряване на практическа надеждност на получените резултати [89]. От изложеното, може да се класифицират две основни направления – стохастично и средно-аритметично.

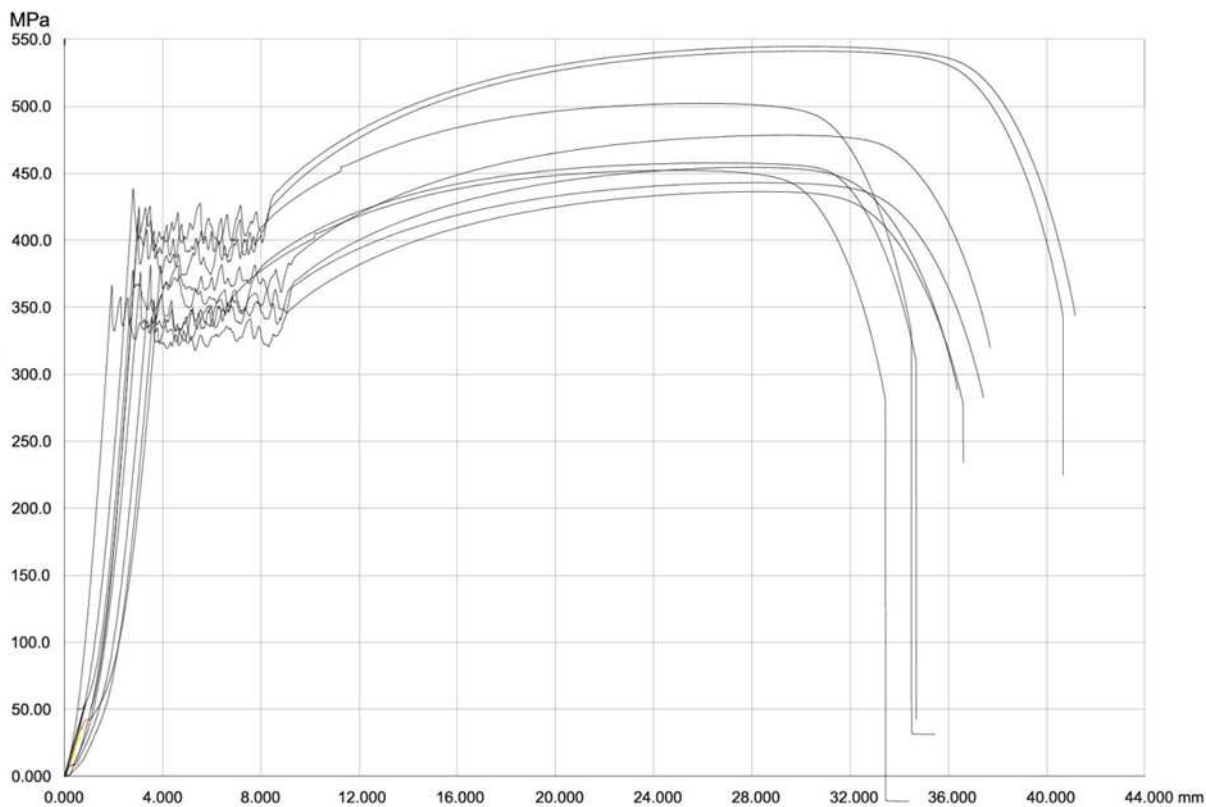
III.B. Изследване на механични свойства

1. Изследване на пробни тела без корозия

За да се установи влиянието на корозията върху механичните свойства на стоманата, следва да се извърши сравнение между резултати получени вследствие на корозията и такива с некорозирал материал. За целта са изпитани на опън осем броя пробни тела без корозия (фиг. 3.22) съгласно стандарт БДС EN ISO 6892-1:2016 чрез машина за изпитване на опън MESSPHYSIK model BETA200-7/6x14. получени, работните диаграми на материала (фиг. 3.23) са обработени чрез стохастичния метод и средно-аритметичния метод. Получена е окончателната (идеализирана) диаграма, чиито стойности ще служат за основа при извършването на сравнение. За да може на практика да бъдат обработени резултатите от получените работни диаграми, на изпитваните пробни тела се прилага стохастичният метод като един начин и средно-аритметичният метод като втори начин.

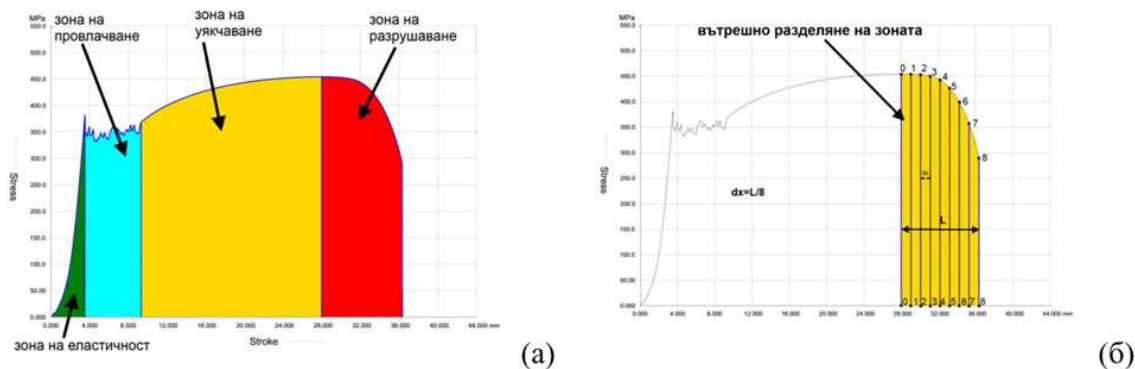


Фигура 3.22 (а) Пробно тяло без корозия [81]; (б) Моменти от изпитването на опън; (в) Момент от изпитването на опън;

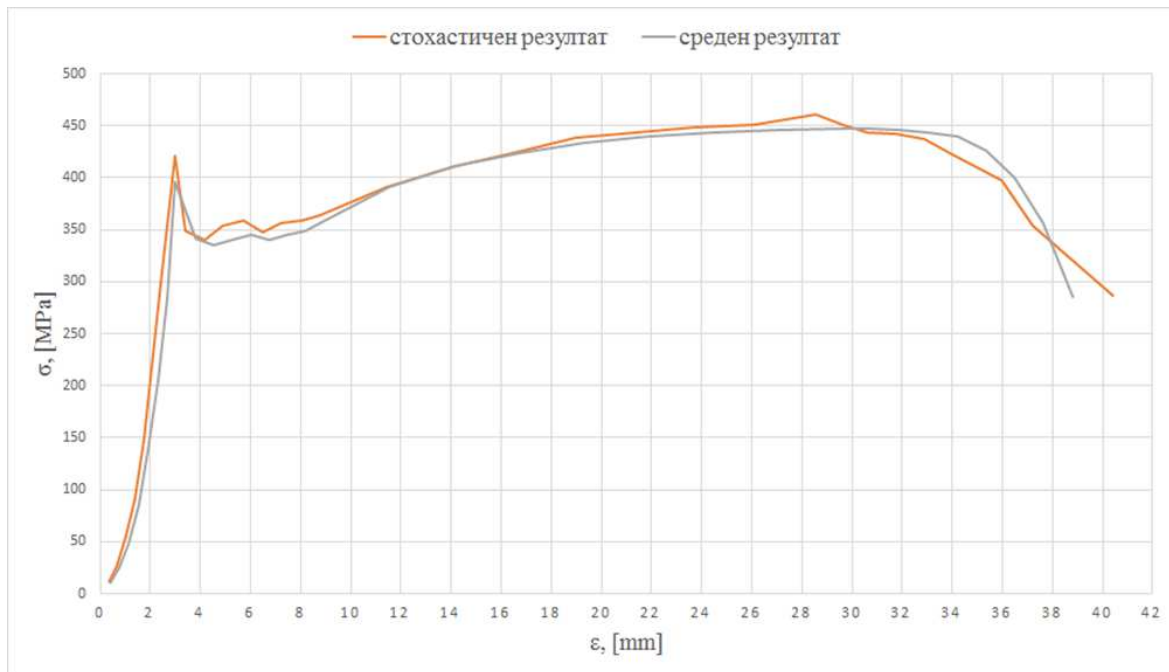


Фигура 3.23 Работни диаграми на стомана S355JR без корозия – 8 броя

Работната диаграма на материала се разделя на четири основни зони – зона на еластичност, зона на провлачване, зона на уякчаване и зона на разрушаване. Всяка една от тези зони се разделя на осем равни части и се взимат стойностите – на съответното напрежение със съответната деформация (фиг. 3.24).



Фигура 3.24 Начин на обработка на работни диаграми; (а) Видове зони; (б) Разделяне на зона [49]

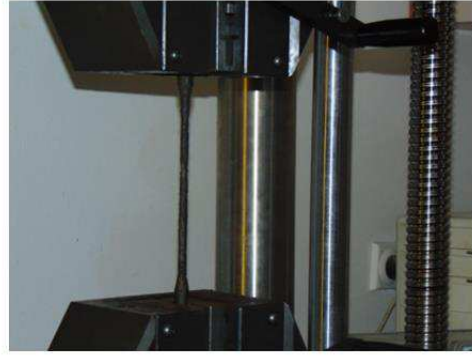
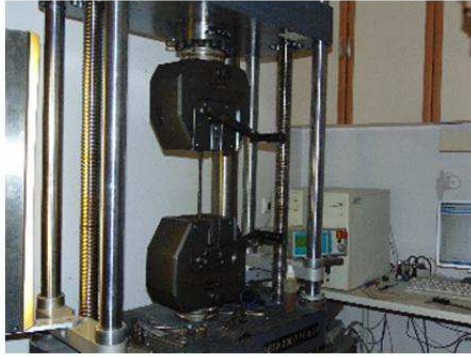


Фигура 3.25 Работна диаграма на стомана S355JR, след обработка по стохастичния и средно-аритметичния метод, които ще служат за основа на извършваното сравнение.

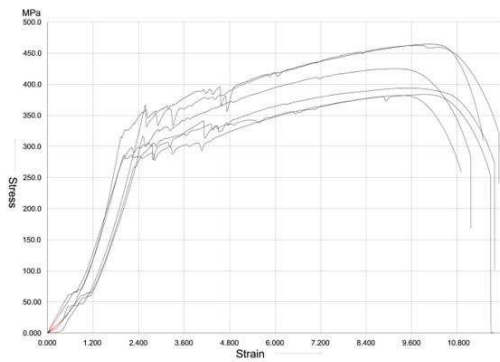
Обработката се налага, с оглед обстоятелството, че работните диаграми на стомана S355JR са с различни стойности на напреженията и деформациите. Пробните тела са изработени чрез прилагане на механична обработка, а не отлети директно в матрица от гореща стоманена сплав. Съществуват известни остатъчна механични напрежения, вследствие на механичната изработка на пробните тела със съответните машини. След извършване на съответната обработка се получават следните работни диаграми на стомана S355JR, които ще служат за основа на извършваното сравнение със съответните стойности (фиг. 3.25).

2. Изследване на пробни тела с корозия

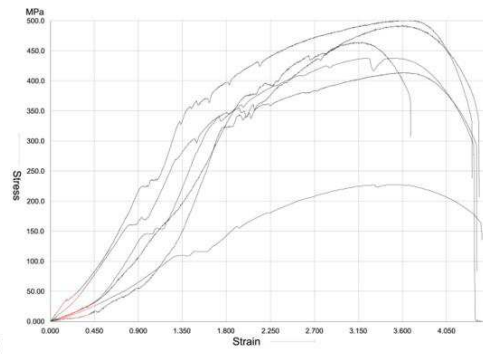
След като пробното тяло е измерено след ускорената корозия, същото се изпитва на опън при стайна температура съгласно стандарт БДС EN ISO 6892-1:2016 и чрез универсална машина за изпитване на опън MESSPHYSIK model BETA200-7/6x14. Изпитванията на опън са показани на фиг. 3.26. В резултат на изпитването са построени работните диаграми. Приложени са стохастичния и средно-аритметичния метод за обработка [49, 91]. Диаграми на опън на корозирала стомана са показани на фиг. 3.27.



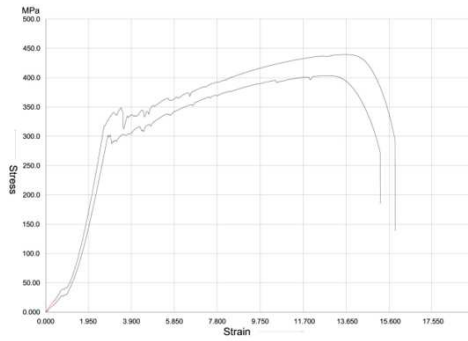
Фигура 3.26 Моменти от изпитването на опън на пробни тела с корозия [108]



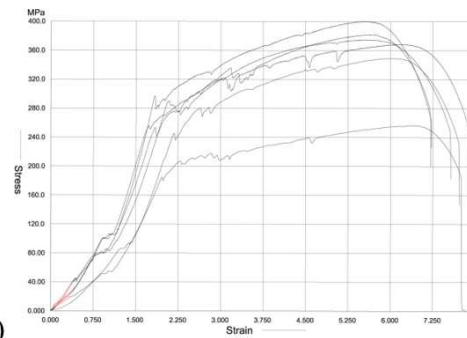
(а)



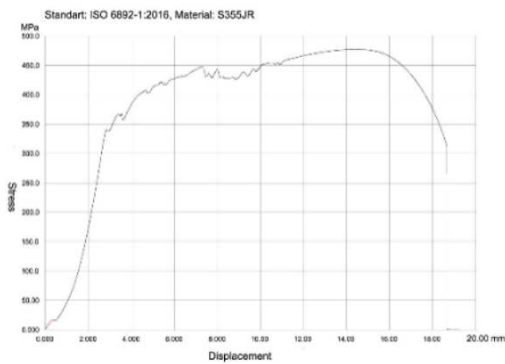
(б)



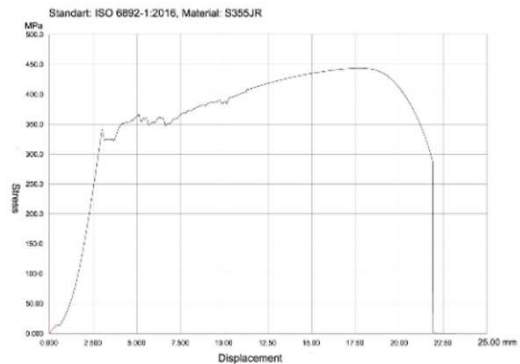
(в)



(г)



(д)



(е)

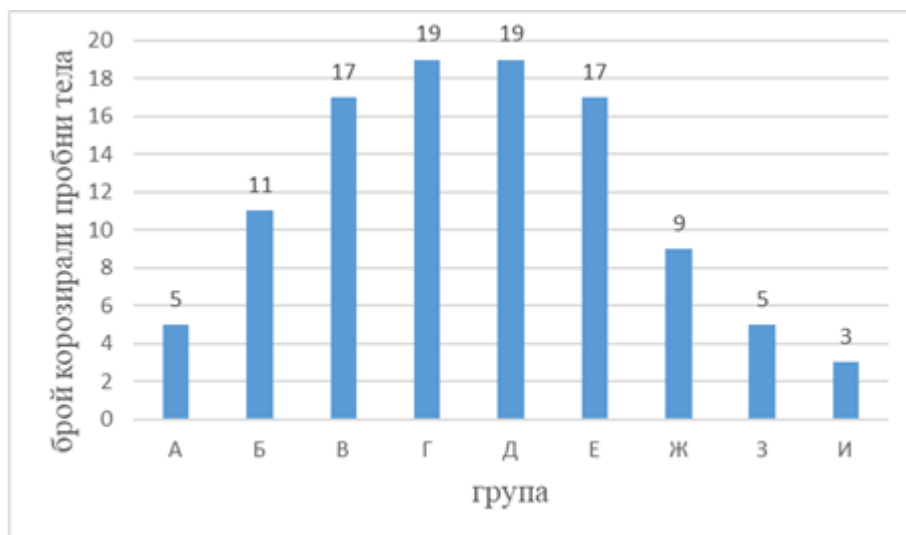
Фигура 3.27 Работни диаграми на пробни тела с корозия след изпитване на опън; (а) [91]; (б) [91]; (в) [91]; (д) [81]; (е) [81]

2.1. Образуване на групи

От получените експериментални резултати, на корозиралите стоманени пробни тела (105 броя), изпитани на опън при стайна температура съгласно стандарт БДС EN ISO 6892-1:2016, след обработка по стохастичния и средно-аритметичния метод и извършване на анализ на резултатите вследствие на ускорената електрохимична корозия, е възможно да се извърши групиране според промяната на диаметъра в паралелната дължина на пробното тяло. Броят на групите и броят на пробните тела попадащи в една група е даден в таблица 3.6 и фиг.3.28.

Таблица 3.6 Сформиране на групите

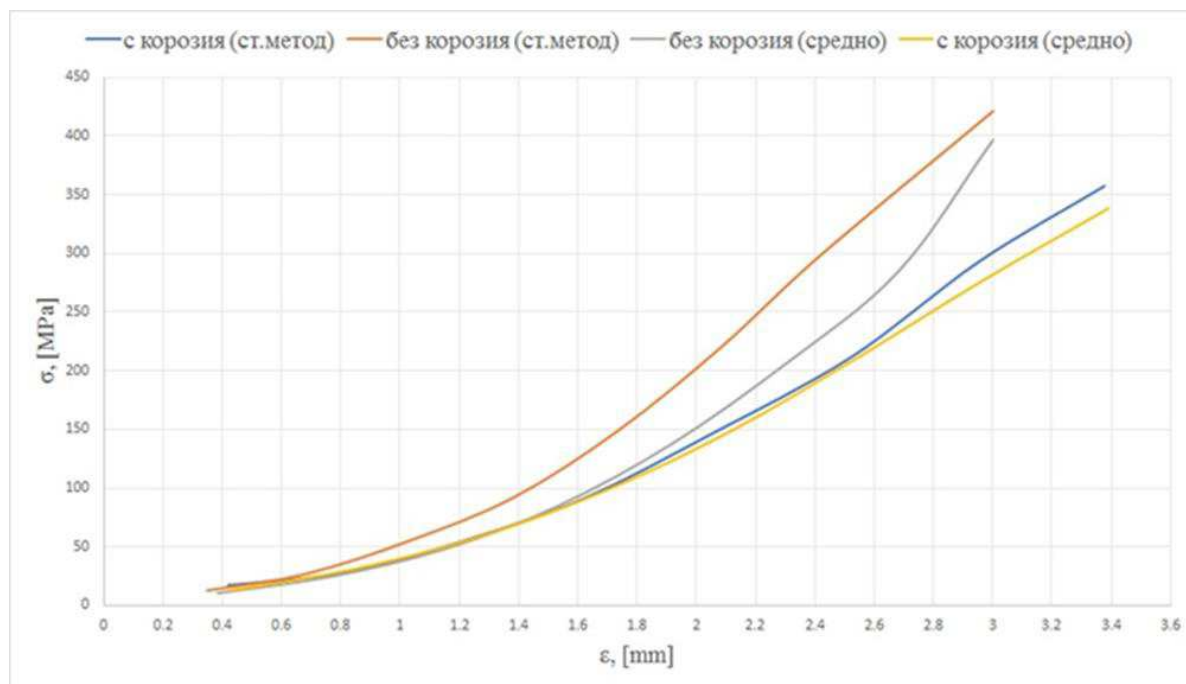
	група А	група Б	група В	група Г	група Д	група Е	група Ж	група З	група И
брой	5	11	17	19	19	17	9	5	3
D [mm]	9.00 - 10.00	8.00 - 9.00	7.00 - 8.00	6.00 - 7.00	5.00 - 6.00	4.00 - 5.00	3.00 - 4.00	2.00 - 3.00	1.00 - 2.00



Фигура 3.28 Разпределение на броя пробни тела попадащи в съответната група, данни от табл.3.6

Група А се състои се от пет броя корозирали стоманени пробни тела с диаметър вариращ след прилагане на ускорената корозия от 9,00 до 10,00 мм. От изследваната работна диаграма ясно може да се изведе, че корозията оказва своето влияние върху механичните свойства на изследваната стомана изразяващо се в следните основни факти: намаляване на дуктилността на стоманата с около 12 %;

не се променя значително структурата на материала и той остава жилав; изразена граница на провлачане; незначително намаляване на якостните стойности до 5% – 15%; не се променя вътрешната кристална структура на стоманата значително; модулът на еластичност – намалява с около 20%.



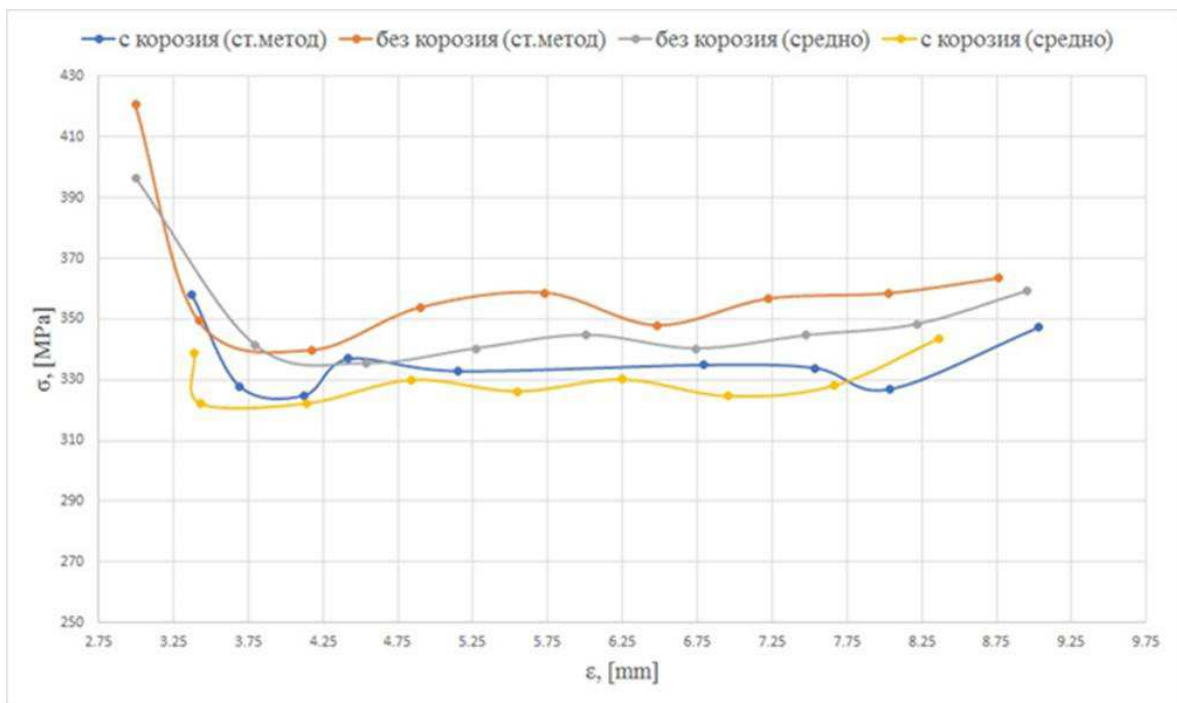
Фигура 3.30 Диаграма на зоната на еластичност на група А

Таблица 3.7 Данни на основните точки по които е направена диаграмата на фиг. 3.30

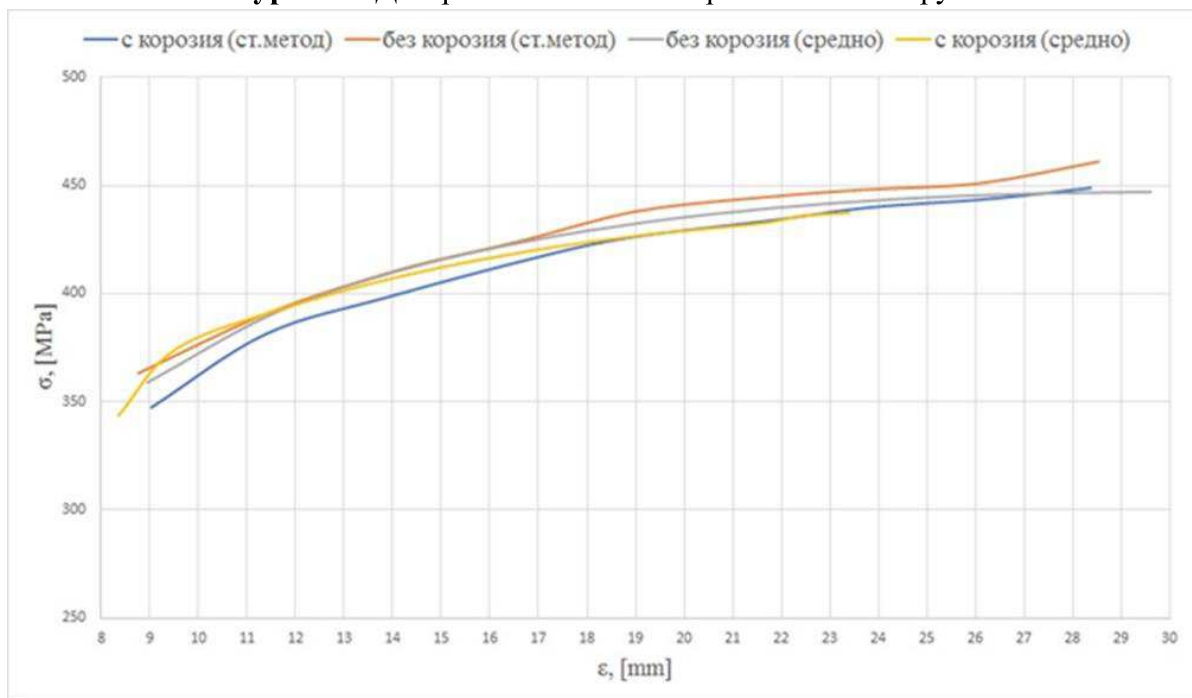
вид резултат	№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
стохастичен	ε, [mm]	0.421	0.821	1.233	1.625	2.047	2.521	2.955	3.376
	σ, [MPa]	17.3	28.3	56.7	91.9	145.9	211.9	293.9	357.9
средно-аритметичен	ε, [mm]	0.424	0.848	1.271	1.695	2.119	2.543	2.967	3.390
	σ, [MPa]	12.7	31.1	59.0	98.2	149.2	211.3	277.3	338.7

Таблица 3.8 Данни на основните точки по които е направена диаграмата на фиг. 3.31

вид резултат	№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
стохастичен	ε, [mm]	3.691	4.125	4.421	5.154	6.794	7.540	8.034	9.034
	σ, [MPa]	327.9	324.9	336.9	332.9	334.9	333.9	326.9	347.4
средно-аритметичен	ε, [mm]	3.433	4.137	4.842	5.547	6.252	6.957	7.662	8.366
	σ, [MPa]	322.2	322.2	330.0	326.2	330.1	324.6	328.1	343.7



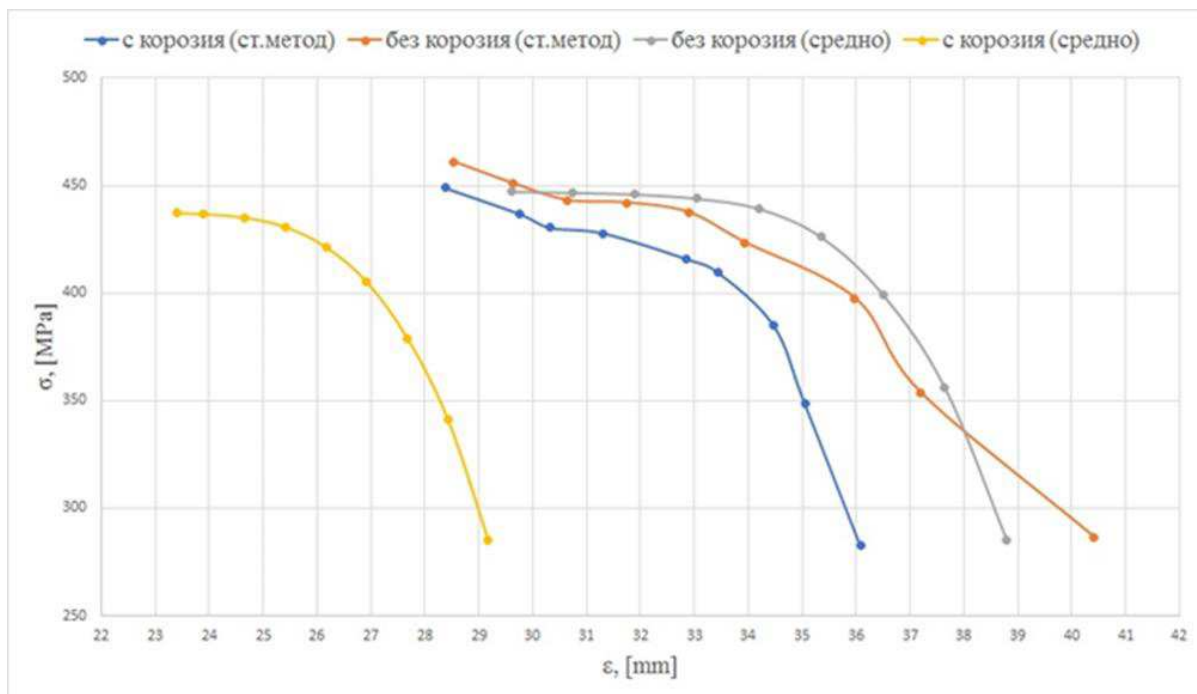
Фигура 3.31 Диаграма на зоната на провлачване на група А



Фигура 3.32 Диаграма на зоната на уякчаване на група А

Таблица 3.9 Данни на основните точки по които е направена диаграмата на фиг. 3.32

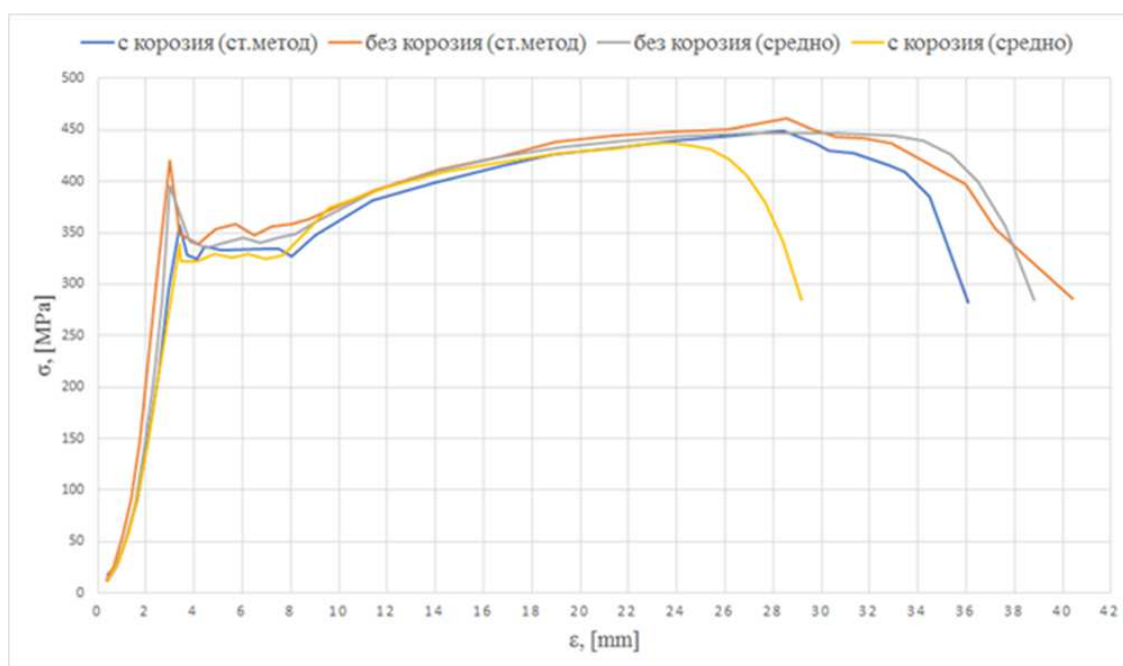
вид резултат	№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
стохастичен	ε, [mm]	11.39	13.89	16.81	18.85	21.79	23.84	26.32	28.37
	σ, [MPa]	381.4	398.4	415.9	425.9	433.9	439.9	443.9	448.9
средно-аритметичен	ε, [mm]	9.58	11.98	14.39	16.79	19.19	21.60	22.40	23.41
	σ, [MPa]	374.8	394.6	409.0	419.4	427.0	432.3	435.7	437.1



Фигура 3.33 Диаграма на зоната на разрушаване на група А

Таблица 3.10 Данни на основните точки по които е направена диаграмата на фиг.3.33

вид резултат	№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
стохастичен	ε, [mm]	29.75	30.33	31.31	32.85	33.44	34.47	35.05	36.08
	σ, [MPa]	436.9	430.4	427.8	415.9	409.5	385.0	348.9	282.7
средно-аритметичен	ε, [mm]	23.90	24.65	25.41	26.16	26.91	27.67	28.42	29.18
	σ, [MPa]	436.7	435.1	430.7	421.4	405.2	379.1	341.3	284.9



Фигура 3.34 Работна диаграма на материала на група А

От изследваната работна диаграма показана на фиг.3.34 на корозирания материал, ясно може да се изведе, че корозията оказва своето влияние върху механичните свойства на изследваната стомана изразяващо се в следните основни факти :

- намаляване на дуктилността на стоманата с около 12 %
- не се променя значително структурата на материала и той остава жилав.
- изразена граница на провлачане
- незначително намаляване на якостните стойности до 5% – 15%
- не се променя значително вътрешната кристална структура на стоманата
- модулът на еластичност – намалява с около 20%

По същия алгоритъм са проведени експериментите и в останалите групи пробни тела. За всяка група са анализирани зона на еластичност, зона на провлачане, зона на уякчаване, зона на разрушаване и е изведена работна диаграма за материала.

3. Анализ на резултатите

При обобщен анализ на резултатите от експерименталната разработка на дисертационния труд се отбелязва, че:

Зона на еластичност. В началото на развитие на корозия в стоманените образци се наблюдава изменение на дуктилността на материала, но следва закона на Хук. Изменението в стойностите е в размер до 12%. С напредването на корозията, нейното въздействие започва да оказва влияние върху зоната, като започва увеличаване на еластичната деформация до 20%. При продължаващо развитие на корозионното въздействие се достига до момент, в който еластичната деформация е увеличена, но за сметка на якостните качества, които бележат спад до 15%. Колкото повече корозията се развива в стоманения елемент, толкова повече дуктилността в зоната започва да намалява и в даден момент вече е загубила увеличената си еластичност, респективно спадът на напреженията си остава същият. При корозия над 40% от теглото с продължаващо корозионно влияние започва да води до промяна на зависимостта на деформация, т.е. вече е не линейна деформация и не следва закона на Хук, дуктилността е намаляла драстично с повече от 50%.

Зона на провлачане. При развита корозия до 15% от теглото, се установява, че относителната деформация не се е променила, дуктилността също, ясно е изразена площадката на провлачане, Стойностите бележат незначително понижение в размер до 5%. Наблюдава се поведение на еласто-пластичен материал. С напредването на корозията се констатира, че дуктилността започва да намалява на 25%, все още е налична граница на провлачане, макар материала да не може да се класифицира като жилав. С нарастване на развитието на корозията, площадката на провлачане изчезва, дуктилността намалява значително над 50%, материалът придобива поведение на крехък материал. Установява се ясно изразен вертикален участък в зоната.

Зона на уякчаване. При започване на развитие на корозията в зоната не се констатира съществени промени. Дуктилността се е запазила, като се отчита слабо понижение на якостните характеристики на материала в размер до 5%. Поликристалният строеж на стоманата съдържа в себе си кристална решетка и съществуващите сили си взаимодействат вътре в нея, но плъзгането не може да расте неограничено, структурата

се е изменила в следствие на настъпилите пластични деформации, което се установява от по-слабия наклон на диаграмата. С продължаващото въздействие на корозията дуктилността и относителната деформация започват да бележат рязко намаляване до 50%, а якостта запазва своя тренд на увеличение, т.е. появява се ефект „корозионно уякчаване“ в размер на 10%. С нарастване на корозионното въздействие се установява от извършеното изследване, че ясно изразена промяна в кристалната решетка на стоманата, започналото трансформиране от еласто-пластичен материал в крехък материал е завършено вече, дуктилността значително е намаляла, както и относителната деформация в размер на 70%.

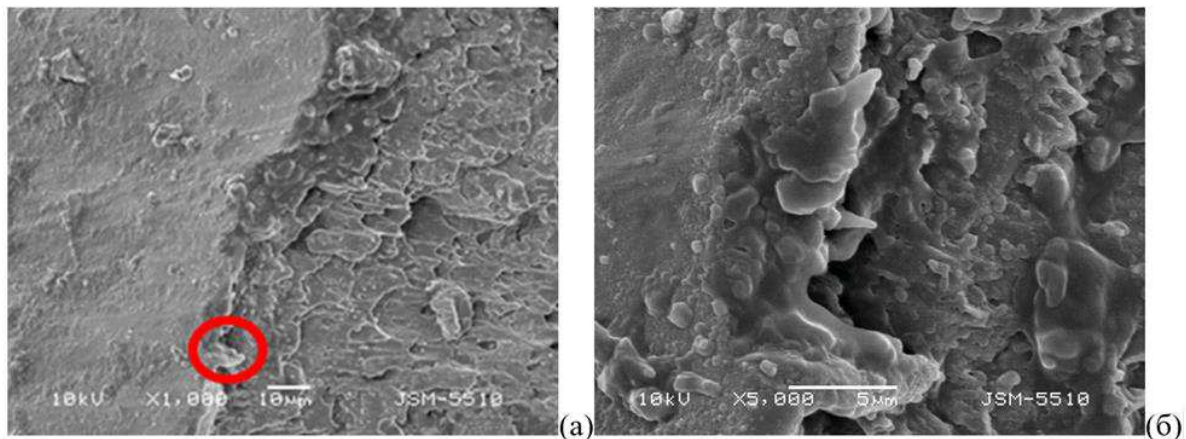
Зона на разрушаване. Със започване на корозионното въздействие в зоната се установява, че дуктилността бележи директен спад до 15%. Макар стойностите на якостта на разрушаването да се установяват в значително близки граници до загубата на дуктилност от самото начало е съществена. С увеличаване на корозионното въздействие дуктилността започва да намалява, достигайки размери до 40%. Колкото повече влиза корозията в стоманения елемент, толкова повече неговата дуктилност намалява, докато не придобие поведение на дуктилност, характерна за крехките материали, макар якостта на разрушаване да не се изменя в чувствителни граници.

Работна диаграма. Основната дефиниция на пластичността е способността на материала да претърпи значителна пластична деформация преди разкъсване, мярката и може да бъде изразена в проценти по време на процесите на удължаване или намаляване на площта, при изпитване на опън. Пластичността е основно свойство на стоманата, тъй като материалите, които се напукват, или счупват под напрежение, не могат да бъдат манипулирани с помощта на процеси на металообработване като удар, валцуване, изтегляне или екструдиране. В стоманените елементи се срещат високи степени на дуктилност, както и в други материали в метали, което води до общото схващане, че металите като цяло са пластични. При металните връзки валентните електрони на обвивката се делокализират и споделят между много атоми. Делокализираните електрони позволяват на металните атоми да се плъзгат един след друг, без да бъдат подложени на силни отблъскващи сили, които биха причинили разбиването на други материали. Еластичността може да се определи количествено чрез деформация на фрактурата, която е напрежение, при което образецът се разрушава при едноосен тест за опън. Друга често използвана мярка е намаляването на площта на фрактурата. Еластичността на конструкционната стомана варира в зависимост от съставките на сплавта. Увеличаването на нивата на въглерода намалява дуктилността на стоманата, т.е. става крехка стомана. При корозия до 20%, промяната в еластичността е малка, но с напредването на корозионното развитие в стоманените носещи елементи, промяната по отношение на пластичността става чувствителна. С оглед на силата е налице промяна до 10%, което се дължи на корозивния ефект. С развитието на корозия съответната пластичност намалява.

4. Микроструктурно изследване

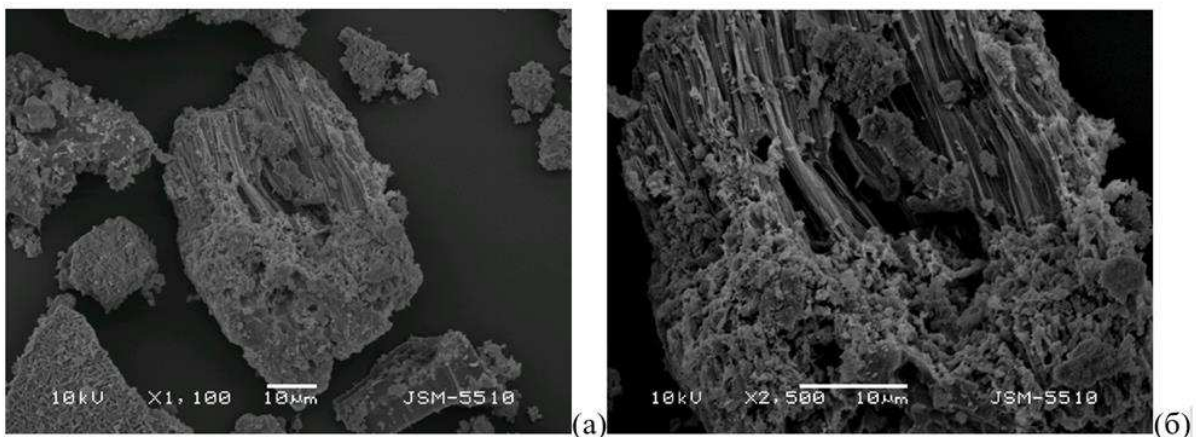
След изпитването на опън произволен елемент е избран за извършване на микроструктурно изследване, за да се проследят деструкционните процеси в повърхностния слой при корозия. Във връзка с определянето на взаимозависимостта на всички показатели, които влияят върху опъна на стоманите при корозия, възниква необходимост от системен подход към проблемите. Затова е извършено наблюдение със

сканираща електронна микроскопия с увеличение до 5000 пъти на образуваната корозия фиг.3.84. Явленията са свързани с разрушението на материалите при нестабилен ръст на начален момент на образуване на микропукнатини и концентрация на напреженията.



Фигура 3.84 (а) Граница на корозия, увеличение 1000 пъти [49]; (б) Сегмент от границата (с кръгче означено), увеличение 5000 пъти [49]

На фиг. 3.86 се вижда структурата на метала при опънно натоварване и състоянието на корозията [49]. Това е необходимо, за да се проследи състоянието на металният крепеж и се докаже, че в корозионния слой възниква напрежение и корозията абсорбира част от напрежението [49]. От направения металографски анализ на стомана S355JR се установява микроструктурата. Тя се състои от ферит и перлит, характерни за нисковъглеродните стомани. Резултатите от анализа показват, че при корозионно разрушение преобладава ронливия механизъм на разрушение, характерен с разпространяването на пукнатини по определени кристални плоскости. В граничните области се забелязват следи от язви със сложен микро релеф, възникващ на границата както в, така и между зърната на перлита и ферита. Това вероятно е инкубационен период и причина за увеличаване скоростта на нарастване на пукнатини.



Фигура 3.86 (а) Увеличение 1100 пъти [49]; (б) Увеличение 2500 пъти

ИЗВОДИ В ГЛАВА III:

- 1.** Прилага се съвременна методика за ускорена корозия, която позволява ефективно диагностициране и оценка на степента на развитие на корозията за единица време.
- 2.** Модернизиран е химическият метод за почистване на корозирани пробни тела от корозионни продукти.
- 3.** Посредством използването на стохастичния метод се доказва, че се получават най-достоверни резултати във времето с оглед вероятностното събитие на изчисленията.
- 4.** Създаден е вероятностен модел чрез използването на съвременен математически апарат.
- 5.** Изследвани са етапи от работната диаграма без корозия и е обобщена работната диаграма на материала стомана S355JR. Получени са надеждни резултати удостоверяващи 84-87% точност
- 6.** Изпитани са 105 пробни тела и са обработени получените части на работната диаграма на материала чрез математическите модели. Те са достатъчно достоверни с над 85% вероятност и могат да се използват в практиката.
- 7.** Чрез използването на сканираща електрона микроскопия е проследена промяната в получената корозия, стомана S355JR и на границата между корозията/стоманата.

Глава IV. Прогнозиране на корозионното въздействие

IV.A. Теоретично моделиране

1. Встъпление

Проблемът с корозията при конструкции в подземното строителството е показан на фиг. 4.1. Изследват се начини за прогнозиране на корозионното въздействие, които пораждат негативно влияние върху основните характеристики – намаляване на геометричните характеристики, появяване на повърхностни дефекти, структурни промени в материала и якостно-деформационните свойства на стоманата [67, 68, 72, 78, 87, 88, 93, 96], което влияе и върху параметрите на техническите съоръжения и системи.



Фигура 4.1 Корозирали стоманени елементи в подземни съоръжения

2. Модел на корозионния процес

За експерименталните данни за изследване на метални конструкции и елементи, експлоатирани при степени на агресивна корозионна среда и след обработка може да се установи следната формула за характеризирание на корозионното въздействие, описвайки с показателна функция (фор. 4.1):

$$П = A \cdot t^n \quad (4.1)$$

където П са корозионни загуби, мм; А и n са постоянни параметри (зависещи от средата в която се намира елемента), n е експлоатационното време в години.

3. Прогнозиране развитието на корозионният процес

Прогнозата е вероятностната преценка за състоянието на даден обект и е процес и/или явление в даден момент в бъдещето, например по отношение на корозията. Във връзка с разглеждания проблем, това е прогнозиране на формираните на индикации за развитието на процеса. Моделът, получен по методите, описани и използвани за прогнозиране, се нарича прогноза. Тя трябва да отговаря на следните изисквания: да съответства на предвидената пълнота, адаптивност и еволюция, за да позволи въвеждането на промени и допълнения за последователно приближаване до необходимата точност; да е достатъчно абстрактна, за да може да се променя броят на необходимите фактори и да се гарантира надеждността на получените резултати; да има времеви ограничения за постигане на бързи резултати чрез краткосрочно прогнозиране и изключване на големи разходи за машинно време чрез дългосрочно прогнозиране или оценка на прогнозните резултати; да е ориентирана към реализацията с помощта на известни технически средства и да е изградена въз основа на установена терминология; да предоставя полезна информация за процеса по отношение на изследователската

задача; да дава възможност за проверка на истинността при реално отчитане на действителните процеси на корозия

В зависимост от броя на променливите, участващи в описанието на модела в етапа на анализа, прогнозиращите обекти се разделят по количествен мащаб на [103, 104]:

суб-локални (1 ... 3 фактора); локални (4 ... 14 фактора); субглобални (15. .. 35 фактора); глобални (с броя на значимите променливи 36 ... 100); суперглобални (повече от 100 фактора); [103]. Процесите на корозия и нейното прогнозиране се отнасят главно до първите три класа. По-специално атмосферната корозия често е обект на подобна прогноза [78]. В допълнение към количествения мащаб, методът на прогнозиране съществено се влияе от сложността на обекта: супер простим; прости ; сложни ; супер сложни ; по фактори на развитие на прогнозата, можем да ги разделим на две основни групи: дискретни и аperiodични. Процесите на корозия се дължат главно на аperiodични фактори и по-рядко на дискретни.

Моделирането на процесите предполага създаване на логическо, аналитично, графично или каквото и да е друго точно описание, съответстващо на реалността и позволяващо да се анализира и оценява динамиката на развитието му в зависимост от конкретните условия. В случая при модели, отразяващи зависимостта на корозионният процес от времето, протичащ в стационарни условия, е необходимо да е наличен статистически материал за дълбочината на корозията - l_k , което може да се изрази аналитично във функция на времето (фор. 4.2) и по този начин да се получи опростен за решението на задачата модел от вида :

$$l_k = v_0 \cdot \tau \quad (4.2)$$

където v_0 е началната скорост на корозията; τ е времето.

При изследванията се създават различни функционални, информационни и морфологични модели, при спазване на изискванията за възпроизводимост и на тази база се изгражда цялостният модел на системата. Моделирането може да бъде пълно, непълно и приблизително [98, 99, 103]. Пълното моделиране се извършва чрез отчитане на съотношението (фор.4.3):

$$m = \mu \cdot M_0 \quad (4.3)$$

където: m са матриците на модела, а μ и M_0 са съответно коефициентите и параметрите на оригинала. При непълното моделиране, моделът представлява подобна на оригинала функция, в общ вид описана от израза (фор.4.4):

$$m = \mu \cdot M_0 ; M = \rho(M_0, x, \tau) \quad (4.4)$$

където: ρ е някаква функция на оригинала, а x са пространствени координати;

При приблизителното моделиране се отчитат само най – съществените фактори на процеса, в случая корозия, чрез система, която в общ вид изглежда така (фор.4.5):

$$\begin{cases} m = \mu \cdot M_0 \\ M = \text{sub } M_0 \end{cases} \quad (4.5)$$

По своя състав моделите могат да бъдат физически, математически, с натурални елементи и смесени.

Най-често при изследванията и диагностиката на процесите на корозия се употребяват детерминистичните модели. Определянето на реалната стойност на скоростта на корозионния процес и изменението на скоростта е част от предмета на

изследването на кинетиката на корозионните процеси и е водеща цел при тяхното моделиране. Обикновено под скорост на корозия [79] се разбира средната скорост V_{cp} на протичането на корозионния процес (фор. 4.6):

$$V_{cp} = \tau^{-1} \sum_1^n I_{k,i} \quad (4.6)$$

където: $I_{k,i}$ – корозионният ефект в даден момент от време;

Действителната скорост на корозионния процес съществено се различава от средната такава и има характерни особености, които не трябва да се отчитат в условията на експлоатация, особено при прогнозиране на корозионна опасност. Корозионният процес винаги започва от повърхността на метала и се характеризира с развитие в дълбочина. Самият корозионен процес е резултат от различни причини, разгледани по-горе и не може да бъде равномерен [79]. Изменението на корозията в дълбочина може да бъде представено във вид на аналитичен модел по следната формула (фор. 4.7):

$$I_k = I_{k,y} \left[1 - \exp\left(\frac{\tau}{k_\tau}\right) \right] \quad (4.7)$$

където: $I_{k,y}$ – дълбочина на корозията в началото на процеса ; k_τ – постоянна величина за частният случай на корозия; Действителната скорост V_d на корозионния процес се намира след диференциране на уравнението [79] (фор. 4.8):

$$v_d = v_0 \cdot \exp\left(\frac{-\tau}{k_\tau}\right) \quad (4.8)$$

Моделите формиранни чрез фор. 4.1 и фор. 4.2 описват само част от корозионния процес – само в областта на определените значения на $I_{k,y}$. За изразяване на действителната скорост на корозионния процес в цялост от нулевото значение по емпиричен път е определен аналитичният модел [72, 79] (фор. 4.9):

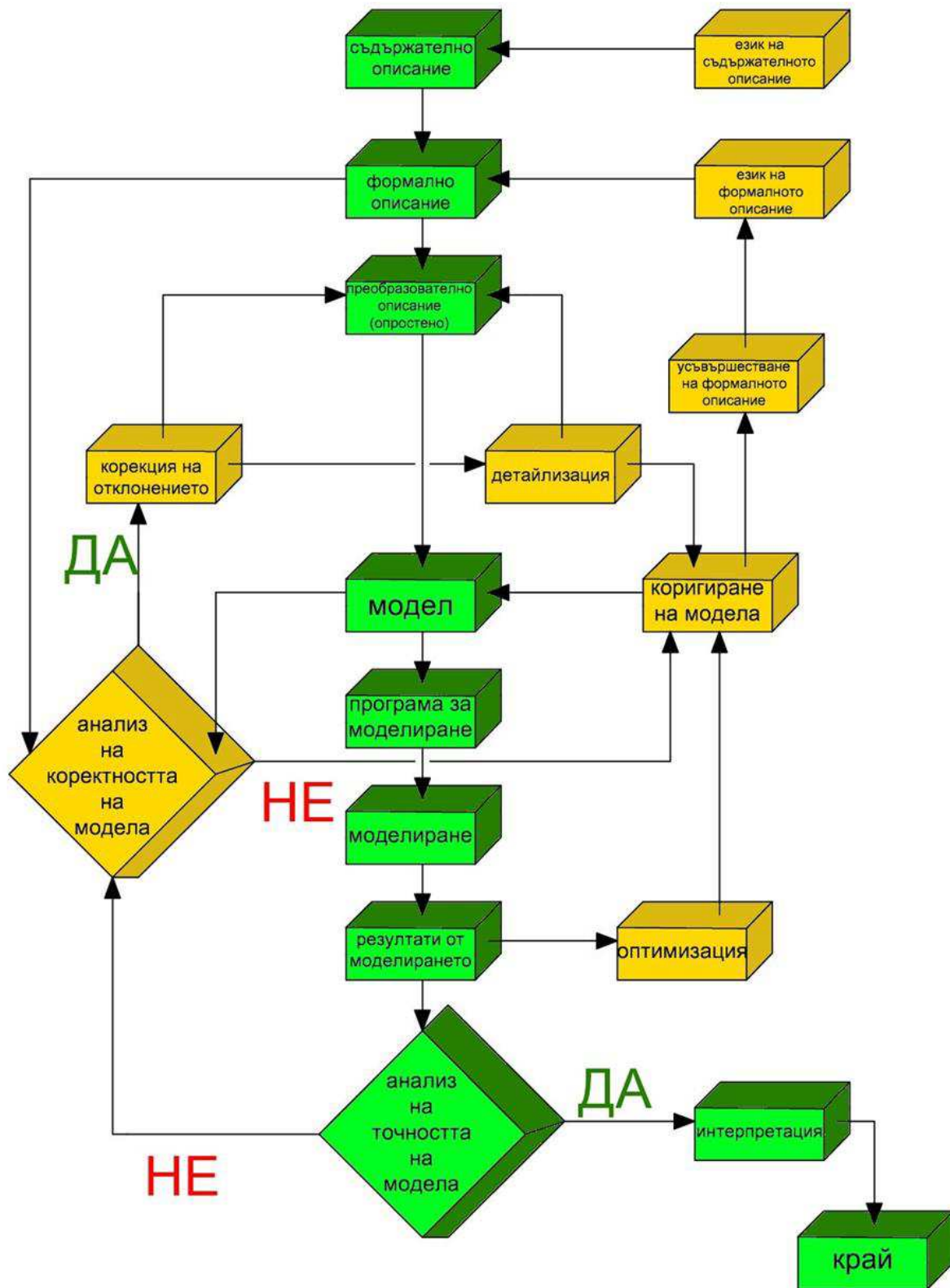
$$V(\tau) = I'_k(\tau) = v_d \cdot \tau \cdot (k_1 \cdot \tau^2 + k_1' \cdot \tau + k_1'')^{-1} \quad (4.9)$$

където: k_1 , k_1' , k_1'' – постоянни величини, обратно съответстващи на дълбочината на навлизане на корозията в метала, скоростта и ускорението на корозионния процес.

Напоследък при построяването на математическите модели на различните физически процеси успешно се прилага метода на идентификация, представляващ построяване на модела на процеса на базата на първичната информация, получена в експлоатационни условия [98, 99]. Това може да бъде представено чрез следният израз, при което се определя приблизителната стойност на линейният оператор A_0 (фор. 4.10):

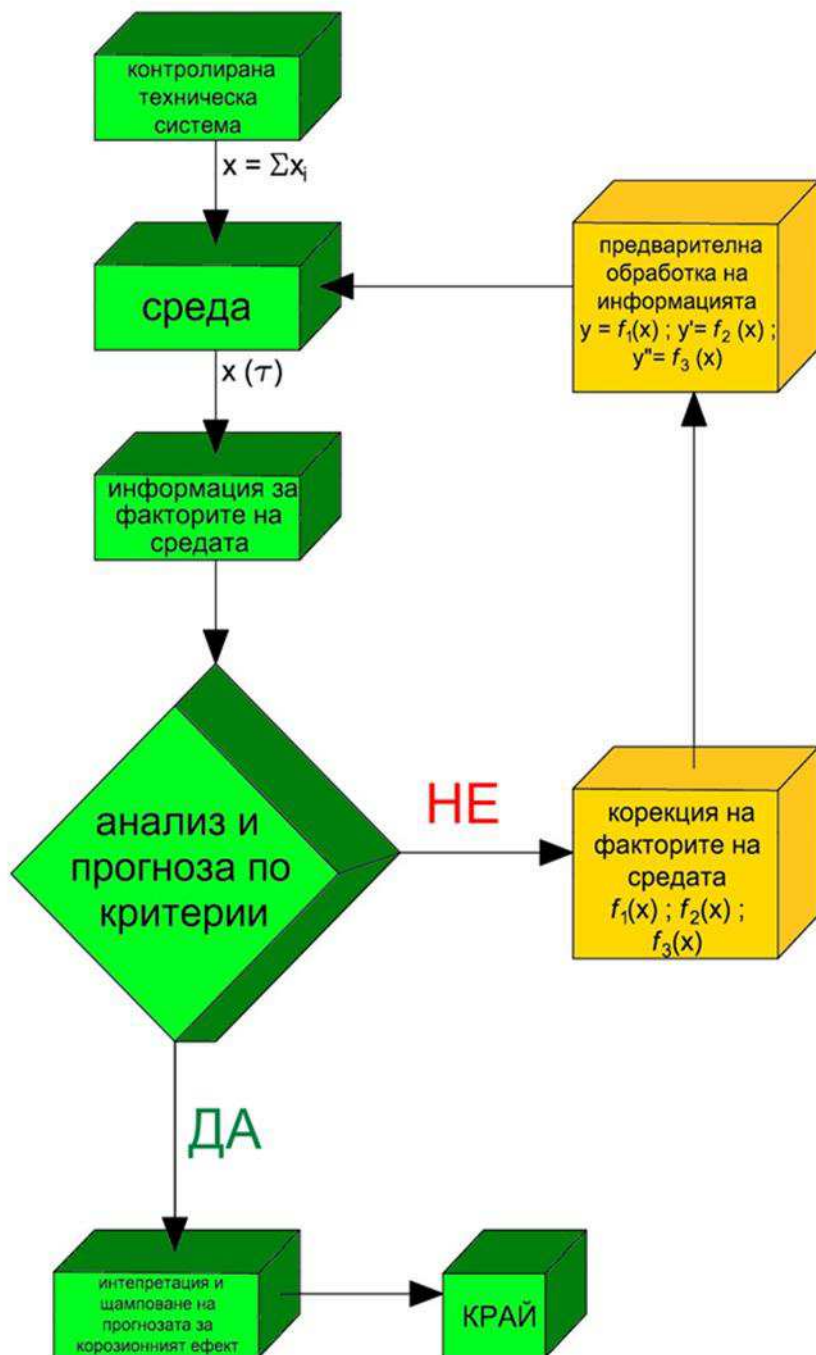
$$I_1(\tau) = A_0 \cdot x(\tau) \quad (4.10)$$

При разработването на модела на корозионните процеси е важно да се намери оптималният алгоритъм, обезпечаващ необходимите качества на полученият модел, с минимални усилия и средства и при максимално използване на натрупания опит. От представената на фиг. 4.2 основа, процесът на моделиране е разделен на няколко взаимосвързани етапа.



Фигура 4.2 Носещи стоманени елементи с корозия в метални крепежи

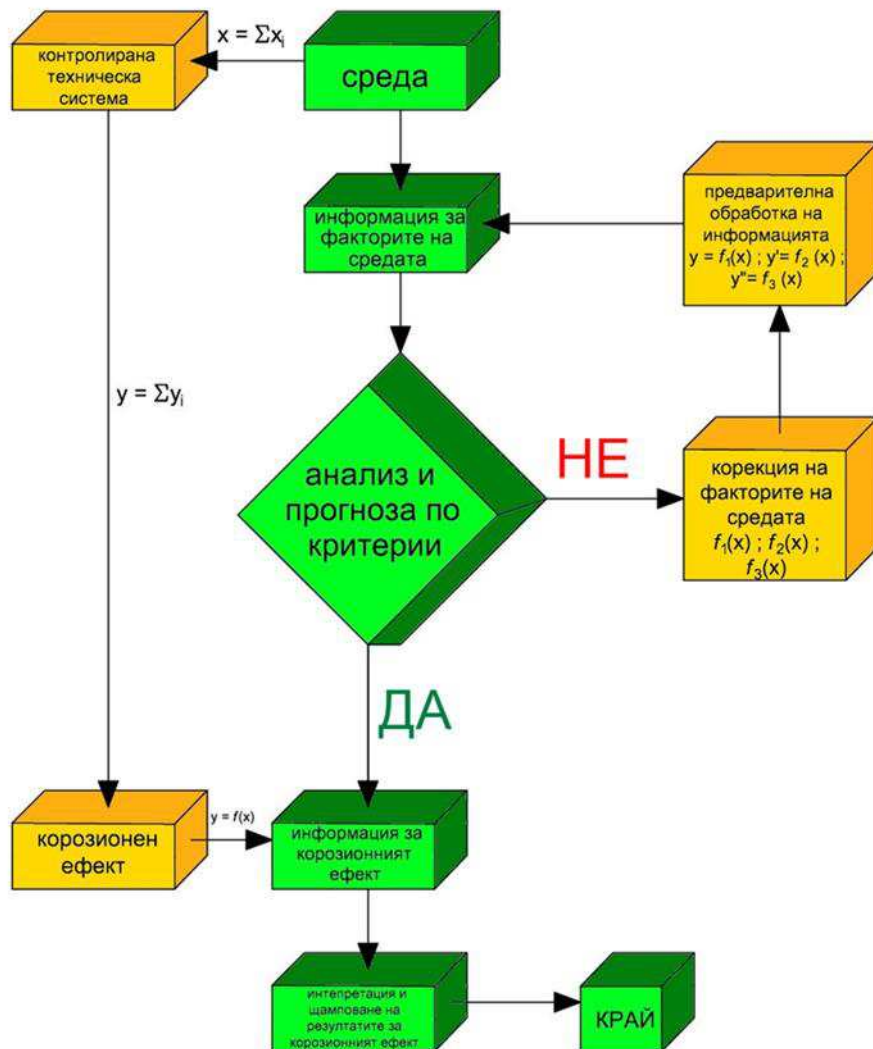
Детерминистичните обекти предполагат априорно известни закони на кинетиката на корозионните процеси. Прогнозата се извършва на базата на чисто локална информация, която постъпва за обработка директно от контролирания обект.



Фигура 4.3 Схема на вариант I – по входни параметри

Вариант I – по входни параметри е показан на фиг. 4.3 и се прилага за прогнозиране на ефектите на корозионно увреждане в експлоатационни условия, при което се използват параметри, характеризиращи непосредствената ситуация.

Вариант II – по входно – изходни параметри е показан на фиг. 4.4. Предоставя и прогнозира информация за факторите и ефектите на конкретната техническа система, както и последващата обработка на тази информация. Контролираните параметри са фиксирани и регулирани. Резултатът от влиянието на въздействащите фактори се фиксира на изхода чрез външна инспекция на конструкцията по време на поддръжка или ремонт след определен период от време. Вариантът не позволява пълното автоматизиране на системата за наблюдение на оперативната ситуация [78, 79, 80].



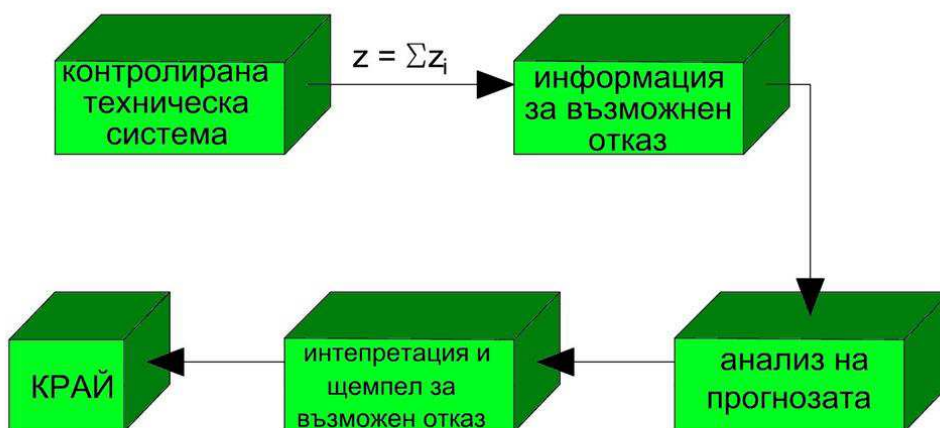
Фигура 4.4 Схема на вариант II – по входно – изходни параметри

Вариант III - по изходни параметри или опростен е показан на фиг. 4.5. Изпълнението му е подходящо както за пробна експлоатация, така и в лабораторни условия. При реални експлоатационни условия това е неприемливо, тъй като резултатите са свързани с допускането на развитието на процеси, които могат да доведат до отказ на техническата система, както и възникване на аварийна ситуация на работещата техника.

Вариант IV – по изходни параметри е представен на фиг. 4.6, отчитачи нивото на срив или отказ на техническата система. Схемата може да бъде реализирана чрез отчитане на най-значимите параметри на външните фактори, влияещи върху корозията. Прогнозните данни е препоръчително да се сравнят с резултатите от лабораторните изследвания и в естествени условия, за да се усъвършенства модела на корозионният процес.

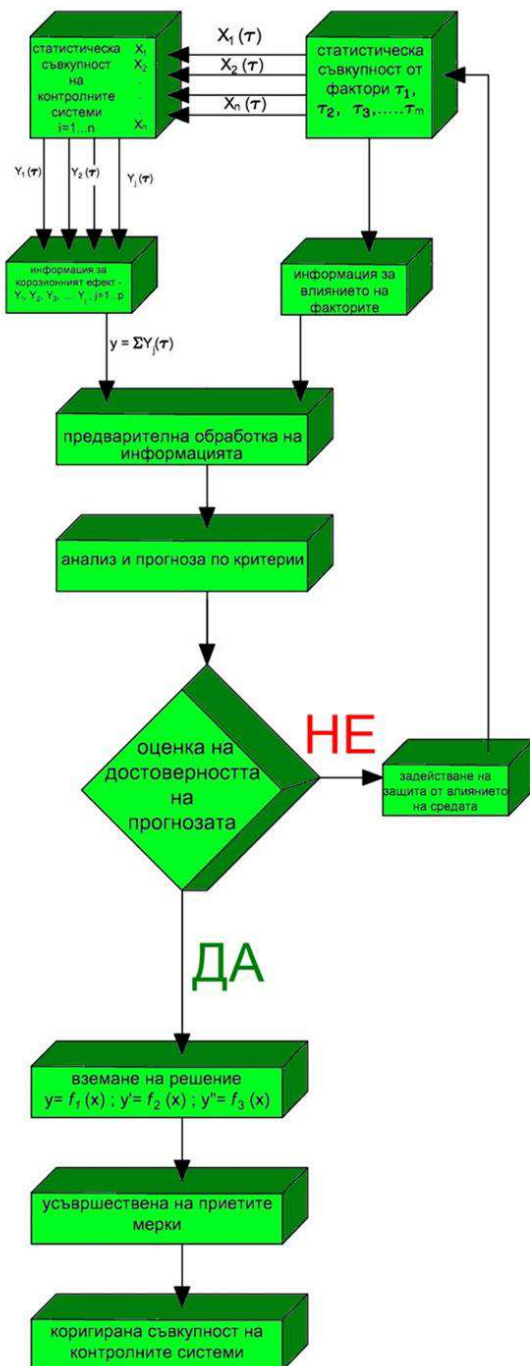


Фигура 4.5 Схема на вариант III – по изходни параметри (опростен)



Фигура 4.6 Схема на вариант IV – по изходни параметри, отчитащи нивото на сив или отказ на техническата система

На фиг. 4.7 е показана схематична диаграма на системи за прогнозиране на различни видове ситуации водещи до появата на корозия. Тяхното прилагане е много по-сложно от реализацията на детерминирани обекти. Трудността се състои в това, че е практически невъзможно проследяването на причинно-следствената връзка на явления, които обективно съществуват във всички процеси на промяна в състоянието на материала, включително корозионните процеси. Смесените (детерминирано-стохастични) обекти ефективно съчетават предимствата и премахват вредите. Те се основават на добре проучен модел на детерминирани обекти, както и на статистическата информация, необходима за определяне на конкретните параметри на процесите.



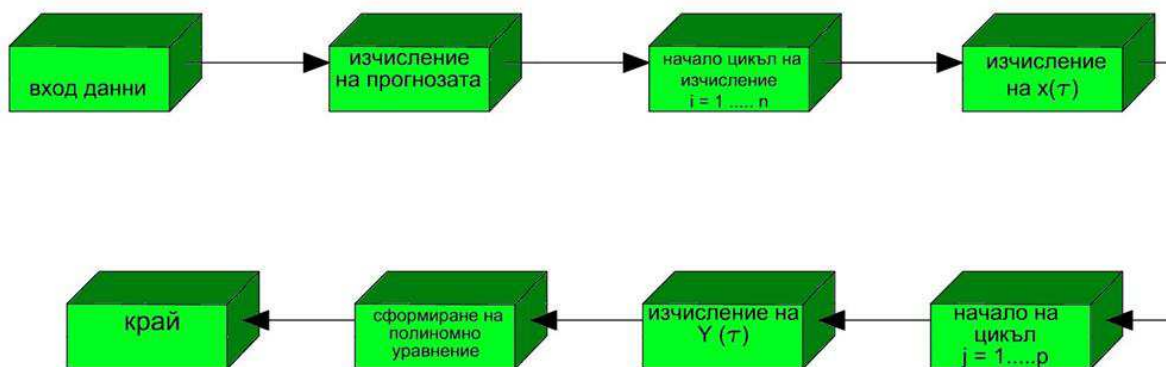
Фигура 4.7 Схема на основните етапи на събиране, обработка и анализ на информация при стохастично прогнозиране на корозионните процеси

Модели на смесени обекти в $i(x)$ се използват за методи за предсказване на екстраполация [98, 99, 103] и могат да се използват за моделиране (фор. 4.11) на корозионния ефект – $KE(x)$:

$$KE(x) = i_n(x) = f(a, x) + \eta(x) \quad (4.11)$$

където: $f(a, x)$ - редовен (детерминистичен) компонент, описващ общата тенденция на промяната в процеса на вреда в течение (тенденция) и продължава за прогнозния период; $\eta(x)$ е произволен (стохастичен) компонент, обикновено се счита, че е некорелиран произволен процес в резултат на нерегистрирани или незначителни фактори с нулево математическо очакване. Оценките му са необходими за определяне на точността на прогнозата [106].

На фиг. 4.8 е дадена блокова диаграма на алгоритъма за изчисляване на прогнозираните стойности с изравняване на екстраполацията на степенен полином, използвана в описанието на корозионни процеси.

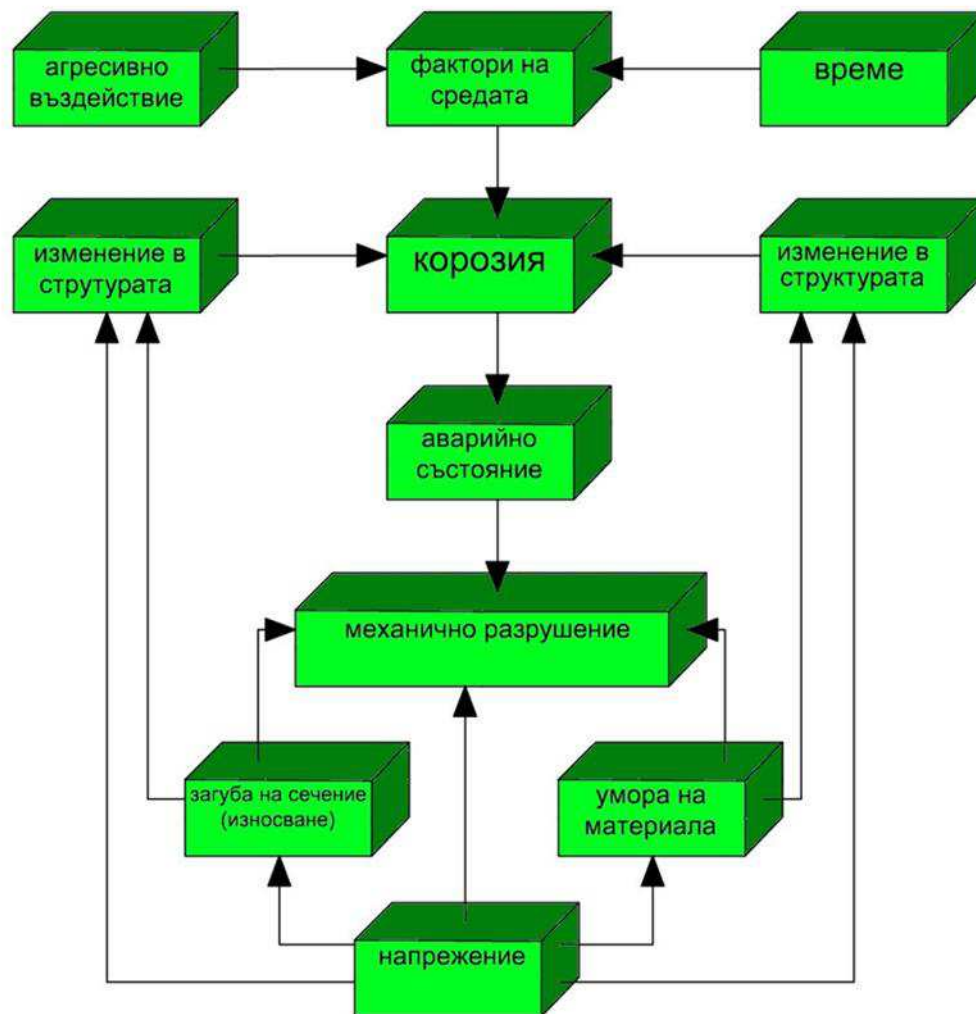


Фигура 4.8 Блокова схема на алгоритъма за изчисляване на прогнозираните ефекти на ефектите, дължащи се на корозия

4. Прогнозиране при устойчиво развитие

Решението на прогнозирането при устойчиво развитие започва [101, 105], когато се формулират изискванията за материала в изделието и се определя областта на неговата оперативна използваемост, когато се определят условията, при които ще се използва материала в даденото изделие по-специално: конструкция въз основа на избрания модел и корозионната функция; когато се избира материала, който се предлага в този продукт; когато са формулирани изискванията за надеждност и надеждност на прогнозата. Решението на прогнозната задача включва следните стъпки: избор на модел на стареене на материала до параметрите, влизащи в него; определяне и усъвършенстване на стойностите на параметрите, влизащи в функцията за стареене, като се използва наличната информация за материала и продукта (пасивна прогноза) или специални тестове (активна прогноза); формулиране на решението на прогнозния проблем. Прогнозиране на устойчивото развитие е вид сравнителната оценка за даден материал и може да бъде всяка характеристика на функцията за корозия на този тип материал. Общ подход към този избор е невъзможен, тъй като е твърде

разнообразен, както и функциите на развитие на корозията и нейното влияние върху напреженията, показани на фиг. 4.9.



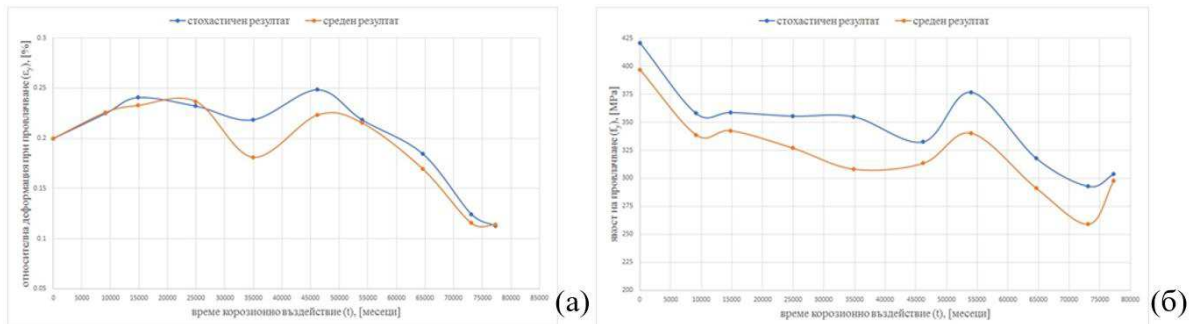
Фигура 4.9 Блокова схема на алгоритъма за изчисляване на прогнозираните ефекти, дължащи се на корозия

Да се прогнозира даден процес, който зависи от твърде много съвкупни фактори, е сложна задача. Предложените алгоритми и модели за прогнозиране на развитието на корозията, а от там и прогнозиране на нейното влияние е един идеалистичен модел, обосноваващ се на теория и изследване. Този модел, следва да бъде приложен в практически условия с оглед неговото прецизиране и евентуалното определяне на неизвестните константи, които ще се подчиняват на математическите зависимости, отразени в теория на вероятностите [103, 104, 106].

Безспорно е, че при евентуално програмиране на модела, и участие на достатъчен обем база данни при съответното развитие на корозията в даден метален елемент, този модел ще има своята практическа приложимост.

IV.Б. Прогнозиране на остатъчна якост и относителна деформация

При разглеждане възможностите за прогнозиране на остатъчна якост и относителна деформация са обследвани корозионни категории С1, С2, С3, С4, С5 и СХ като за всяка категория са изведени уравнения за граница на провлачвания и графики за якост на опън. Чрез използване на полипоналната апроксимация се установява функционална зависимост за промяната на якостта и относителната деформация спрямо времето на въздействие на корозионната категория (в месеци) в зависимост от избрания метод за обработка на данни. На фиг. 4.10(а) е показана зависимостта между промяната на относителната деформация спрямо времето на действие на корозионната категория С1, а на фиг. 4.10(б) е показана зависимостта между промяната на якостта във времето, вследствие на корозионното въздействие на категория С1, при границата на провлачване.



Фигура 4.10 (а) графика на изменението на относителната деформация в зависимост от корозионното въздействие във времето; (б) графика на изменението на якостта в зависимост от корозионното въздействие във времето;

От фиг. 4.10 чрез използване на полипоналната апроксимация [91], се установява функционална зависимост за промяната на якостта и относителната деформация спрямо времето на въздействие на корозионната категория (в месеци) в зависимост от избрания метод за обработка на данни.

а) стохастичен резултат:

- относителна деформация при граница на провлачване (ур. 4.12):

$$\begin{aligned} \varepsilon_y(t) = & 1.886923397 \cdot 10^{-41} t^9 - 6.607550888 \cdot 10^{-36} t^8 + 9.646014499 \cdot 10^{-31} t^7 - \\ & 7.598353092 \cdot 10^{-26} t^6 + 3.492133601 \cdot 10^{-21} t^5 - 9.455866912 \cdot 10^{-17} t^4 + 1.451318008 \cdot 10^{-12} t^3 - \\ & 1.148156471 \cdot 10^{-8} t^2 + 3.858748796 \cdot 10^{-5} t + 2.000583103 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (4.12)$$

- якост при граница на провлачване (минимум) (ур. 4.13):

$$\begin{aligned} f_y(t) = & 3.00588407 \cdot 10^{-38} t^9 + 1.052798012 \cdot 10^{-32} t^8 - 1.54034997 \cdot 10^{-27} t^7 + \\ & 1.221940811 \cdot 10^{-22} t^6 - 5.709346323 \cdot 10^{-18} t^5 + 1.597993784 \cdot 10^{-13} t^4 - 2.603843089 \cdot 10^{-9} t^3 + \\ & 2.268010889 \cdot 10^{-5} t^2 - 8.576219925 \cdot 10^{-2} t + 420.8058409 \end{aligned} \quad (4.13)$$

б) среден резултат:

- относителна деформация при граница на провлачване (ур. 4.14):

$$\begin{aligned} \varepsilon_y(t) = & 2.582118882 \cdot 10^{-41} t^9 - 9.4182287 \cdot 10^{-36} t^8 + 1.440839012 \cdot 10^{-30} t^7 - \\ & 1.197855805 \cdot 10^{-25} t^6 + 5.858582238 \cdot 10^{-21} t^5 - 1.704246908 \cdot 10^{-16} t^4 + 2.838036214 \cdot 10^{-12} t^3 - \\ & 2.447884284 \cdot 10^{-8} t^2 + 8.558381421 \cdot 10^{-5} t + 2.000560918 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (4.14)$$

- якост при граница на провлачване (минимум) (ур. 4.15):

$$f_y(t) = -1.044632037 \cdot 10^{-38} t^9 + 3.643583004 \cdot 10^{-33} t^8 - 5.309275807 \cdot 10^{-28} t^7 +$$

$$4.209565499.10^{-23} t^6 - 1.984743062.10^{-18} t^5 + 5.711787982.10^{-14} t^4 - 9.861547308.10^{-10} t^3 + 9.480843204.10^{-6} t^2 - 4.275694289.10^{-2} t + 396.6635496 \quad (4.15)$$

На фиг. 4.11(а) е показана зависимостта между промяната на относителната деформация спрямо времето на действие на корозионната категория С1, а на фиг. 4.11(б) е показана зависимостта между промяната на якостта във времето вследствие на корозионното въздействие на категорията С1 за якостта на опън.

а) стохастичен резултат:

- относителна деформация при якостта на опън (ур. 4.16):

$$\begin{aligned} \varepsilon_u(t) = & 4.300391306.10^{-41} t^9 - 1.65019893.10^{-35} t^8 + 2.667269419.10^{-30} t^7 - \\ & 2.359985201.10^{-25} t^6 + 1.243303922.10^{-20} t^5 - 3.972351371.10^{-16} t^4 + 7.491859784.10^{-12} t^3 - \\ & 7.637135628.10^{-8} t^2 + 3.010721725.10^{-4} t + 1.902706585 \end{aligned} \quad (4.16)$$

- якост на опън (ур. 4.17):

$$\begin{aligned} f_u(t) = & 4.567188873.10^{-39} t^9 - 1.944151203.10^{-33} t^8 + 3.422275948.10^{-28} t^7 - \\ & 3.232953691.10^{-23} t^6 + 1.775685996.10^{-18} t^5 - 5.726521554.10^{-14} t^4 + 1.037518148.10^{-9} t^3 - \\ & 9.371899552.10^{-6} t^2 + 3.08709247.10^{-2} t + 461.1038654 \end{aligned} \quad (4.17)$$

б) среден резултат:

- относителна деформация при якостта на опън (ур. 4.18):

$$\begin{aligned} \varepsilon_u(t) = & 6.161570328.10^{-41} t^9 - 2.239821925.10^{-35} t^8 + 3.399410323.10^{-30} t^7 - \\ & 2.779694866.10^{-25} t^6 + 1.315871686.10^{-20} t^5 - 3.594117404.10^{-16} t^4 + 5.29231186.10^{-12} t^3 - \\ & 3.521603834.10^{-8} t^2 + 3.30542855.10^{-5} t + 1.973359434 \end{aligned} \quad (4.18)$$

- якост на опън (ур. 4.19):

$$\begin{aligned} f_u(t) = & 2.525880003.10^{-40} t^9 - 1.839988163.10^{-34} t^8 + 4.541831589.10^{-29} t^7 - \\ & 5.368275473.10^{-24} t^6 + 3.399263928.10^{-19} t^5 - 1.178006275.10^{-14} t^4 + 2.131693936.10^{-10} t^3 - \\ & 1.745600812.10^{-6} t^2 + 3.980608075.10^{-3} t + 447.3706767 \end{aligned} \quad (4.19)$$

По аналогичен начин са разгледани възможностите за прогнозиране на остатъчна якост и относителна деформация и при останалите корозионни категории. При анализ на резултатите от установените формули (ур. 4.12 – ур. 4.59) се констатира, че зависимостта на влиянието на корозията върху механичните свойства на стомана S355JR е функция на полином от 9-та степен, както следва :

а) граница на провлачване

- относителна деформация при граница на провлачване:

$$\varepsilon_{y,c}(t) = A_1 \cdot t^9 + A_2 \cdot t^8 + A_3 \cdot t^7 + A_4 \cdot t^6 + A_5 \cdot t^5 + A_6 \cdot t^4 + A_7 \cdot t^3 + A_8 \cdot t^2 + A_9 \cdot t + \varepsilon_y$$

където: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$ и A_9 са коефициенти.

- якост при граница на провлачване (минимум):

$$f_{y,c}(t) = B_1 \cdot t^9 + B_2 \cdot t^8 + B_3 \cdot t^7 + B_4 \cdot t^6 + B_5 \cdot t^5 + B_6 \cdot t^4 + B_7 \cdot t^3 + B_8 \cdot t^2 + B_9 \cdot t + f_y$$

където: $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8$ и B_9 са коефициенти.

б) якост на опън

- относителна деформация при якостта на опън:

$$\varepsilon_{u,c}(t) = C_1 \cdot t^9 + C_2 \cdot t^8 + C_3 \cdot t^7 + C_4 \cdot t^6 + C_5 \cdot t^5 + C_6 \cdot t^4 + C_7 \cdot t^3 + C_8 \cdot t^2 + C_9 \cdot t + \varepsilon_u$$

където: $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$ и C_9 са коефициенти.

- якост на опън:

$$f_{u,c}(t) = D_1 \cdot t^9 + D_2 \cdot t^8 + D_3 \cdot t^7 + D_4 \cdot t^6 + D_5 \cdot t^5 + D_6 \cdot t^4 + D_7 \cdot t^3 + D_8 \cdot t^2 + D_9 \cdot t + f_y$$

където: $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8$ и D_9 са коефициенти.

Коефициентите, следва да бъдат избирани в зависимост от нормативно определения коефициент на степен на сигурност за конструктивния стоманен елемент. При коефициент на сигурност над 1,35 следва да се използват стохастичните резултати, а при коефициент на сигурност под 1,35 следва да се използват средно-аритметичните резултати.

Съгласно действащият норматив съществуват най-различни оразмерителни и изчислителни проверки, които трябва да се правят и в по-голямата част от тях винаги присъстват основните характеристични стойности на материала.

В случай, че за стоманените крепежи се извършват изчисления съобразно изследванията в дисертацията и се определя тяхната остатъчна якост както и се определя тяхната остатъчна носимоспособност във времето, може да се стигне да спестяване на финансови средства до 35% , намаляване на необходимото количество труд и оптимизиране на разходите по поддръжка. Възможности да се влягат за изпълнение корозирали материали с цел повторна употреба за определен период на време, осигурява допълнителен ресурс, който може да бъде използван и за други цели.

ИЗВОДИ В ГЛАВА IV

1. Извършено е теоретично моделиране на развитието на корозията и са определени видовете корозионни модели.
2. Анализирани са видовете възможности за моделиране на корозионното въздействие. Съставен е теоретичен алгоритъм за изчисление на прогнозата на корозионния ефект.
3. Създаден е модел за отчитане на влиянието на корозията върху механичните свойства на стомана S355JR при устойчиво развитие.
4. Установени са формули за прогнозиране на относителната деформация при корозионни категории съгласно стандарт ISO 12944-5.
5. Установени са формули за прогнозиране на якостта при корозионни категории съгласно стандарт ISO 12944-5.

III. ОСНОВНИ ИЗВОДИ:

- 1.** Разработена е съвременна методика за ускорена корозия, която позволява ефективно диагностициране и оценка на степента на развитие на корозията за единица време. Съществено е модернизиран е химическият метод за почистване на корозирали пробни тела от корозионни продукти.
- 2.** Създаден е вероятностен модел чрез използването на стохастичния математически апарат и се доказва, че се получават най-достоверни резултати във времето с оглед вероятностното събитие на изчисленията.
- 3.** Изпитани са 105 пробни тела и са обработени получените части на работната диаграма на материала чрез математическите модели. Изследвани са етапи от работната диаграма без корозия и е обобщена работната диаграма на материала стомана S355JR, получени са надеждни резултати удостоверяващи 84-87% точност.
- 4.** Чрез използването на сканираща електрона микроскопия е проследена промяната в получената корозия, стомана S355JR и на границата между корозията/стоманата, като е извършен анализ и еднозначно се установява, че корозията поема част от напреженията.
- 5.** Анализирани са видовете възможности за моделиране на корозионното въздействие. Създадено е теоретично моделиране на развитието на корозията и са изградени определени видовете корозионни модели. Съставен е теоретичен алгоритъм за изчисление на прогнозата на корозионния ефект.
- 6.** Разработен е модел за отчитане на влиянието на корозията върху механичните свойства на стомана при устойчиво развитие.
- 7.** Установени са формули и зависимости за прогнозиране на относителната деформация и якостта стомана с корозия при различни корозионни категории съгласно стандарт.
- 8.** Влиянието на корозията върху механичните свойства на стоманата е функция на полином от 9-та степен, със съответните частни коефициенти, чието определяне зависи от вида на стоманата и корозионната категория.

IV. НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ:

- 1.** За първи път България е създадена е методиката за ускорена корозия чрез която бяха изпитани механично стомана S355JR, и се получиха резултати показващи възможността за практическо приложение и утилизация на стоманата с корозия.
- 2.** Чрез модернизиране на химичният метод за почистване на корозионни продукти бяха изпитани и намерени отделните части на работната диаграма на материал S355JR . Установява се, че могат да се повторено приложени в зависимост от степента на развитие на корозионното въздействие. Резултатите са докладвани на международни конференции и са публикувани в международни издания.
- 3.** За първи път в България са изследвани отделни области на корозирала строителна стомана S355JR.
- 4.** За първи път в България чрез сканираща електрона микроскопия е изследвана структурата стомана с корозия на S355JR след изпитване на опън и структурата на получената корозия.
- 5.** За първи път в България е уставен модален алгоритъм за изчисляване и прогнозиране на влиянието на корозията върху стоманата.
- 6.** За първи път в България са установени формули за изчисляване и прогнозиране на корозионното влияние върху механичните свойства на стомана S355JR съобразно корозионните категории.
- 7.** Получените изследвания чрез ускорена корозия върху стомана S355JR са полезни за прогнозиране на остатъчната годност на метални крепежи в подземното строителство.
- 8.** Разработена е методика за изчисляване и прогнозиране на якостта, относителната деформация и носимоспособността на корозирала строителна стомана във зависимост от корозионното въздействие във времето (като функция).
- 9.** Чрез получените изследвания се доказва, че могат да се използват корозирани стоманени крепежни елементи повторно, както и възможността за изчислително-практическото определяне на остатъчната експлоатационна годност.

V. СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

- [1] SHOPOV, Antonio. Stochastic way for calculation of strength on construction steel with corrosion. In: XVIII Anniversary International Scientific Conference by Construction and Architecture “VSU’2018“, Sofia, Bulgaria, 2018, 1.1: 413-418.
- [2] SHOPOV, Antonio; BONEV, Borislav. Experimental study of zone of yield strength on corroded construction steel specimens for reuse. In: MATEC Web of Conferences 279. EDP Sciences, 2019. p. 02009.
- [3] SHOPOV, Antonio; BONEV, Borislav. Change of young’s module on steel specimens with corrosion by experiment. International Journal of Modeling and Optimization, 2019, 9.2: 102-107.
- [4] SHOPOV, Antonio; BONEV, Borislav. Study by experimental of the zone of fracture on S355JR steel specimens with corrosion. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2019, 10.2: 751-760.
- [5] SHOPOV, A. and Bonev, B. Ascertainment of the change of the ductility in corroded steel specimens by experiment. International Journal of Civil Engineering and Technology, 10.1, 2019, pp. 1551-1560.
- [6] SHOPOV, A. and Bonev, B. Experimental study of the change of the strengthening zone on corroded steel specimens. International Journal of Civil Engineering and Technology 10.1, 2019, pp. 2285-2293.
- [7] SHOPOV, A. and Bonev, B. Experimental determination on the change of geometrical characteristics and the theoretical ultimate-load capacity of corroded steel samples. International Journal of Civil Engineering and Technology 10.2, 2019, pp.320-329.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] ALMUSALLAM, Abdullah A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. *Construction and Building Materials*, 2001, 15.8: 361-368.
- [2] Mohammad M. Kashani, Adam J. Crewe, Nicholas A. Alexander. *Stress-Strain Response of Corroded Reinforcing Bars under Monotonic and Cyclic Loading*. 15 WCEE, Lisboa, 2012.
- [3] ZHU, Wenjun; FRANÇOIS, Raoul. Effect of corrosion pattern on the ductility of tensile reinforcement extracted from a 26-year-old corroded beam. *Adv Concr Constr*, 2013, 1.2: 121-37.
- [4] ZHU, Wenjun. Effect of corrosion on the mechanical properties of the corroded reinforcement and the residual structural performance of the corroded beams. 2014. PhD Thesis. INSA de Toulouse.
- [5] XU, Yidong. The Corrosion Characteristics and Tensile Behavior of Reinforcement under Coupled Carbonation and Static Loading. *Materials*, 2015, 8.12: 8561-8577..
- [6] DEL ANGEL, Francisco Casanova. Fractal Effect of Corrosion on Mechanical Behavior of Unprotected Structural Steel. In: *Developments in Corrosion Protection*. InTech, 2014.
- [7] APOSTOLOPOULOS, C. A.; PAPADAKIS, V. G. Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*, 2008, 22.12: 2316-2324.
- [8] RANJI, Ahmad Rahbar; ZAKERI, Amir Hamed. Mechanical properties and corrosion resistance of normal strength and high strength steels in chloride solution. *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, 2011, 7.2: 94-100.
- [9] PAIK, Jeom Kee; LEE, Jae Myung; KO, Man Ju. Ultimate shear strength of plate elements with pit corrosion wastage. *Thin-Walled Structures*, 2004, 42.8: 1161-1176.
- [10] FURUKAWA, Seiji; CHUN, Pang-jo. Experimental and numerical analysis of corroded steel plates subjected to compression buckling load.
- [11] OSZVALD, Katalin. Finite element analysis of corroded steel angles under compression. In: *Conference of Junior Researchers in Civil Engineering*, Budapest, Hungary. 2012.
- [12] AHMMAD, Md Mobesher; SUMI, Y. Strength and deformability of corroded steel plates under quasi-static tensile load. *Journal of marine science and technology*, 2010, 15.1: 1-15.
- [13] ORAZEN, Mark ed. *Underground pipeline corrosion Detection, analysis and prevention*. Woodhead Publishing, 2014
- [14] BAJAJ, Srikanth. Effect of corrosion on physical and mechanical properties of reinforced concrete. 2012. PhD Thesis. University of Akron.
- [15] APOSTOLOPOULOS, Ch Alk; PAPADOPOULOS, M. P.; PANTELAKIS, Sp G. Tensile behavior of corroded reinforcing steel bars BSt 500 s. *Construction and building Materials*, 2006, 20.9: 782-789.
- [16] APOSTOLOPOULOS, Charis A.; DEMIS, Sotiris; PAPADAKIS, Vagelis G. Chloride-induced corrosion of steel reinforcement–Mechanical performance and pit depth analysis. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 139-146.
- [17] CHEN, Gang, et al. Experimental study on the properties of corroded steel fibres. *Construction and Building Materials*, 2015, 79: 165-172.
- [18] BEAULIEU, L.-V.; LEGERON, F.; LANGLOIS, S. Compression strength of corroded steel angle members. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66.11: 1366-1373.

- [19] SHETTY, Akshatha; VENKATARAMANA, Katta; NARAYAN, K. S. Effect of corrosion on flexural bond strength. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 2014, 4.3: 123-134.
- [20] Tatsumasa KAITA, Hiroyuki IKEDA, J.M.R.S. Appuhamy, Mitao OHGA, Katashi FUJII, Experimental study on remaining tensile strength of wide steel specimens with different corrosion conditions, *Internet Journal of Society for Social Management Systems*, Issue 6, Vol.1.
- [21] FERNANDEZ, Ignasi; BAIRÁN, Jesús Miguel; MARÍ, Antonio R. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and σ - ϵ behavior. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 772-783.
- [22] SUPRUNCHUK, V. K., et al. A study of the effect of corrosion on mechanical properties of steels St. 2 and St. 3. *Materials Science*, 1967, 3.4: 301-303.
- [23] APPUHAMY, J. M. R. S., et al. Estimation of corrosion-induced strength deterioration of steel bridge plates—an analytical method. *Annual Research Journal of SLSAJ*, 2001, 11: 19-25.
- [24] SHETTY, Akshatha, et al. Performance enhancement of TMT rebar in accelerated corrosion. *Journal of Civil Engineering Research*, 2012, 2.1: 14-17.
- [25] HOU, Yingbo, et al. Experimental investigation on corrosion effect on mechanical properties of buried metal pipes. *International Journal of Corrosion*, 2016, 2016.
- [26] PONJAYANTHI, D.; VINODH, K. R. Effect of corrosion on the mechanical properties of steel reinforcement. *International Journal of Current Research and Review*, 2016, 8.12: 14.
- [27] LEE, Han-Seung; CHO, Young-Sang. Evaluation of the mechanical properties of steel reinforcement embedded in concrete specimen as a function of the degree of reinforcement corrosion. *International Journal of Fracture*, 2009, 157.1: 81-88.
- [28] JURIŠIĆ, Paul; PARUNOV, Joško. Influence of corrosion-related degradation of mechanical properties of shipbuilding steel on collapse strength of plates and stiffened panels. *Towards Green Marine Technology and Transport*, 2015, 427-432.
- [29] QIN, Guang-chong, et al. Study on the degradation of mechanical properties of corroded steel plates based on surface topography. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 125: 205-217.
- [30] CHEN, Y. Y., et al. Corrosion resistance and mechanical properties of low-alloy steels under atmospheric conditions. *Corrosion Science*, 2005, 47.4: 1001-1021.
- [31] FARGAS, G.; ANGLADA, M.; MATEO, A. Effect of the annealing temperature on the mechanical properties, formability and corrosion resistance of hot-rolled duplex stainless steel. *Journal of materials processing technology*, 2009, 209.4: 1770-1782.
- [32] DENG, Bo, et al. Effect of thermal cycles on the corrosion and mechanical properties of UNS S31803 duplex stainless steel. *Corrosion Science*, 2009, 51.12: 2969-2975.
- [33] ALBRECHT, P., et al. Remaining fatigue strength of corroded steel beams. In: *International Association for Bridge and Structural Engineering Workshop*. 1990. p. 71-84.
- [34] LI, J. F., et al. Influence of retrogression temperature and time on the mechanical properties and exfoliation corrosion behavior of aluminium alloy AA7150. *Materials characterization*, 2009, 60.11: 1334-1341.
- [35] FRANÇOIS, Raoul; KHAN, Inamullah; DANG, Vu Hiep. Impact of corrosion on mechanical properties of steel embedded in 27-year-old corroded reinforced concrete beams. *Materials and structures*, 2013, 46.6: 899-910.

- [36] OK, Duo; PU, Yongchang; INCECIK, Atilla. Computation of ultimate strength of locally corroded unstiffened plates under uniaxial compression. *Marine Structures*, 2007, 20.1: 100-114.
- [37] AMLEH, Lamy; GHOSH, Alaka. Modeling the effect of corrosion on bond strength at the steel–concrete interface with finite-element analysis. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, 33.6: 673-682.
- [38] LI, Fumin, et al. Numerical Simulation Method for Fracture Effect of Corroded Steel Strand Under Tension. 2014.
- [39] SANDAMALI, W. K. N.; WIJESENA, H. P.; APPUHAMY, J. M. R. S. Prediction of Residual Buckling Strength in Corroded Steel Bridge Members. 2015.
- [40] GENEL, Kenan; DEMIRKOL, Mehmet; GÜLMEZ, Turgut. Corrosion fatigue behaviour of ion nitrided AISI 4140 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 288.1: 91-100.
- [41] CINITHA, A.; UMESHA, P. K.; IYER, Nagesh R. An overview of corrosion and experimental studies on corroded mild steel compression members. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 18.6: 1735-1744.
- [42] OKAZAKI, Yoshimitsu, et al. Corrosion resistance and corrosion fatigue strength of new titanium alloys for medical implants without V and Al. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 213.1-2: 138-147.
- [43] OLIVEIRA, F., et al. Corrosion–fatigue properties of a 4340 steel coated with Colmonoy 88 alloy, applied by HVOF thermal spray. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 140.2: 128-135.
- [44] MURTAZA, G.; AKID, R. Empirical corrosion fatigue life prediction models of a high strength steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 67.5: 461-474.
- [45] CHITTY, J., et al. Influence of electroless Ni-P deposits on the corrosion–fatigue properties of an AISI 1045 steel. *Thin solid films*, 1997, 308: 430-435.
- [46] APOSTOLOPOULOS, Ch Alk. Mechanical behavior of corroded reinforcing steel bars S500s tempcore under low cycle fatigue. *Construction and Building Materials*, 2007, 21.7: 1447-1456.
- [47] AZAR, V.; HASHEMI, B.; YAZDI, Mahboobeh Rezaee. The effect of shot peening on fatigue and corrosion behavior of 316L stainless steel in Ringer's solution. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204.21: 3546-3551.
- [48] PREVÉY, Paul S.; CAMMETT, John T. The influence of surface enhancement by low plasticity burnishing on the corrosion fatigue performance of AA7075-T6. *International Journal of Fatigue*, 2004, 26.9: 975-982.
- [49] SHOPOV, Antonio; BONEV, Borislav. Study by experimental of the zone of fracture on S355JR steel specimens with corrosion. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, 10.2: 751-760.
- [50] KASHANI, Mohammad M.; CREWE, Adam J.; ALEXANDER, Nicholas A. Nonlinear cyclic response of corrosion-damaged reinforcing bars with the effect of buckling. *Construction and Building Materials*, 2013, 41: 388-400.
- [51] LUTES, L. D., et al. Assessing the compressive strength of corroded tubular members. *Applied ocean research*, 2001, 23.5: 263-268.
- [52] ARSENIIEV, Dmitry G.; IVANOV, Vladimir M.; KORENEVSKY, Maxim L. Adaptive Stochastic Methods: In *Computational Mathematics and Mechanics*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2018.

- [53] LASEBIKAN, B. A.; AKISANYA, A. R.; DEANS, W. F. Autoclave design for high pressure-high temperature corrosion studies. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2015, 13.4: 539-555.
- [54] AVELDAÑO, Raquel R.; ORTEGA, Néstor F. Behavior of concrete elements subjected to corrosion in their compressed or tensed reinforcement. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 822-828.
- [55] LI, Fumin; QU, Yaxu; WANG, Jianghao. Bond life degradation of steel strand and concrete under combined corrosion and fatigue. *Engineering Failure Analysis*, 2017.
- [56] WAHAB, M. A.; SAKANO, M. Corrosion and biaxial fatigue of welded structures. *Journal of materials processing technology*, 2003, 143: 410-415.
- [57] KIM, In-Tae, et al. Effect of corrosion on the tension behavior of painted structural steel members. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 133: 256-268.
- [58] ПОПОВ, Александър: Вероятности методи при оценяване на механични свойства на желязовъглеродни стомани. Институт по механика при БАН, 2015.
- [59] EVANS, Lawrence C. An introduction to stochastic differential equations. American Mathematical Soc., 2012.
- [60] KLEBANER, Fima C. Introduction to stochastic calculus with applications. World Scientific Publishing Company, 2012.
- [61] NAKAI, Tatsuro; MATSUSHITA, Hisao; YAMAMOTO, Norio. Effect of pitting corrosion on strength of web plates subjected to patch loading. *Thin-walled structures*, 2006, 44.1: 10-19.
- [62] SHENG, Jie; XIA, Junwu. Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel. *Construction and Building Materials*, 2017, 131: 90-100.
- [63] BALUSAMY, T.; KUMAR, Satendra; NARAYANAN, TSN Sankara. Effect of surface nanocrystallization on the corrosion behaviour of AISI 409 stainless steel. *Corrosion Science*, 2010, 52.11: 3826-3834.
- [64] TREFETHEN, Lloyd N. Approximation theory and approximation practice. Siam, 2013.
- [65] BARILE, C.; CASAVOLA, C.; PAPPALETTERE, C. Corrosion effects on mechanical properties of sintered stainless steels. *Procedia Structural Integrity*, 2017, 5: 195-201.
- [66] KARAGAH, Hossein, et al. Experimental investigation of short steel columns with localized corrosion. *Thin-walled structures*, 2015, 87: 191-199.
- [67] ЦЕНОВ, Цветан. Корозия на материалите. Албатрос. 2006.
- [68] AHMAD, Zaki. Principles of corrosion engineering and corrosion control. Elsevier, 2006.
- [69] XU, Fangyuan, et al. Experimental Study on Corrosion and Mechanical Behavior of Main Cable Wires Considering the Effect of Strain. *Materials*, 2019, 12.5: 753
- [70] RAMKUMAR, K. Devendranath, et al. Investigations on the microstructure, tensile strength and high temperature corrosion behaviour of Inconel 625 and Inconel 718 dissimilar joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 25: 306-322.
- [71] BABOIAN, Robert. Corrosion tests and standards: application and interpretation. ASTM international, 2005.
- [72] JONES, Russell H. (ed.). Environmental effects on engineered materials. CRC Press, 2001.
- [73] SHI, Cheng, et al. Numerical investigation of H-shaped short steel piles with localized severe corrosion. *Engineering structures*, 2014, 73: 114-124.
- [74] CERIT, Muhammet. Numerical investigation on torsional stress concentration factor at the semi elliptical corrosion pit. *Corrosion Science*, 2013, 67: 225-232.
- [75] КИСЛЯКОВ, Сава. Съпротивление на материалите. Техника, 1976.

- [76] PODSKREBKO, M. D. *Soprotivlenie materialov. Strength of materials*. Moscow, Vysshaya shkola Publ, 2007.
- [77] AHN, Jin-Hee, et al. Residual compressive strength of inclined steel tubular members with local corrosion. *Applied Ocean Research*, 2016, 59: 498-509.
- [78] LEYGRAF, Christofer, et al. *Atmospheric corrosion*. John Wiley & Sons, 2016.
- [79] MARCUS, Philippe (ed.). *Corrosion mechanisms in theory and practice*. CRC press, 2011.
- [80] POWELL, Michael James David. *Approximation theory and methods*. Cambridge university press, 1981.
- [81] SHOPOV, Antonio; BONEV, Borislav. Experimental study of zone of yield strength on corroded construction steel specimens for reuse. In: *MATEC Web of Conferences 279*. EDP Sciences, 2019. p. 02009.
- [82] APOSTOLOPOULOS, C. A.; PAPADOPOULOS, M. P. Tensile and low cycle fatigue behavior of corroded reinforcing steel bars S400. *Construction and Building Materials*, 2007, 21.4: 855-864.
- [83] OSZVALD, Katalin; TOMKA, Pál; DUNAI, László. The remaining load-bearing capacity of corroded steel angle compression members. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 120: 188-198.
- [84] KŘIVÝ, Vít; URBAN, Viktor; KUBZOVÁ, Monika. Thickness of Corrosion Layers on Typical Surfaces of Weathering Steel Bridges. *Procedia Engineering*, 2016, 142: 56-62.
- [85] PINKUS, Allan. *N-widths in Approximation Theory*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [86] BRAESS, Dietrich. *Nonlinear approximation theory*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [87] JONES, Russell H., et al. (ed.). *Stress-Corrosion Cracking, Materials performance and evaluation*. ASM international, 2017.
- [88] SYED, S. Atmospheric corrosion of materials. *Emirates Journal for Engineering Research*, 2006, 11.1: 1-24.
- [89] SHOPOV, Antonio. Stochastic way for calculation of strength on construction steel with corrosion. In: *XVIII Anniversary International Scientific Conference by Construction and Architecture "VSU'2018"*, Sofia, Bulgaria, 2018, 1.1: 413-418.
- [90] CHEN, Hui, et al. Experimental Investigation into Corrosion Effect on Mechanical Properties of High Strength Steel Bars under Dynamic Loadings. *International Journal of Corrosion*, 2018, 2018.
- [91] SHOPOV, Antonio; BONEV, Borislav. Change of young's module on steel specimens with corrosion by experiment. *International Journal of Modeling and Optimization*, 2019, 9:2, 102-107.
- [92] KOCANĀDA, Dorota, et al. Fatigue Behaviour of S235JR Steel after Surface Frictional-Mechanical Treatment in Corrosive Environment. In: *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications, 2014, 105-112.
- [93] KULICKI, J. M., et al. *Guidelines for evaluating corrosion effects in existing steel bridges*. 1990.
- [94] APOSTOLOPOULOS, Ch, et al. Characteristic defects-corrosion damage and mechanical behavior of dual phase rebar. *Materials Physics & Mechanics*, 2017, 30.1.
- [95] JIA, Chen, et al. Incipient corrosion behavior and mechanical properties of low-alloy steel in simulated industrial atmosphere. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 1242-1252.
- [96] LEYGRAF, Christofer, et al. *Atmospheric corrosion*. John Wiley & Sons, 2016.

- [97] SEMICONDUCTOR, O. N. LM317 datasheet. 2016.
- [98] RADER, David J. Deterministic operations research: models and methods in linear optimization. John Wiley & Sons, 2010.
- [99] DAVIS, Mark HA. Markov models & optimization. Routledge, 2018.
- [100] CASSANDRAS, Christos G.; LYGEROS, John. Stochastic hybrid systems. CRC Press, 2006.
- [101] HARRIS, Jonathan M. Basic principles of sustainable development. Dimensions of Sustainable Development, 2000, 21-41.
- [102] GRIFFITH, Alan Arnold. VI. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 1921, 221.582-593: 163-198.
- [103] HYNDMAN, Rob J.; ATHANASOPOULOS, George. Forecasting: principles and practice. OTexts, 2018.
- [104] KIM, Jae Kwang; SHAO, Jun. Statistical methods for handling incomplete data. Chapman and Hall/CRC, 2013.
- [105] АПОСТОЛОВ, А. Разработване на проекти за устойчиво развитие. Проджекта, София, 2005.
- [106] КАЛИНОВ, Красимир. Теория на вероятностите и статистика. Нов Български Университет, 2002.
- [107] SHOPOV, A. and Bonev, B. Ascertainment of the change of the ductility in corroded steel specimens by experiment. International Journal of Civil Engineering and Technology, 10.1, 2019, pp. 1551-1560.
- [108] SHOPOV, A. and Bonev, B. Experimental study of the change of the strengthening zone on corroded steel specimens. International Journal of Civil Engineering and Technology 10.1, 2019, pp. 2285-2293.
- [109] SHOPOV, A. and Bonev, B. Experimental determination on the change of geometrical characteristics and the theoretical ultimate-load capacity of corroded steel samples. International Journal of Civil Engineering and Technology 10.2, 2019, pp.320-329.
- [110] ROMANOFF, Melvin. Underground corrosion. National Bureau of Standards, 1957