



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
Факултет по транспорта

маг. инж. Камен Иванов Пенков

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЯКОСТНО-ДЕФОРМАЦИОННИТЕ
СВОЙСТВА НА ПРЪТИ ОТ СТОМАНА S235
С РАЗЛИЧНА СТЕПЕН НА КОРОЗИЯ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1. Машинно инженерство

Научна специалност: Строителна механика и съпротивление на материалите

Научни ръководители:
доц. д-р инж. Веселин Цонев
доц. д-р инж. Николай Николов

СОФИЯ, 2021 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Съпротивление на материалите“ към Факултет по транспорта на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 19.05.2021 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 20.09.2021 г. от 13,00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.1-41 / 25.06.2021 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. дн инж. Иван Кралов – председател
2. доц. д-р инж. Красимир Неделчев – научен секретар
3. проф. дн инж. Петър Колев
4. проф. д-р инж. ик. Красимир Кръстанов
5. проф. д-р инж. Николай Божков

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Николай Божков
2. доц. д-р инж. Красимир Неделчев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по транспорта на ТУ-София, блок № 9, кабинет № 9310.

Дисертантът е докторант в самостоятелна форма на обучение към катедра „Съпротивление на материалите“ на Факултет по транспорта. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Камен Пенков

Заглавие: Изследване на якостно-деформационните свойства на пръти от стомана S235 с различна степен на корозия

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

За да се гарантира безопасността на стоманените и стоманобетонните конструкции, трябва да се изключи рискът от разрушаване на конструкционните елементи по време на експлоатационния срок. Едно от предизвикателствата пред съвременното машиностроене е повишаването на надеждността на конструкционните елементи, подложени на корозионно въздействие, при едновременно намаляване на тяхната металоемкост.

Корозията може да доведе до неочаквани проблеми и даже до крехко разрушаване поради намаляване на напречното сечение. Затова познаването на влиянието на корозията върху механичните свойства е изключително важно за правилната оценка на остатъчния ресурс на корозирали стоманени елементи. Използването на ускорени методи за корозия позволява да се създават методи и модели, с които да се прогнозира поведението на стоманата в естествена работна среда, където процесите на корозия често протичат значително по-бавно.

За определяне на влиянието на корозията върху механичните свойства на стоманите се извършват стандартни механични изпитвания. Изработват се групи от пробни тела, които се подлагат на корозионно въздействие по различни методи и за различно време, след което се изпитват и резултатите се сравняват с тези на некорозирали пробни тела.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е *да се изследва влиянието на корозията върху якостно-деформационните свойства на горещовалцувани и студеноизтеглени пръти от стомана S235.*

За изпълнението на тази цел се поставят се следните задачи:

- Да се проектира и изработи машина за ускорена корозия на пробни тела чрез периодично потапяне в солен разтвор;
- Да се разработи методика за получаване на корозирали пробни тела с машината за ускорена корозия;
- Да се усъвършенства налична система за механични изпитвания на материалите при статично натоварване;
- Да се разработи методика за работа с усъвършенстваната система за механични изпитвания;
- Да се определят якостно-деформационните свойства на некорозирали и корозирали пробни тела от стомана S235, получени чрез атмосферна корозия и чрез периодично потапяне в солен разтвор;
- Да се определи влиянието на пластичната деформация, причинена от студено изтегляне, върху корозионното поведение и якостно-деформационните свойства на изследвания материал;

- Да се сравнят и анализират резултатите от изпитването на корозирали при различни условия пробни тела и да се предложи метод за прогнозиране влиянието на атмосферната корозия върху якостно-деформационните свойства на стомана.

Научна новост

Проектирана и изработена е машина за ускорена корозия на пробни тела чрез периодично потапяне в солен разтвор. Разработена е методика за работа с машината и за получаване на корозирали пробни тела.

Предложена е зависимост за прогнозиране на влиянието на атмосферната корозия върху якостните свойства на стомана S235.

Практическа приложимост

Усъвършенствана е налична система за механични изпитвания на материалите при статично натоварване. Разработена е методика за работа със системата и за изпитване на опън.

Определени са якостно-деформационните свойства на некорозирали и корозирали пробни тела от стомана S235, получени чрез атмосферна корозия и чрез периодично потапяне в солен разтвор.

Разработена е методика за определяне на загубения диаметър от атмосферна корозия, чрез изпитване с периодично потапяне в солен разтвор.

Апробация

Всички експерименти са проведени в лабораториите на катедра „Съпротивление на материалите“ при спазване на съответните изисквания.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 4 броя научни статии. Те са докладвани на конференциите *TechSys* и *BulTrans* през 2019 и 2020 г. и са публикувани в *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Scopus SJR = 0,198 (2020)).

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 112 страници, като включва увод, 5 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 69 литературни източници, като всичките са на латиница. Работата включва общо 52 фигури и 21 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

1. Корозия на металите - определение

Корозията е самопроизволно разрушаване на металите в резултат на физико-химическото им взаимодействие със заобикалящата ги среда. Явлението корозия е хетерогенна химична или електрохимична реакция, протичаща на фазовата граница метал – заобикаляща го течна или газова среда, в резултат на която металът преминава в окислено (йонно) състояние. Причина за корозията на металите е тяхната термодинамична неустойчивост в различни среди при определени външни условия. В природата металите обикновено се срещат като съединения - оксиди, сулфиди, карбонати и др. Металургията, като изразходва определена енергия, получава метали от техните природни съединения. Корозията е противоположен процес – в резултат от нея металите преминават в съединения (оксиди, хидроксиди, сулфиди и др.), т.е. тя води до възстановяване на изходните съединения, които са термодинамично по-устойчиви от съответните метали. Корозионният процес протича с намаляване на свободната енергия и затова се извършва самопроизволно.

2. Класификация на корозионните процеси

Класификацията на корозионните процеси може да се извърши по механизма на процеса, по условията на протичане на корозията и по характера на разрушаване [4].

По механизма на процеса се различават два типа корозия на металите:

- Химична корозия – взаимодействието на метала с корозионната среда се извършва по механизма на хетерогенните химични реакции;
- Електрохимична корозия – взаимодействието на метала със заобикалящата го течна електролитна среда протича по електрохимичен механизъм.

В зависимост от *условията на протичане* видовете корозия са:

- Атмосферна корозия – корозия на металите в атмосферата. Това е най-разпространеният вид корозия, тъй като основната част от металните конструкции и съоръжения се експлоатират при атмосферни условия;
- Корозия в електролити – корозия на металите в течни проводящи среди. В зависимост от характера на средата този тип корозия може да бъде киселинна, алкална, солева, морска и др.;
- Други видове, които не се разглеждат в настоящия труд: газова корозия; корозия в неелектролити; почвена корозия; електрокорозия; контактна корозия; корозия под напрежение; корозионна ерозия; корозионна кавитация; корозия в цепнатини; биокорозия.

В зависимост от *характера на разрушаването* видовете корозия са:

- Обща корозия – разпространява се по цялата метална повърхност в контакт с корозионната среда. Може да бъде равномерна и неравномерна;

- Локална корозия – засяга само някои участъци от повърхността на метала. Може да бъде на петна (на сравнително големи по площ, но недълбоки участъци), язвена (във вид на отделни малки по площ, но дълбоки поражения), питингова (пораженията са на отделни точки). Други видове локална корозия са интеркристална, подповърхностна, избирателна и др.

Когато корозията се развива под действие на обичайната за обекта работна среда, говорим за *експлоатационна корозия*. Обикновено тя е бавно протичащ процес, което затруднява получаването на представителна група от корозирани пробни тела за механични изпитвания. За да се улесни този процес, често се предпочита корозията да се ускори, като пробните тела се поставят в среда, значително по-агресивна от естествената работна среда. Получава се *ускорена корозия*. Когато създаването или поддържането на експлоатационна среда в лабораторни условия не е целесъобразно, се създават условия, имитиращи реалните. Получава се *моделна корозия*.

3. Атмосферна корозия

Най-разпространеният вид корозия е атмосферната корозия. Тя е природен феномен и основната причина за влошаване на механичните характеристики на стоманените конструкционни елементи. В резултат на валежите или температурните промени през денонощието, върху повърхността на металите се образува воден слой в резултат на което те корозират. Атмосферната корозия зависи от много външни фактори – влага, температура, ветрове, наличие на соли, рН и други условия зависещи климатичните особености на местоположението. В [7] е предложена таблица с 14 държави, всяка разделена на 1-9 зони, за които са дадени видът и типът на атмосферата, локацията, съдържанието на SO_2 и Cl . С помощта на такъв вид информация се определят коефициенти, заложи в уравнения за дългосрочно прогнозиране на загубата на маса при корозия на метали.

Атмосферната корозия е особено съществена за стоманените и стоманобетонните конструкции, работещи на открито – мостове, сгради, електропроводи, тръбопроводи и др. Стоманените конструкции обикновено се защитават с антикорозионни покрития и/или други методи. Антикорозионните покрития обикновено имат определен живот, след което, ако не бъдат подновени, започва прогресивно нарастваща с времето и неравномерна корозия. Проблемът е особено значим при стоманобетонните конструкции, тъй като влаганата в тях армировъчна стомана корозира лесно, а бетонът често не я защитава достатъчно от въздействията на околната среда. Така механичните свойства на стоманобетонната конструкция се влошават с времето, като намалението е пропорционално на корозията на вложената армировъчна стомана.

Атмосферната корозия обикновено е неравномерна и създава петна, язви и точки (питинг).

4. Оценка на механичните свойства при корозия в естествена среда

Когато трябва да се оценят механичните свойства на реални конструкции, работили продължително време в естествена среда и корозирали, пробните тела се получават чрез отделяне от изследваната конструкция. Например, вадят се армировъчните пръти от стоманобетонни конструкции, престояли продължително време (20-40 години) в естествена или изкуствена агресивна среда [8,9] или се режат части от стоманени конструкции, работили при подобни условия [10]. Когато липсва контролна група пробни тела, които не са били изложени на корозия, сравнението и оценката на механичните свойства се правят между пробни тела, претърпели различна по степен и вид корозия. Началните механични свойства могат да се прогнозират посредством регресионен анализ [11] или чрез отделно изпитване. Така се получава представа за последствията от корозионното въздействие.

Публикуваните резултати еднозначно показват, че влиянието на корозията върху границата на провлачане, якостта на опън и пластичните свойства е много голямо [10]. Под действие на морската вода, с удължаване на корозионното въздействие границата на провлачане и якостта на опън се понижават, а пластичните деформации до разрушаване намаляват [12].

Получаването на корозирали пробни тела чрез излагане на естествена или близка до естествената изкуствена работна среда е неприложимо за нови конструкции, тъй като би отнело време, равно на експлоатационния им срок. Това налага използване на ускорени методи за изследване.

5. Методи за създаване на ускорена корозия

Ускорената корозия се различава от експлоатационната, съответно последствията от нея (механичното поведение на материала) също могат да бъдат различни. В дисертационния труд подробно са проучени и представени различните методи за създаване на ускорена корозия:

- *Потопяне в корозионен разтвор.* Това е технически най-лесният за реализиране способ за ускорена корозия. Времето за достигане на желаната степен на корозия зависи от химичния състав на разтвора и от корозионната устойчивост на метала [16-29]. Този способ не се предпочита при цилиндрични пробни тела и при разтвори, близки до естествената морска вода, защото скоростта на корозия е твърде малка [30].
- *Галваностатичен метод.* Корозионния процес се ускорява чрез използване на външен източник на постоянен ток и анодно разтваряне на стоманата. Пробното тяло се свързва към положителния полюс на източника на постоянен ток (анод), а към отрицателния се свързва пластина от неръждаема стомана или друг инертен в случая метал. Най-често се използва разтвор на 5% NaCl и плътност на тока $0,1 \div 20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ [1, 11, 31-33]. Получават се сравнително равномерно разпределени корозионни поражения, което прави метода неподходящ при изследвания, свързани с атмосферна корозия – там пораженията са силно неравномерни.

- *Корозия в солена мъгла.* Това е най-простият и най-разпространен метод за получаване на корозия в изкуствена атмосфера (Salt Spray Test). Солената мъгла се получава с помощта на специални камери с автоматично управление [8, 9, 34, 35]. Този метод е масово възприет като метод за изпитване на бои и други антикорозионни покрития [34, 37], предпочита се и при изследвания на стоманобетон [36]. Създадената изкуствена атмосфера е постоянна във времето, докато в естествена атмосферна среда температурата, влажността и другите описващи средата параметри имат променлив, много често цикличен характер. Това често се поставят под съмнение получените резултати.
- *Циклично корозионно изпитване (Cyclic Corrosion Testing, CCT-тест).* Това е най-добрият ускорен метод за предизвикване на корозия в условия, наподобяващи реална работна среда с естествена атмосфера. Обикновено за целта се използват специални камери, в които върху пробните тела периодично се впръсква корозионен разтвор. Управляват се множеството параметри, влияещи на процеса – температура и влажност на въздуха, параметри на разтвора, ултравиолетово облъчване. Възможно е да се програмират разнообразни цикли, с които да се симулират най-различни експлоатационни условия. В резултат устройствата, с които се реализира корозионното изпитване имат голяма сложност и висока цена [38]. Опростена алтернатива за реализиране на CCT-тест е периодичното потапяне в солен разтвор (alternate immersion test, AI-test), EN ISO 11130:2018 [39]. Периодичното потапяне и изваждане на пробните тела се реализира сравнително лесно, чрез механично преместване на пробните тела [40] или чрез изпомпване на корозионния разтвор [41]. Този метод има много от предимствата на по-сложните CCT-тестове – голяма скорост на корозия и малка продължителност на изпитването; корозията е неравномерна, което е важно при оценка на механичните свойства на корозиралите пробни тела [5, 16, 40, 41, 43-48].
- *Scab изпитване.* Пробните тела се поставят на открито под ъгъл 45° , с южно изложение. Два пъти седмично се напръскват с разтвор на 3% NaCl. Методът е стандартизиран, например БДС EN ISO 11474:2014 [49]. Това е най-лесният за реализиране метод за ускорена корозия, при който са налице цикли на омокряне/изсъхване, на изменение концентрацията на разтвора, на температурата и на ултравиолетовото слънчево лъчение [50].
- *Имитиране на корозия.* Материалът се отнема от повърхността на пробно тяло с помощта на пробивна машина с цифрово-програмно управление. Полученият релеф е много различен от всичко, което би могло да се получи чрез корозия. Пробните тела обаче се получават изключително бързо, лесно и евтино, и са 100% идентични с компютърните 3D геометрични модели. Това е полезно при апробиране на компютърни модели, симулиращи по метод на крайните елементи различни ефекти, причинени от корозията. Такова геометрично съвпадение не може да се получи по друг начин, макар че такива изследвания се правят и с помощта на сканираща апаратура [50, 51].

6. Избор на метод за ускорена корозия

Най-често използваните методи за ускорена корозия са потапяне в корозионен разтвор и галваностатичен метод. Те дават добра равномерност на разпределението на корозионните поражения, което се отразява на механичното поведение на корозиранияте пробни тела.

В [31] е изследвано влиянието на корозията върху кривата на деформиране при опън на стоманени телове при два метода на корозия – циклично намокряне/сушене и галваностатичен метод. При първия се развива питинг-корозия, а при втория корозията е сравнително равномерна. Показано е, че методът за ускорена корозия оказва голямо влияние върху механичните свойства на изследваните метали. Питингът води до крехко поведение на материала. Този ефект е значително по-слабо изразен при равномерната електрохимична корозия. Подобни са изводите, получени при изследване на пръти от оребрена армировъчна стомана [2].

Сравненията показват [2,51], че методите за ускорена корозия трябва да се избират много внимателно. Методите, които създават неравномерни поражения, като цяло са по-сложни и изискват повече време, средства и усилия, но често са значително по-близки до реалната работна среда.

7. Връзка между корозионното поведение в действителната работна среда и корозионното поведение при ускорените тестове

Въпреки приемането, че солената мъгла симулира качествено естествената корозия в морското крайбрежие, тази среда причинява много силна корозионна атака за кратко време. Засега няма директна корелация между ускореното лабораторно изпитване в солена мъгла и естествения корозионен процес, така че да се определи реална продължителност на лабораторното изпитване, а задоволителни връзки между естествената и изкуствената корозия не са установени [8, 9, 11]. Подобни са заключенията и при цикличното корозионно изпитване [37, 52]. Като цяло, в литературата са малко опитите да се направи връзка между корозионното поведение в действителната работна среда и корозионното поведение при ускорените тестове. Вместо това се търси връзка между степента на корозия (загубата на тегло) и свойствата на материала, като се предполага, че при еднаква степен на корозия изменението в свойствата ще бъде подобно [5, 11, 33].

8. Апаратура за механични изпитвания при статично натоварване

Инженерният подход за якостно-деформационен анализ се основава на стандартни механични изпитвания. Пробно тяло, изработено от изследвания материал, се подлага на чист опън (чист натиск), чисто срязване, чисто огъване и др. Осевата сила, с която се натоварва пробното тяло се увеличава плавно до неговото разрушаване. Непрекъснато се измерват и записват стойностите на силата и деформациите. Получените резултати се използват за определяне на търсените механични характеристики.

За провеждане на механични изпитвания при статично натоварване, в съвременните лаборатории се използват изпитвателни машини със серво-управляеми натоварващи механизми, които позволяват да се осигурява прецизно натоварване [53, 54]. Този тип изпитвателни машини непрекъснато се усъвършенстват чрез въвеждането на електронни устройства и програмни продукти [55], които позволяват: автоматично управление на експеримента; надежден контрол на параметрите при продължителен експеримент; регистриране и визуализиране на изследваните параметри; възможност за програмиране на цикъла на натоварване.

За регистриране на деформациите на пробното тяло, най-често се използват екстензометри, които преобразуват механичната деформация в пропорционален електрически сигнал [56, 57].

Техниката за изпитване е сложна, специфична и скъпа. В много случаи е целесъобразно купуването на отделни компоненти и собствено разработване на останалите елементи и софтуерни продукти, според целите на изследването. Така научноизследователският екип има възможност да поддържа и усъвършенства техниката в хода на изпитванията. Освен това, изследователите могат по-добре да оценят въздействието на изпитвателната техника върху експерименталните резултати, което е предпоставка за по-точното им тълкуване. Този подход е използван в настоящия дисертационен труд.

9. Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е *да се изследва влиянието на корозията върху якостно-деформационните свойства на горещовалцувани и студеноизтеглени пръти от стомана S235.*

За изпълнението на тази цел се поставят се следните задачи:

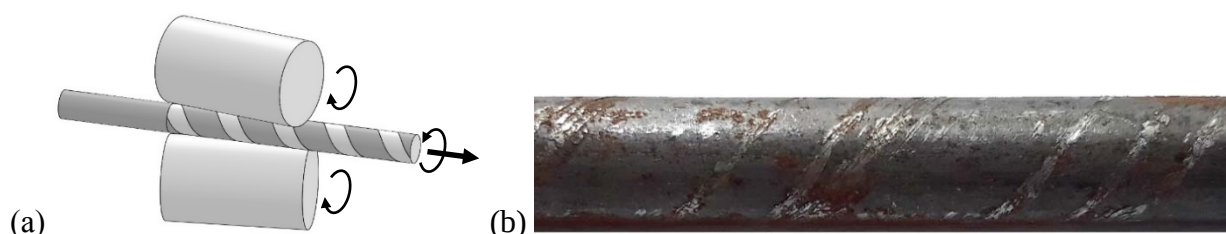
- Да се проектира и изработи машина за ускорена корозия на пробни тела чрез периодично потапяне в солен разтвор;
- Да се разработи методика за получаване на корозирали пробни тела с машината за ускорена корозия;
- Да се усъвършенства налична система за механични изпитвания на материалите при статично натоварване;
- Да се разработи методика за работа с усъвършенстваната система за механични изпитвания;
- Да се определят якостно-деформационните свойства на некорозирали и корозирали пробни тела от стомана S235, получени чрез атмосферна корозия и чрез периодично потапяне в солен разтвор;
- Да се определи влиянието на пластичната деформация, причинена от студено изтегляне, върху корозионното поведение и якостно-деформационните свойства на изследвания материал;
- Да се сравнят и анализират резултатите от изпитването на корозирали при различни условия пробни тела и да се предложи метод за прогнозиране влиянието на атмосферната корозия върху якостно-деформационните свойства на стомана.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

1. Особенности на горещото валцоване и студеното изтегляне

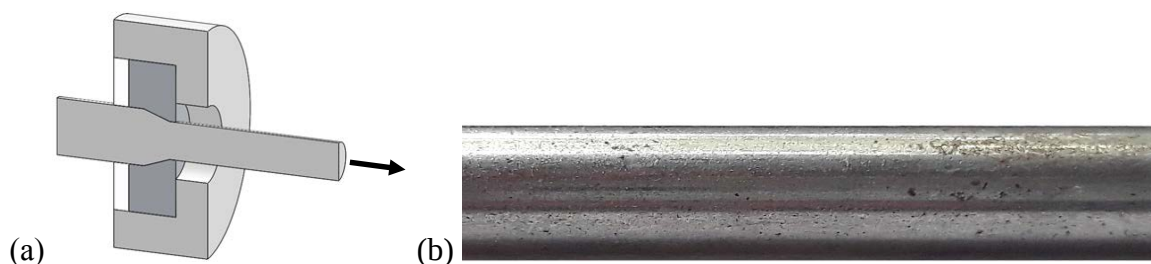
Механичната обработка влияе на корозионната устойчивост на стоманите [58]. Горещата пластична деформация се осъществява при температурно-скоростни условия, които водят до пълна рекристализация по време на процеса и не предизвиква деформационно уякчаване на металите и сплавите. Студената пластична деформация се осъществява при температурно-скоростни условия, които не позволяват да протече рекристализация. Това води до значително деформационно уякчаване на металите и сплавите [59].

Горещото валцоване (фиг. 13(a)) е процес, който премахва дефектите от предходните технологични операции при производството на заготовката и постига необходимата форма и качество на повърхността. Върху повърхността на заготовката остава спираловидна следа, фиг. 13(b).



Фигура 13. Горещо винтово валцоване: (a) Принципна схема на процеса; (b) Снимка на повърхността на готовия прът, от който са изработени изпитаните пробни тела.

Изтеглянето през дюза (фиг. 14(a)) е технологичен процес за обработване на металите чрез пластична деформация, при който заготовките се деформират чрез принудителното им прекарване през отвор под действие на сила на опън [59]. Постигат се много точни форма и размери на напречното сечение на изтеглените изделия, както и чиста и гладка повърхност – фиг. 14(b).



Фигура 14. Студено изтегляне: (a) Схема на процеса изтегляне през дюза; (b) Снимка на повърхността на готовия прът, от който са изработени изпитаните пробни тела.

Пластичната деформация и деформационното уякчаване при студеното изтегляне променят значително кривата на деформиране на материала и якостно-деформационните му характеристики. Променените структура и повърхност се отразяват и на корозионното му поведение.

2. Корозия на металите и сплавите

В дисертационният труд са разгледани теоретичните аспекти на:

- Механизъм на електрохимичната корозия;
- Методи на корозионно изпитване – лабораторни изпитвания (тестове), пилотни тестове, полеви изпитвания;
- Атмосферна корозия – видове атмосфери и среди, теория на атмосферната корозия, променливи при атмосферната корозия, корозионност на атмосферата и скорост на корозия, атмосферна корозия на стомани;
- Състав на ръждата;
- Влияние на ръждата върху скоростта на корозия;
- Механизъм на разтварянето;
- Изпитване на атмосферна корозия.

3. Корозионно изпитване с периодично потапяне в солен разтвор

Методът е стандартизиран в EN ISO 11130:2018 [39]. Тъй като това е основен метод, използван в настоящият труд за ускорено получаване на корозирали пробни тела, той е разгледан подробно в дисертацията. Основните елементи на този метод са:

- *Същност*: Период на потапяне на пробни тела за изпитване в солен разтвор, е последван от изваждане и период на изсушаване. Цикълът потапяне/изсушаване се повтаря с дадена честота за даден период.
- *Разтвор*: Използват се реагенти с призната химическа честота. За симулиране на корозионното въздействие на морска среда се използва неутрален солен разтвор, с концентрация на NaCl $35 \text{ g/l} \pm 1 \text{ g/l}$ в дестилирана вода с проводимост не по-висока от 2 mS/m при $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Водородният показател pH е в интервала 6 – 7. Обемът на разтвора е не по-малък от 3 l/dm^2 от повърхността на изпитваните пробни тела.
- *Апаратура*: Включва система за автоматично непрекъснато изпълнение на циклите, като времето за пълното потапяне или изваждане е под 2 min; система за задържане на пробните тела от инертна пластмаса или стъкло, която гарантира липсата на контакт между пробните тела, добро оттичане на разтвора умерена циркулация на въздуха при изсушаване; пластмасов или стъклен съд за разтвора; система за постигане на умерени и равномерни условия на изсушаване, в рамките на около 40 min, която осигурява температура на въздуха $27 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и относителна влажност $45 \% \pm 6 \%$.
- *Процедура*: 10 min потапяне е последвано от изваждане и 50 min изсушаване. Температурата на разтвора е $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, продължителност на изпитване обикновено между 20 и 90 дни. Изпитват се минимум по три прочистени пробни тела за изпитване. В потопено положение, пробните тела са напълно покрити от разтвора до минимална дълбочина от 10 mm. Разтворът се сменя на всеки 168 h или когато pH се промени с повече от 0,3 от първоначалната стойност. След завършване на изпитването пробните тела се почистват и изсушават.

- *Оценяване на резултатите:* Използват се критериите външен вид, брой и разпределение на корозионните поражения, промяната в масата; промени в механичните свойства.

4. Отстраняване на корозионните продукти от пробните тела

Методът е стандартизиран в ISO 8407:2009 [59]. Тъй като това е основен метод, използван в настоящият труд за почистване на корозирали пробни тела, той е разгледан подробно в дисертацията. Основните елементи на този метод са:

- *Общи положения:* Прави се леко механично почистване с мека четка под течаща вода. В някои случаи тази обработка е достатъчна. Ако не са отстранени всички корозионни продукти, необходимо е да се използват други процедури: химична, електрохимична и механична обработка.
- *Химични процедури:* Химичните процедури включват потапяне на пробните тела за изпитване в химичен разтвор, специално предназначен да отстрани корозионните продукти с минимално отстраняване на основния метал.
- *Механични процедури:* включват надраскване, остъргване, изтриване с четка, ултразвукови методи, механичен удар и ударно въздействие (струйно-абразивно, разбиване със силна водна струя и други). Тези методи често се използват за сваляне на здраво свързани корозионни продукти.

5. Изпитване на метали на опън при стайна температура

Методът е стандартизиран в БДС EN ISO 6892-1:2019 [62]. Тъй като това е основен метод, използван в настоящият труд за механично изпитване на пробни тела, той е разгледан подробно в дисертацията. Основните елементи на този метод са:

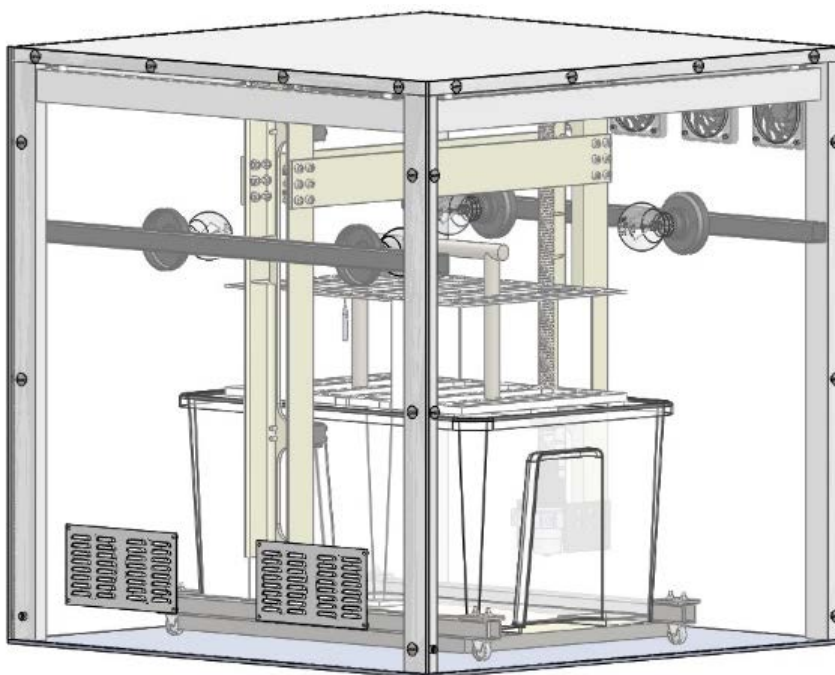
- *Същност:* Изпитването се състои в натоварване на пробно тяло със сила на опън обикновено до разрушаването му с цел определяне на една или повече механични характеристики.
- *Пробни тела:* Описана е подробно геометрията и геометричните съотношения на стандартните пробни тела за изпитване на опън. За нуждите на настоящия труд пробните тела се получават чрез отрязване от прът.
- *Начална мерна дължина и мерна дължина по екстензометър:* Дадено е съотношението между работната и мерната дължина, както и начините за маркиране на мерната дължина. В настоящата работа маркирането става с тънък перманентен маркер.
- *Точност на апаратурата за изпитване:* дадени са стандартите за калибриране и точност, на които трябва да отговаря апаратурата.
- *Условия за изпитване:* дадени са начините за захващане на пробното тяло и скоростта на изпитване. Тези условия са спазени при всички проведени изпитвания.

- *Определяне границата на провлачане:* Коментирани са горната, долната и условната граница на провлачане.
- *Определяне на якостта на опън:* най-голямото напрежение, което материалът може да понесе, след границата на провлачане.
- *Определяне на относителното удължение след разрушаване:* Дадени са указания за определяне на този важен деформационен параметър, които са спазени при изпитванията в настоящия труд.

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРАНЕ, ИЗРАБОТВНЕ И УСЪВЪРШЕНСТВАНЕ НА СРЕДСТВА ЗА ПОЛУЧАВАНЕ И ИЗПИТВАНЕ НА КОРОЗИРАЛИ ПРОБНИ ТЕЛА

1. Конструкция на машина за периодично потапяне в солен разтвор

CAD-модел на новосъздадена машина за корозионни изпитвания е показан на фиг. 20. Машината се състои от следните основни елементи и системи:

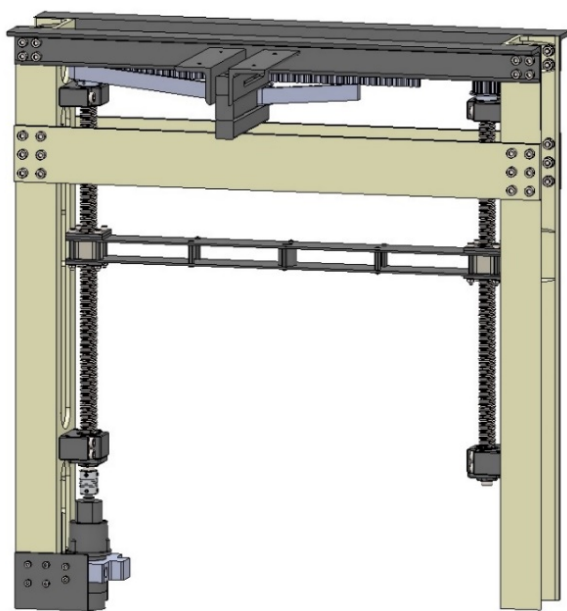


Фигура 20. CAD-модел на новосъздадена машина за корозионни изпитвания чрез периодично потапяне в корозивен разтвор.

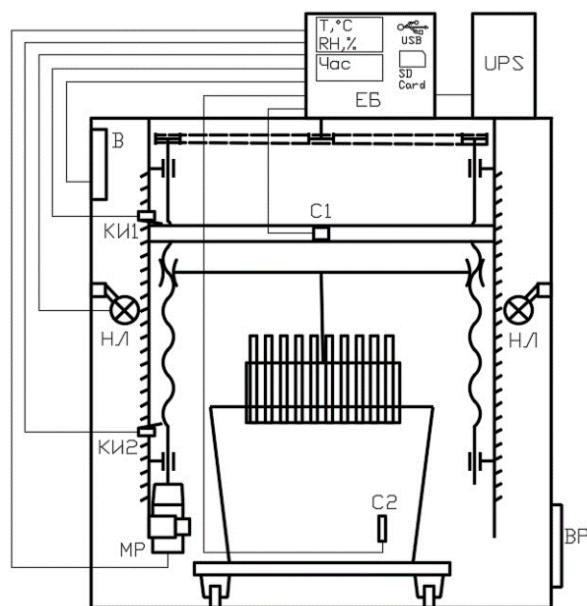
- *Камера:* Изградена е от прахово боядисани метални профили, дървен плот и прозрачни плексигласови стени. За регулиране на температурата и влажността на въздуха в камерата, както и за осигуряване на подходящ въздушен поток, в камерата са монтирани четири лампи с нажежаема жичка; На една от стените са изрязани четири вентилационни отвори, снабдени със смукателни вентилатори, а на срещуположната стена – два вентилационни отвора, снабдени с вентилационни решетки.
- *Задвижващ модул:* Носещата конструкция на задвижващия модул се състои от две вертикални колони и две хоризонтални шини (фиг. 22).

Задвижването е с постоянно токов електродвигател, куплиран с редуктор (мотор-редуктор). Модулът разполага с две винтогаечни предавки, чиито гайки носят подвижна траверса, за която се захваща стойката с пробните тела. Винтът на едната предавка се задвижва от мотор-редуктора, а на другата – чрез ремъчна предавка.

- *Стойка за монтиране на пробни тела:* Изработена е от полиметил метакрилат. В хоризонталните ѝ плочи са пробити 107 отвора, които позволяват поставянето на същия брой пробни тела.
- *Контейнер:* Изработен е от пластмаса и е поставен върху специална количка за лесно изваждане от камерата при смяна на разтвора.
- *Управление:* Системата за управление (фиг. 24) включва електронен блок, който обработва информация от сензорите за температура (на въздуха в камерата и на разтвора) и за влажност на въздуха, и управлява лампите и вентилаторите, с които се контролират условията в камерата. Отделно електронният блок изпълнява програмата за циклично потапяне/изваждане на пробните тела от разтвора. Електронният блок разполага с програмируем микропроцесорен контролер, *USB*-порт, слот за *SD*-карта и два дисплея. Той може да се свързва с преносим компютър чрез *USB* интерфейс, за зареждане програмата за работа на стенда в паметта на контролера. Показанията на сензорите и текущото време се визуализират на два дисплея, вградени кутията на електронния блок и се записват в енергонезависима памет *SD-card*. Електрическото захранване се осъществява през непрекъсваемо устройство *UPS*.

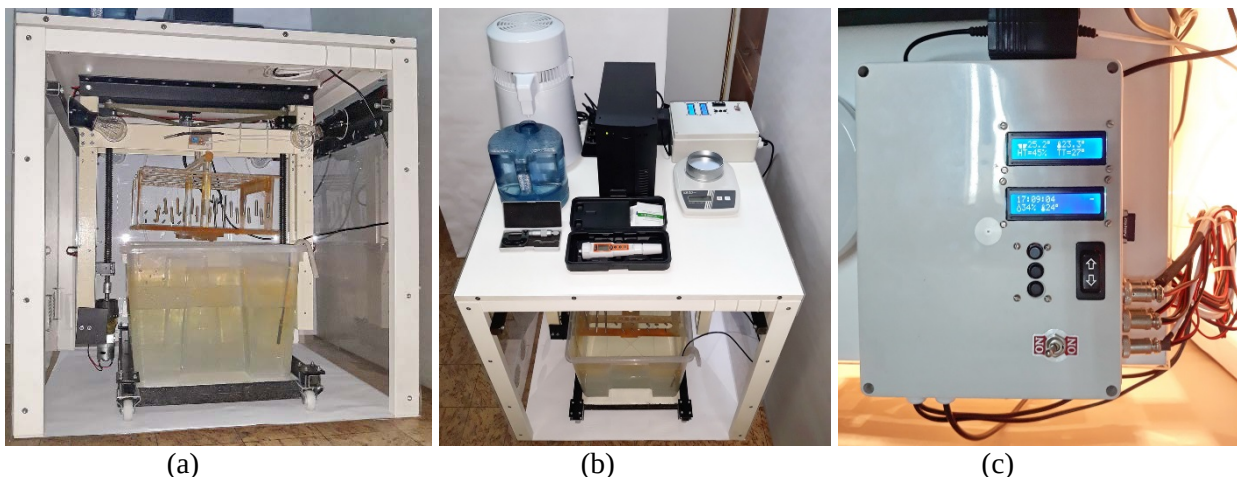


Фигура 22. Задвижващ модул.



Фигура 24. Управление.

На фиг. 25 са показани снимки на новосъздадената машина.



Фигура 25. Снимки на новосъздадената машина: (а) работна камера; (б) захранване, управление и принадлежности; (с) електронен блок по време на работа.

1.4. Методика за работа и провеждане на корозионно изпитване

1.4.1. Изработват се пробни тела за механични изпитвания и по 3 броя контролни пробни тела за определяне на степента на корозия при всяка продължителност.

1.4.2. Пробните тела се подлагат на почистваща процедура: обезмасляване в алкален разтвор (pH 12) при 65°C, 15 min; измиване с дестилирана вода; потапяне в киселинен разтвор (500 ml солна киселина, 3,5 g хексаметилентетрамин и дестилирана вода до 1000 ml) [66], 10 min; измиване с дестилирана вода; изсушаване с етанол. След почистването контролните пробните тела се претеглят за установяване на началното им тегло m_1 .

1.4.3. Приготвя се корозионният разтвор – разтваря се натриев хлорид в дестилирана вода с проводимост не по-висока от 2 mS/m при 25 °C $\pm$ 2 °C, до концентрация 35 ± 1 g/l.

Измерва се pH на соления разтвор. Ако pH е извън интервала 6 – 7, се прави корекция.

1.4.4. Пробните тела се монтират в стойката за пробни тела.

1.4.5. Стойката се поставя в контейнера, поставен върху количката.

1.4.6. Контейнерът се напълва с разтвор, така че пробните тела да са на минимум 10 mm дълбочина. Обемът на разтвора не трябва да бъде по-малък от 3 l/dm² от повърхността на изпитваните пробни тела. Отбелязва се нивото на разтвора. При намаляване се долива дестилирана вода. Разтворът се сменя на всеки 168 h или когато pH се промени с повече от 0,3 от първоначалното pH.

1.4.7. Позиционира се контейнерът с пробни тела в стенда.

1.4.8. Оста на стойката за пробни тела се свързва към подвижната траверса на задвижващия модул.

1.4.9. Задават се параметрите на изпитване: температура на въздуха 27 °C, относителна влажност 45 %, температура на разтвора 25 °C.

1.4.10. Стартира се корозионното изпитване. В помещението се поддържа относително постоянна стайна температура и относителна влажност от порядъка на 45 %. Помещението периодично се проветрява.

1.4.11. След изпитването пробните тела се подлагат на следната почистваща процедура: почистване с мека четка; потапяне в стандартен киселинен разтвор за 10 min; измиване с дестилирана вода; изсушаване с етанол. След почистването контролните пробни тела се претеглят и се отчита крайната им маса m_2 .

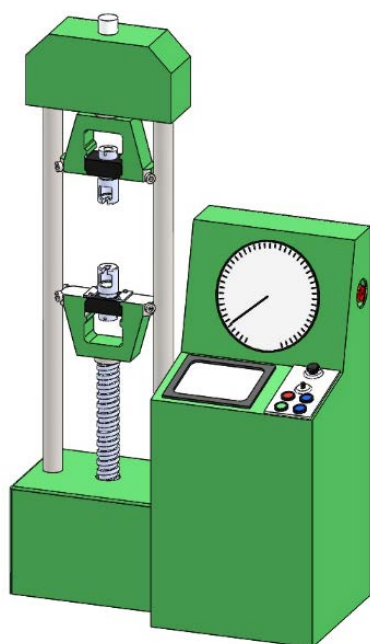
1.4.12. Определя се степента и скоростта на корозия.

2. Усъвършенстване на налична система за механични изпитвания при статично натоварване

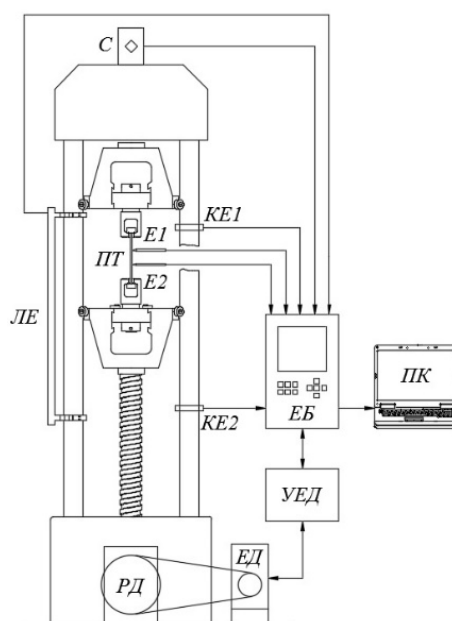
За да се реализира механично изпитване при статично натоварване, със следене и записване на всички съществени величини, е необходимо:

- *Изпитателна машина за статично натоварване.* Налична е неизправна машина ZD10, която подлежи на ремонт и усъвършенстване.
- *Устройства за измерване на деформации.* Налични са екстензометри на Schenck за измерване на надлъжна и напречна деформации.
- Нова електронна система за управление изпитателния комплекс и регистриране на необходимите величини. Ще включва електронен блок и персонален компютър.

На фигура 26 е показан CAD-модел на изпитателна машина ZD10. При модернизацията (фиг. 29) е монтиран нов тензометричен силомер, работещ на опън, проектиран за натоварване до 100 kN. Силомерът е калибриран съгласно стандарт EN ISO 376:2011 [64]. Върху дясната колона на изпитвателната машина е монтиран линеен енкодер за измерване на преместване, с обхват от 0 до 800 mm. В корпуса на изпитвателната машина е монтиран нов постоянно-токов електродвигател със сервоуправление, с вграден оптичен енкодер с 2000 имп./об.



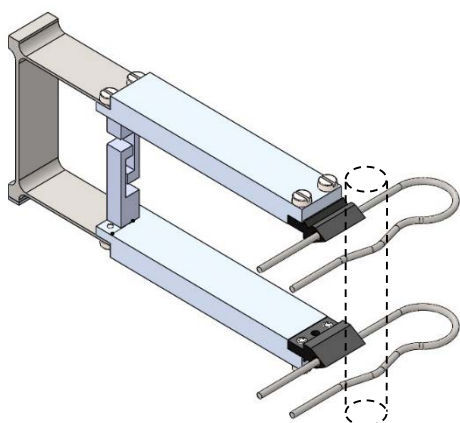
Фигура 26. CAD-модел на изпитвателна машина ZD-10.



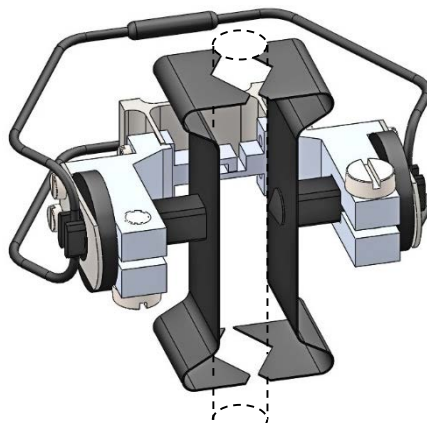
Фигура 29. Ново управление на изпитвателна машина ZD-10.

При реализираната система за управление, силомерът, екстензометрите и линейният енкодер подават сигнал към електронния блок. За да се избегнат смущенията върху усилвателите за сила и деформации, управлението на електродвигателя е реализирано в отделен блок. Блокът разполага със собствена памет, в която могат да се записват измерените величини (зададена и отработена сила, надлъжна и напречна деформации и преместване на подвижната траверса). Когато електронният блок е свързан с компютър, данните се предават в реално време към него. Там информацията се обработва, визуализира и записва с помощта на специално създадена програма.

Надлъжната и напречната деформации на пробното тяло се измерват с екстензометри, показани на фигури 27 и 28.



Фигура 27. CAD-модел на надлъжен екстензометър Schenck.



Фигура 28. CAD-модел на напречен екстензометър Schenck.

2.7. Методика за работа с модернизираната машина – изпитване на опън

2.7.1. Пресмята се началната мерна дължина на пробното тяло.

2.7.2. Маркира се началната мерна дължина – използва се цветен маркер. Ако работната дължина на пробното тяло L_c е по-голяма от началната мерна дължина L_0 , се маркира серия застъпващи се мерни дължини.

2.7.3. Монтира се пробното тяло в захватите на изпитвателната машина. Захващането трябва да е по такъв начин, че силата на опън да е приложена по оста на пробното тяло.

2.7.4. Монтира се екстензометърът за измерване на надлъжна деформация. Ако се сравняват криви на деформиране на пробни тела с различен диаметър е необходимо да се използват екстензометри с мерни дължини, равни на началните мерни дължини на пробните тела. В този случай относителните удължения след разрушаване могат да се определят от кривите на деформиране на материала.

2.7.5. Задават се параметрите на изпитване: калибровъчни стойности на измервателните канали; режим на работа – управление по сила; скорост на натоварване – 6 МПа/s; времева стъпка $t = 1$ s, през която да се записват измерваните величини.

2.7.6. Стартира се програмата за визуализация и запис на измерваните величини.

2.7.7. Нулира се измервателната апаратура и се стартира изпитването.

2.7.8. Построява се кривата на деформиране на изследвания материал.

2.7.9. Определят се търсените механични характеристики.

ГЛАВА 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И РЕЗУЛТАТИ

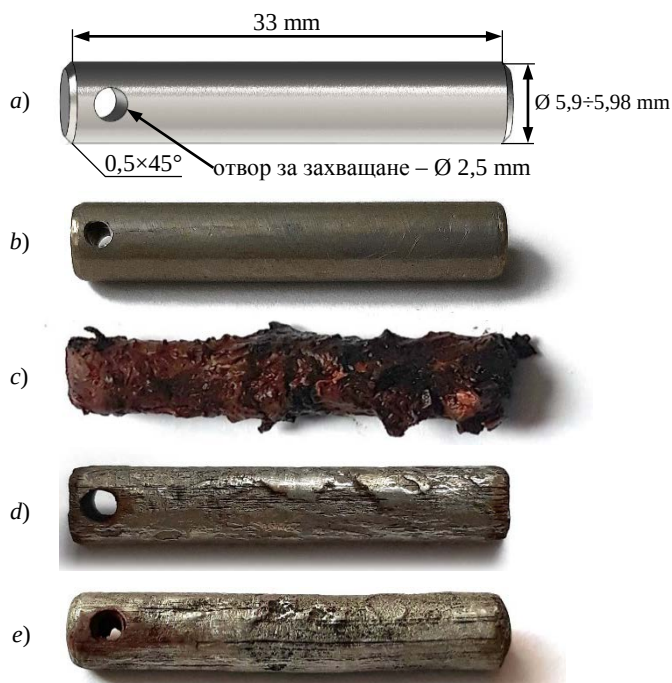
1. Скорост на корозия при периодично потапяне в солен разтвор

Цел на това изследване е да се изследва корозионното поведение на две разновидности на една от най-разпространените нелегирани структурни стомани – S235, под формата на пръти: горещо валцувани S235JR, с измерен диаметър 5,9 mm и студено изтеглени S235JRC, с измерен диаметър 5,98 mm. Химичният състав на изследваните стомани е даден в Таблица 3.

Таблица 3. Химичен състав на изпитаните пръти.

Елемент	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Cu, %	N, %
S235JR	0,17	–	1,4	0,035	0,035	–	0,5	0,012
S235JRC	0,08	0,2	0,08	0,027	0,027	0,1	–	–

Изпитване с продължителност 42 дни е проведено с машината, описана в глава 3. Пробните тела преди и след изпитването са показани на фиг. 31.

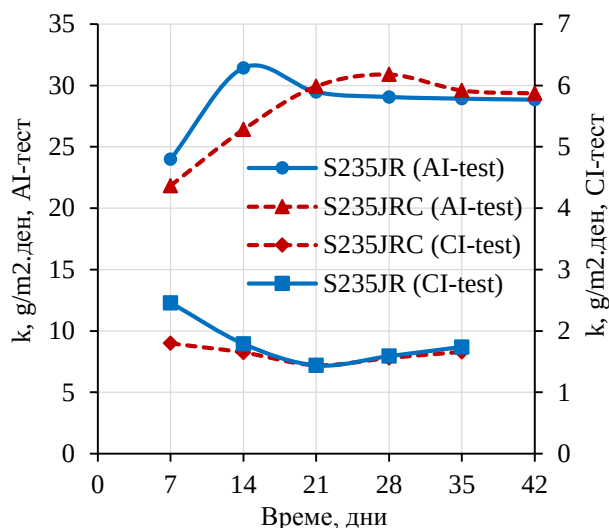


Фигура 31. Пробни тела преди и след 35 дни AI-тест. а) 3D модел с размери; б) пробно тяло от S235JRC преди изпитване; в) непочистено пробно тяло след AI-тест; д) почистено пробно тяло от S235JRC; е) почистено пробно тяло от S235JR.

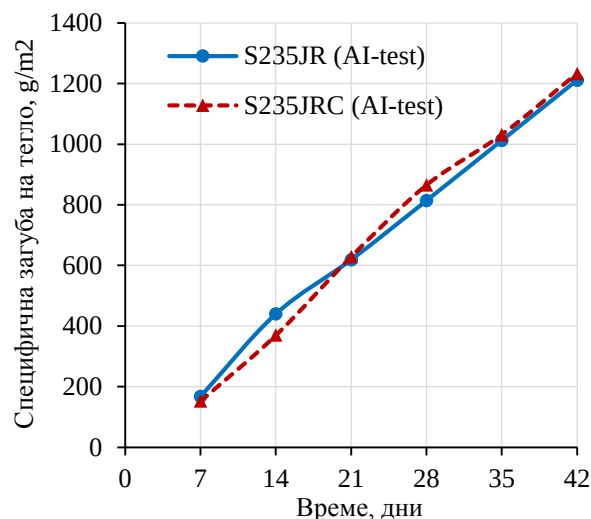
От фиг. 31d и е се вижда неравномерния характер на корозията и сложния релеф на повърхността. Корозионните повреди като вид и степен са сходни.

При горещо валцуваната стомана преобладават питингите, но се срещат и язви с по-голяма площ, както и надлъжни канали. При студено изтеглената стомана преобладават язвите, но се срещат и голямо количество питинги. Надлъжните канали са повече и по-дълбоки. Разликите се обясняват с промените в структурата, получаващи се при пластичната обработка.

Експериментално получените резултати за двете изпитани стомани са представени на фигури 32 и 33. Вижда се, че през първия месец от изпитването скоростта на корозия при двете стомани е различна. По-бързо корозира горещо валцуваната стомана S235JR, чиято повърхност е по-грапава и първоначално по-уязвима от корозионната среда. С увеличаване времето на изпитване разликата между скоростите на корозия на двете стомани намалява. След AI-тест с продължителност един месец повърхността на двата вида пробни тела придобива сходен релеф и след 35-ия ден скоростта на корозия става практически еднаква.



Фигура 32. Скорост на корозия.



Фигура 33. Специфична загуба на тегло.

На фигура 32 за сравнение е показано и изменението на скоростта за корозия при постоянен престой на пробни тела от същите две стомани в 3,5% разтвор на натриев хлорид (CI-тест) [30]. Вижда се, че скоростта на корозия при това изпитване е около 20 пъти по-малка спрямо AI-теста. Това го прави неудобен за ускорени корозионни изпитвания.

На фигура 33 е показана специфичната загуба на тегло. Тези зависимости могат да бъдат много полезни за установяване на необходимото време за прилагане на ускорения AI-тест, така че да се получи корозионен ефект, близък до този в естествена среда.

Проведените тестове показват, че разработената машина в глава 3 може успешно да се използва за провеждане на корозионни изпитвания чрез периодично потапяне в солен разтвор, отговарящи на стандарт [39]. Експериментално получената зависимост на специфичната загуба на тегло от времето на изпитване е необходима за определяне на времетраенето на AI-теста, което ще осигури съпоставимост на резултатите с тези от корозионно въздействие при естествени работни условия.

2. Влияние на атмосферната корозия върху механичните свойства

Изследвани са корозирали гладки пръти от армировъчна стомана с номинален диаметър 6,5 mm. Прътите са престояли 25 години на открито (корозия в естествена атмосфера), във вертикално положение, в умерен климатичен пояс, без антикорозионна защита. Химичният състав (Таблица 1) е изследван в специализирана лаборатория. Марката стомана е определена като B235 по действащия български стандарт БДС 4758:2008 [67]. Тази стомана може да се приеме с известно приближение за аналог стоманата S235JR [68].

Таблица 5. Химичен състав на изпитаните пръти.

Елемент	C	Mn	Cu	Ni	Si	Cr	As	S	P	N
Количество, %	0,2	1,18	0,62	0,28	0,23	0,12	0,0585	0,045	0,024	0,0075

Целта е да се направи оценка на влиянието на естествената корозия върху механичните свойства на армировъчна стомана B235. Проведени са две серии от изпитвания на опън: с почистени пробни тела, отрязани от корозиралите пръти и без допълнителна обработка; със стандартни пробни тела, струговани от корозиралите пръти до точен и чист диаметър 4 mm – фиг. 34.



Фигура 34. Подготовка на корозирали пробни тела за изпитване на опън.

(a) оригинален вид; (b) частично почистване по химичен път; (c) пълно почистване по механичен и химичен път; (d) стандартно пробно тяло, стругувано от корозирал прът.

Плътността на стоманата е определена експериментално. За целта е изработено цилиндрично тяло с точни размери – диаметър 4 mm и дължина 10 mm, измерено с микрометър и претеглено с точност 0,001 g. Пресметнато е, че плътността на стоманата е 7745 kg/m³.

Съгласно БДС 4758:1984, началният диаметър на прътите е $d_1 = 6,5$ mm, т.е. пробно тяло с дължина 100 mm има обем $V_1 = 3318,31$ mm³, повърхност $S_1 = 2108,4$ mm² и тегло $m_1 = 25,7$ g.

Диаметърът на три броя почистени корозирали пробни тела с дължина 100 mm е измерен с микрометър в четири сечения. Установен е средният диаметър на пробните тела – $d_{cp} = 6,205$ mm и крайното им тегло $m_2 = 22,617$ g.

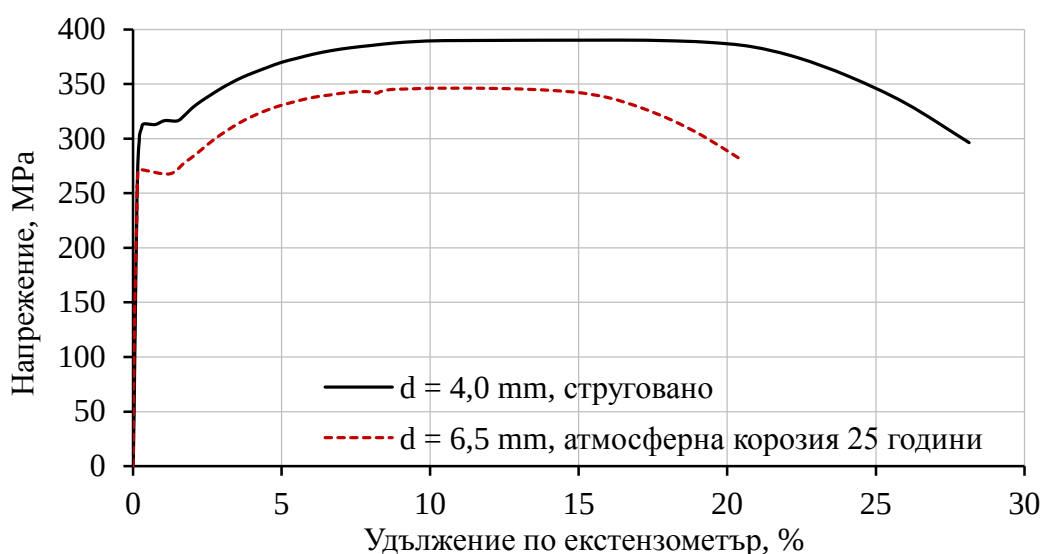
Пресметната е загубата на тегло за 25 години корозия в естествена атмосфера:

- Абсолютната загуба на тегло за прът с дължина 100 mm: 3,083 g;

- Специфичната загуба на тегло е: 1462,25 g/m²;
- Процентната загуба на тегло: 12%.

С тези данни може да се пресметне и скоростта на корозия k , която е един от най-важните параметри за оценка на корозионното поведение, тъй като позволява да се прогнозира остатъчният ресурс на изследваните обекти, работещи в корозионна среда. Получава се $k = 0,16 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{days})$.

Пробните тела са изпитани на опън с усъвършенстваната система и съгласно разработената методика, описани в точка 2 на глава 3. Изпитани са по три пропорционални пробни тела от видовете, показани на Фигура 34 (c) и (d). За измерване на надлъжната деформация са използвани екстензометри с мерни дължини, равни на началните мерни дължини на пробните тела. На фиг. 35 са показани кривите на деформиране при опън на пробни тела с №1 от двата вида. Стругованото пробно тяло има поведението на некорозирал материал.



Фигура 35. Криви на деформиране при опън.

Съгласно [68] границата на провлачане R_{eH} на стоманата S235JR трябва да бъде над 235 МПа, якостта на опън R_m трябва да бъде в границите 360-510 МПа, а удължението след разрушаване A – 24-26%. Съгласно [67], за стомана В235 $R_{eH} \geq 235 \text{ МПа}$, $R_m \geq 370 \text{ МПа}$ и $A_5 \geq 25 \%$. В случая при корозиралите пробни тела границата на провлачане R_{eH} намалява с 14,06%, якостта на опън R_m – с 12,24%. При процентна загуба на тегло от 12% границата на провлачане все още е над предписаната в стандартите [67,68] стойност, но якостта на опън намалява под предписаната долна граница.

Корозията влошава качеството на повърхнините, контактуващи с агресивната среда. Образуват се множество повърхностни дефекти със сложна и неправилна форма и с различна дълбочина. Това влошава не само якостните, но и деформационните свойства на корозирания детайл. В случая се наблюдава значително намаляване на пластичността на изпитваните пробни тела – при процентна загуба на тегло от 12% остатъчната деформация след разрушаване A намалява с 27,53% до стойност, която е значително по-ниска от предписаната в стандартите [67,68].

3. Симулиране на атмосферната корозия чрез АІ-тест

Целта е ефектите от атмосферната корозия върху стоманените пръти да се симулират и изследват чрез периодично потапяне в солен разтвор (АІ-тест). Използвани са корозиралите пръти от армировъчна стомана В235, престояли 25 години на открито, с известна степен на корозия, описани в точка 2 на тази глава. От тях са изработени нови пробни тела (фиг. 36), с диаметър в работната им дължина 5 mm, които са подложени на АІ-тест, докато се получи същата степен на корозия, както при естествената атмосфера. След това са сравнени повърхностите и кривите на деформиране на материала, които се получават при двата вида корозия.



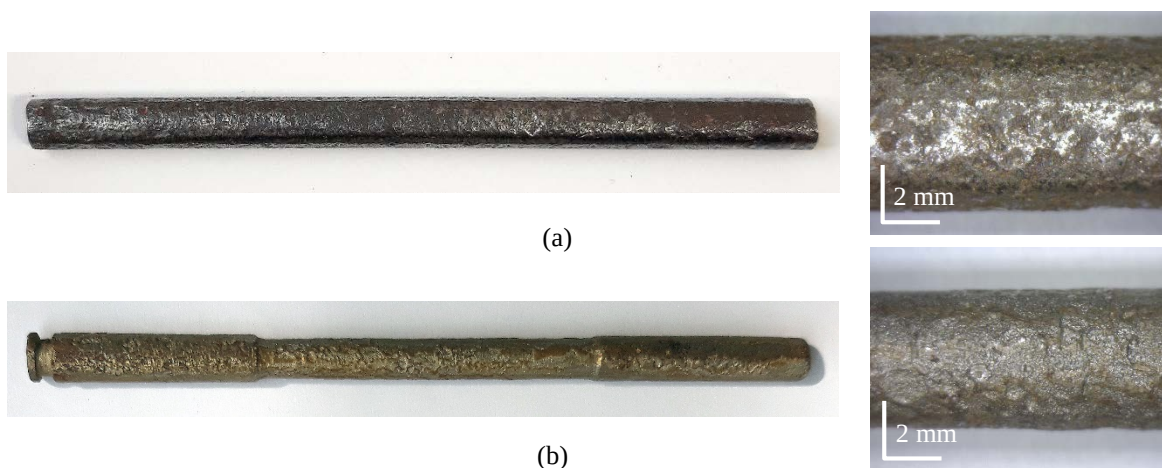
Фигура 36. Пробни тела: (a) Изходен материал; (b) Пробни тела за изпитване на опън; (c) Пробни тела за установяване на скоростта на корозия при АІ-тест.

АІ-тестът е проведен с машината и методиката, описани в глава 3. От фигура 33 следва, че необходимата продължителност на АІ-теста, за получаване на степен на корозия, както на пръта от Фигура 36 (a) ($1462,25 \text{ g/m}^2$), е приблизително 50 дни. За да се установи по-точно необходимата продължителност на АІ-теста, са използвани пробните тела, показани на Фигура 36 (c). Те са разделени на 4 групи от по 3 броя. Групите са вадени от машината през няколко дни, започвайки от 40-ия ден. Резултатите са дадени в Таблица 8. Желаната степен на корозия беше достигната на 52-рия ден.

Таблица 8. Специфична загуба на тегло за стомана В235 при АІ-тест за 40-52 дни.

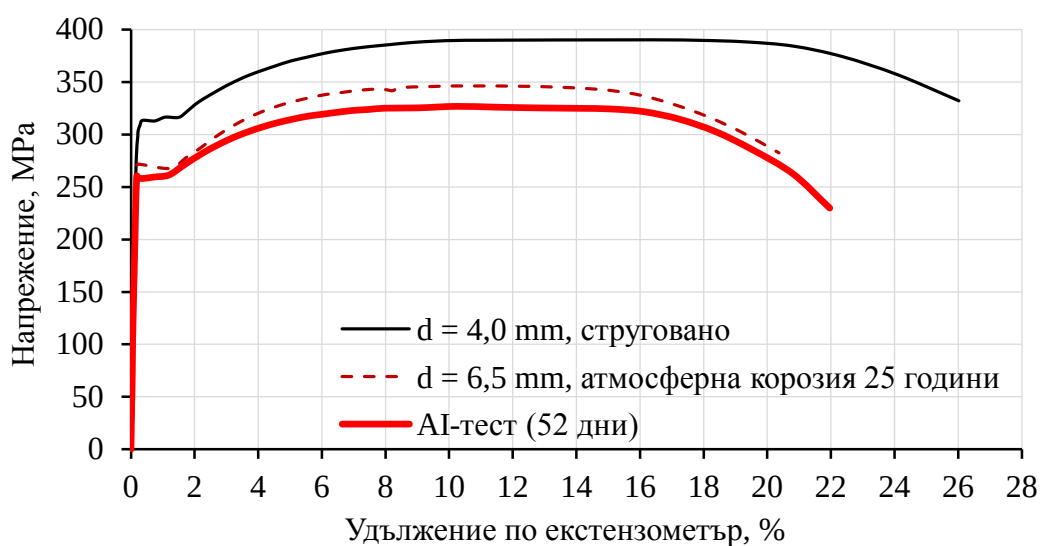
Продължителност на АІ-теста, дни	40	49	51	52
Специфична загуба на тегло, g/m^2	1046,05	1362,73	1430,15	1462,84

Снимки на почистения изходен материал са показани на фиг. 37 (a), а снимки на почистено пробно тяло за изпитване на опън, след 52 дни АІ-тест – на фиг. 37 (b). Еднаквата степен на корозия позволява по-нататъшно сравнение. Формата и размерите на пораженията е приблизително еднаква, както и дълбочината на всички видове повърхностни дефекти. Разлика има в разпределението на дефектите – при естествената корозия те са повече и по-равномерно разпределени. Всичко това дава основание да се очаква и близост в механичните свойства при изпитване на опън.



Фигура 37. Общ вид и повърхност на почистени корозирани пробни тела:
(a) Изходен материал, 25 г. атмосферна корозия; (b) Пробно тяло, 52 дни AI-тест.

Изпитванията на опън са проведени с усъвършенстваната система и съгласно методиката, описани в точка 2 на глава 3. Изпитани са три пробни тела от всеки вид. Надлъжната деформация е измервана с екстензометър с мерна дължина 25 mm. Получените криви на деформиране на материала са показани на фиг. 38.



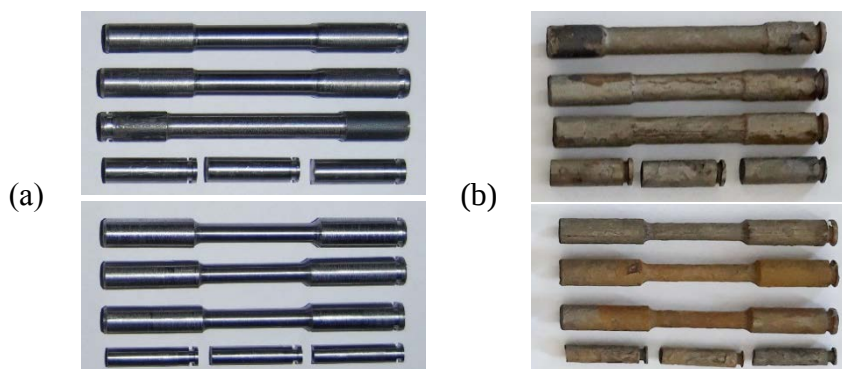
Фигура 38. Криви на деформиране при опън – пробно тяло №1 от всеки вид.

Кривите на деформиране, получени при еднаква степен на корозия, са сравнително близки – разликата при границата на провлачане R_{eH} и при якостта на опън R_m е между -4% и -5% . Разликата при максималното удължение по екстензометър е малко по-голяма: $+7,8\%$, но при този показател по принцип има значително разсейване в опитните резултати.

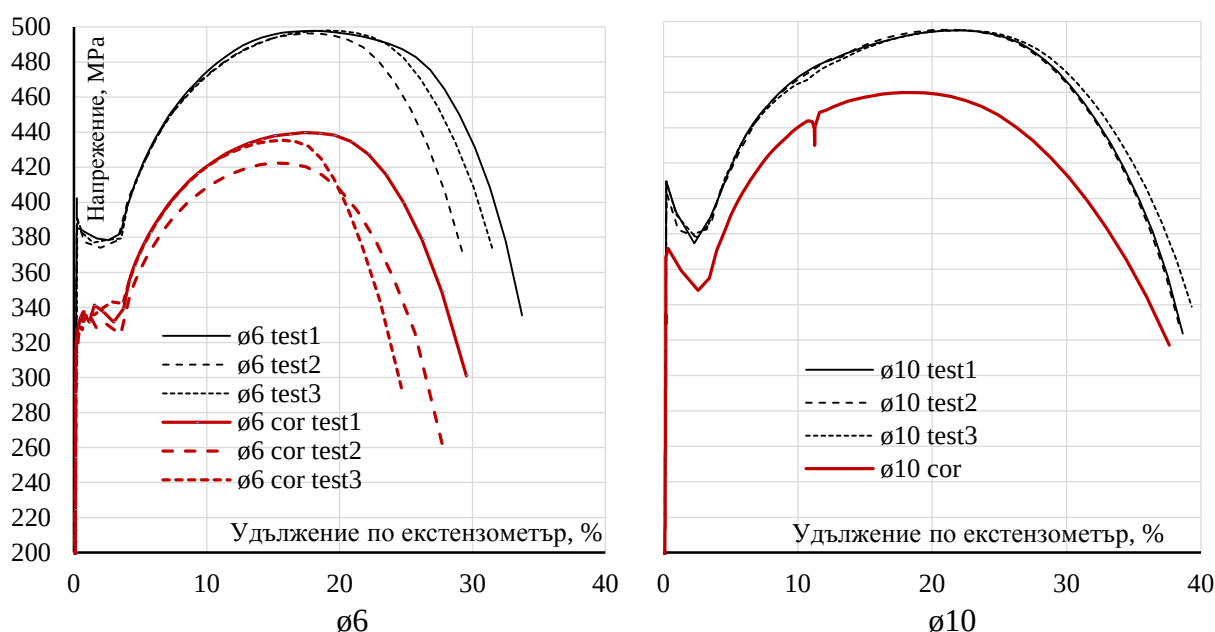
Ако приемем, че намаляването на диаметъра не зависи от началния диаметър на пръта, тогава пробното тяло с по-малък диаметър (5 mm), използван при AI-теста, търпи по-големи процентни загуби от пробното тяло с по-голям диаметър (6,5 mm), използван при корозията в естествена атмосфера. Това обяснява по-ниските якостни показатели при пробните тела, подложени на AI-тест.

4. Влияние на началния диаметър на корозирали пробни тела върху якостните им свойства

Чрез струговане са изработени по шест пробни тела с работен диаметър 6 и 10 mm, от една и съща заготовка – прът от стомана S235JR, с начален диаметър 12 mm. По три пробни тела от всеки диаметър са изпитани на опън без корозия, а другите три са подложени на 52 дни AI-тест, след което също са изпитани на опън. Използвани са машината и методиката, описани в глава 3. Снимка на пробните тела са показани на фиг. 39. Получените криви на деформиране са дадени на фиг. 42.



Фигура 39. Пробни тела за изпитване на опън с диаметър 10 и 6 mm:
(a) преди корозионно въздействие; (b) след 52 дни периодично потапяне в солен разтвор.



Фигура 42. Влияние на началния диаметър върху кривата на деформиране на корозирали пробни тела (некорозирали – черно; корозирали – червено).

От сравнението на кривите на деформиране при $\phi 6$ и $\phi 10$ се вижда очакваното намаляване на влиянието на корозията върху механичните свойства с увеличаване на началния диаметър d_0 . Теоретично, с намаляване на d_0 влиянието на загубата на диаметър Δd върху нормалните напрежения σ_x значително нараства, тъй като намалява разликата между d_0 и Δd , която формулата за σ_x е в знаменател и е повдигната на втора степен.

4.5. Методика за определяне Δd без геометрично измерване

Загубата на диаметър Δd често не може да се определи чрез геометрично измерване – то не е приложимо, когато корозията е неравномерна, както е при АІ-теста и често при атмосферната корозия. Тегловният метод също не винаги дава добри резултати, особено ако детайлът е с по-сложна форма и е различно корозирал в различните си части.

В случаите, когато са известни някои от якостните параметри на изходния материал, например R_{eL} или R_m , определянето на Δd може да стане без геометрично измерване, чрез изпитване на опън на корозирани пробни тела. Използва се обстоятелството, че якостните параметри на самия материал (каквито са границата на провлачане и якостта на опън) не се променят в следствие на корозията. Например:

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{A} = \frac{F_{eL,c}}{A_c} \Rightarrow A_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = \frac{F_{eL,c}}{R_{eL}} \Rightarrow d_c = \sqrt{\frac{4F_{eL,c}}{\pi \cdot R_{eL}}}, \quad (1)$$

където A_c и d_c са съответно площта на напречното сечение и диаметърът на корозиралото пробно тяло. Като се отчете, че $\Delta d = d_0 - d_c$, се получава окончателната формула за пресмятане на загубата на диаметър:

$$\Delta d = d_0 - \sqrt{\frac{4F_{eL,c}}{\pi \cdot R_{eL}}}. \quad (2)$$

Методика за определяне загубата на диаметър, базирана на формула (23):

1. *Изработват се пробни тела от некорозирал материал.* Ако такъв не е наличен, пробните тела се изработват от корозиралите детайли чрез рязане и струговане.
2. *Некорозиралите пробни тела се изпитват на опън.* Определят се характерни стойности на напрежението от кривата на деформиране на материала – например граница на провлачане и якост на опън.
3. *Корозиралите пробни тела се изпитват на опън.* Определя се стойността на силата, при която се получават същите по вид характерни напрежения, както в предходната стъпка.
4. *Пресмята се загубата на диаметър по формула (23).* В нея се замества усреднената стойност на характерното напрежение, определена за некорозирания материал.

По тази методика е определена загубата на диаметър за изпитаните пробни тела. Резултатите са дадени в таблица 12. Вижда се, че при използване на R_m разсейването е по-голямо, но усреднените резултати са близки. За $\varnothing 6$ и $\varnothing 10$ средната загуба на диаметър Δd е 0,41 mm.

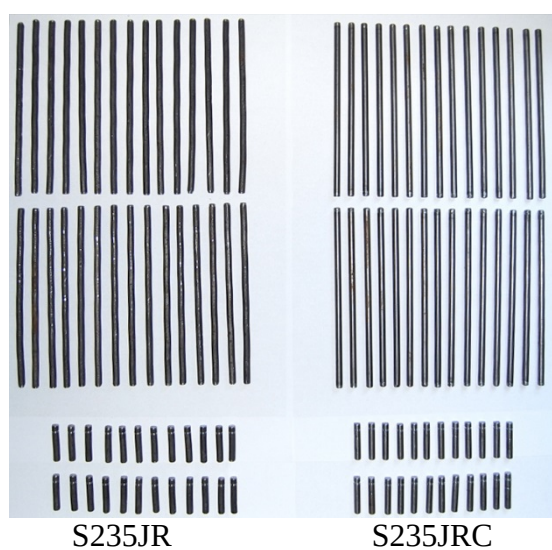
Таблица 12. Загуба на диаметър след 52 дни АІТ, получена без геометрично измерване.

d_0 , mm	6				10			
Тест №	1	2	3	Средно:	1	2	3	Средно:
$\Delta d (R_{eL})$, mm	0,38	0,44	0,41	0,41	0,4	0,35	0,47	0,41
$\Delta d (R_m)$, mm	0,36	0,47	0,39	0,41	0,36	0,33	0,43	0,37

ГЛАВА 5. ПРОГНОЗИРАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА АТМОСФЕРНАТА КОРОЗИЯ ВЪРХУ МЕХАНИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА СТОМАНА S235

Целта е да се предложи метод за прогнозиране на влиянието на атмосферната корозия върху механичните свойства на стомана S235. От пръти от стомани S235JR и S235JRC са изработени пробни тела, които са подложени на ускорена корозия чрез АІ-тест с продължителност 52, 78, 105, 133, 161 и 189 дни. Изпитването е проведено с машината и методиката, описани в глава 3. Пробните тела са показани на фиг. 44 – дългите са за механични изпитвания, а късите – за определяне степента на корозия. На всяка продължителност са подложени по 5 от дългите и 3 от късите пробни тела.

На фиг. 47 е показана снимка на почистените пробни тела след 189 дни АІ-тест. Краищата им са защитени от корозия с темрошлаух, с цел по-добро захващане и разрушаване в мерната дължина. Получените корозионни резултати са дадени в таблица 14. Изпитани на опън са общо 70 пробни тела, съгласно стандарт [62], с описаните по-горе система и методика. Надлъжната деформация е измервана с екстензометър, с мерна дължина 25 mm. На фигури 49 и 50 са показани по една крива на деформиране от всяка група пробни тела. Разрушаването е настъпило в мерната дължина на екстензометъра.



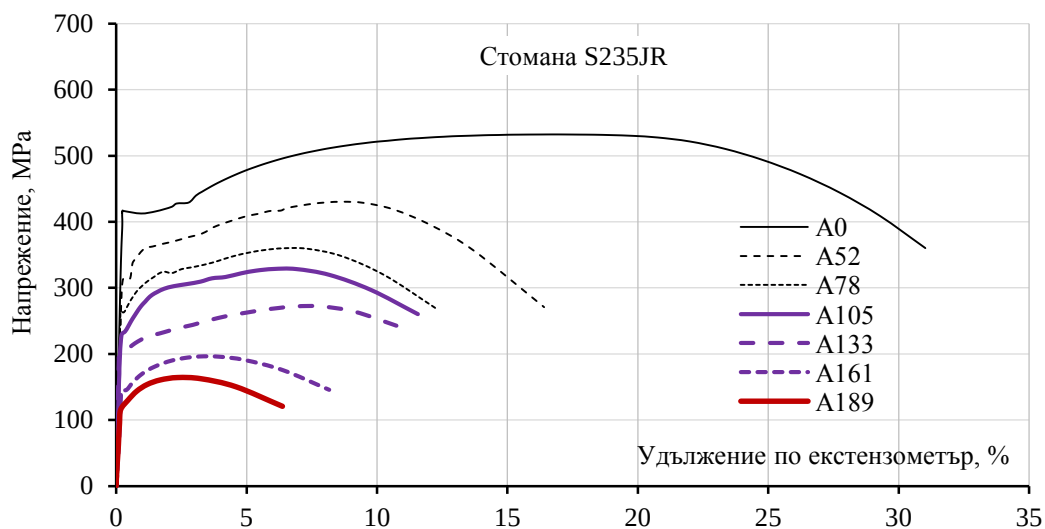
Фигура 44. Снимка на изработените пробни тела.



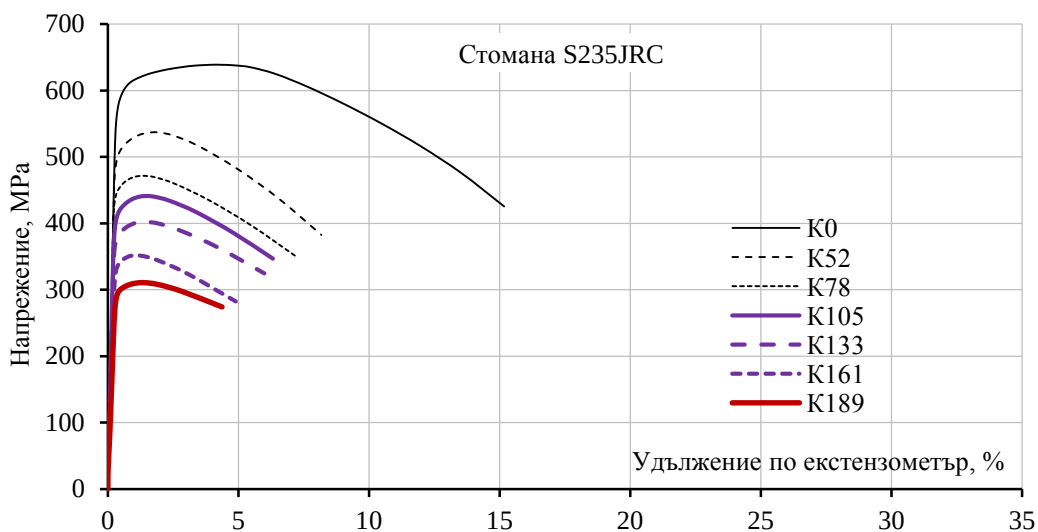
Фигура 47. Снимка на почистени пробни тела след 189 дни АІ-тест.

Таблица 14. Загуба на тегло и скорост на корозия за стомани S235JR и S235JRC.

t	Δm			k	Δm			k
дни	g	g/m ²	%	g/m ² .ден	g	g/m ²	%	g/m ² .ден
	Стомана S235JR				Стомана S235JRC			
52	1,013	1446,16	15,06	27,81	1,009	1419,27	14,37	27,29
78	1,739	2482,6	25,63	31,83	1,6	2250,58	22,91	28,85
105	2,344	3346,3	34,73	31,87	2,163	3042,5	31,23	28,98
133	2,874	4102,92	42,6	30,85	2,713	3816,13	38,56	28,69
161	3,304	4716,79	49,07	29,3	3,202	4503,97	46,11	27,97
189	3,76	5367,78	55,4	28,4	3,629	5104,59	51,67	27,01



Фигура 49. Криви на деформиране на пробни тела от стомана S235JR.



Фигура 50. Криви на деформиране на пробни тела от стомана S235JRC.

На фиг. 48 е показано корозионното въздействие след 189 дена AI-тест. Заснета е границата между незащитения материал и защитения край на пробното тяло, който е запазил първоначалния си диаметър, но е покрит с тънък и здрав слой корозионни продукти. Разликата в корозионните поражения се дължи на пластичната деформация в резултат от студеното изтегляне при стомана S235JRC. Повърхността на горещо валцуваната стомана е осеяна с облизви с различен размер и дълбочина, докато повърхността на студеноизтеглената стомана е покрита с надлъжни бразди. Различната структура на иначе близката по химичен състав стомана обуславя както различното корозионно поведение, така и разликите в механичните свойства преди и след корозионното въздействие.



Фигура 48. Пробни тела след 189 дена AI-тест (S235JRC – отдясно, S235JR – отляво).

От експериментално получените криви на деформиране са определени горната граница на провлачане R_{eH} или долна граница на провлачане R_{eL} . При криви без физическа граница на провлачане, е определена условна граница на провлачане $R_{p,0.2}$. Определена е също якостта на опън R_m .

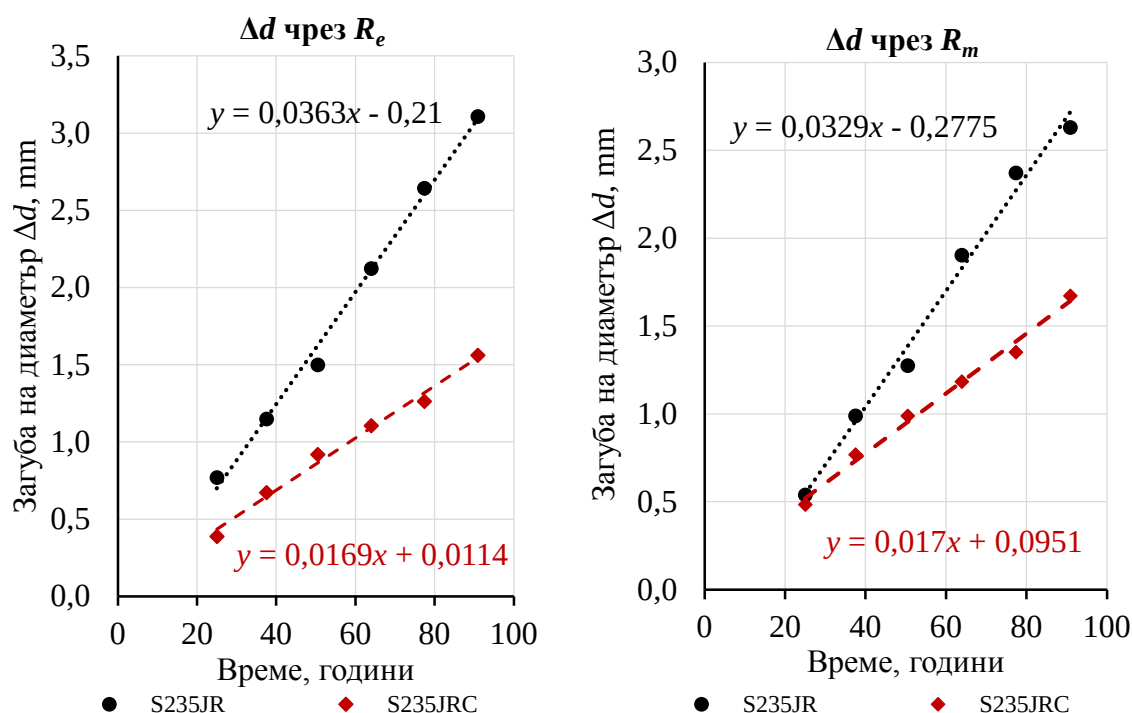
В таблица 19 са дадени годините атмосферна корозия, които са еквивалент на AI-тест със съответната продължителност (съгласно резултата от таблица 8). Пресметната е и загубата на диаметър Δd , като е използвана разработената в глава 4 методика.

Таблица 19. Загубата на диаметър след AI-тест.

AI-тест	Атмосферна корозия	Загуба на диаметър Δd (F_e), mm		Загуба на диаметър Δd (F_m), mm	
		S235JR	S235JR	S235JR	S235JRC
52	25,00	0,77	0,39	0,54	0,48
78	37,50	1,15	0,67	0,99	0,77
105	50,48	1,50	0,92	1,27	0,99
133	63,94	2,12	1,10	1,90	1,18
161	77,40	2,64	1,26	2,37	1,35
189	90,87	3,11	1,56	2,63	1,67

Получените резултати са показани като точки на фиг. 52, където са построени и прави линии, които добре апроксимират получените резултати. От техните уравнения се получават следните зависимости, с които може да се определя Δd за изследваните стомани, където t е време, в години:

- Стомана S235JR: $\Delta d = 0,0363 t$;
 - Стомана S235JRC: $\Delta d = 0,0169 t$,
- (3)



Фигура 52. Линейна връзка между Δd и t за изследваните стомани, пресметната чрез R_e и чрез R_m .

Напреженията при чист опън са обратно пропорционални на втората степен на диаметъра, т.е.

$$\frac{R_{eH}}{R_{e,c}} = \frac{R_{p0,2}}{R_{e,c}} = \frac{R_m}{R_{m,c}} = \frac{d_0^2}{(d_0 - \Delta d)^2}; \quad (4)$$

Като използваме стойностите за наклона на линиите, показани на фигура 52, въвеждаме коефициент Ψ , зависещ от материала:

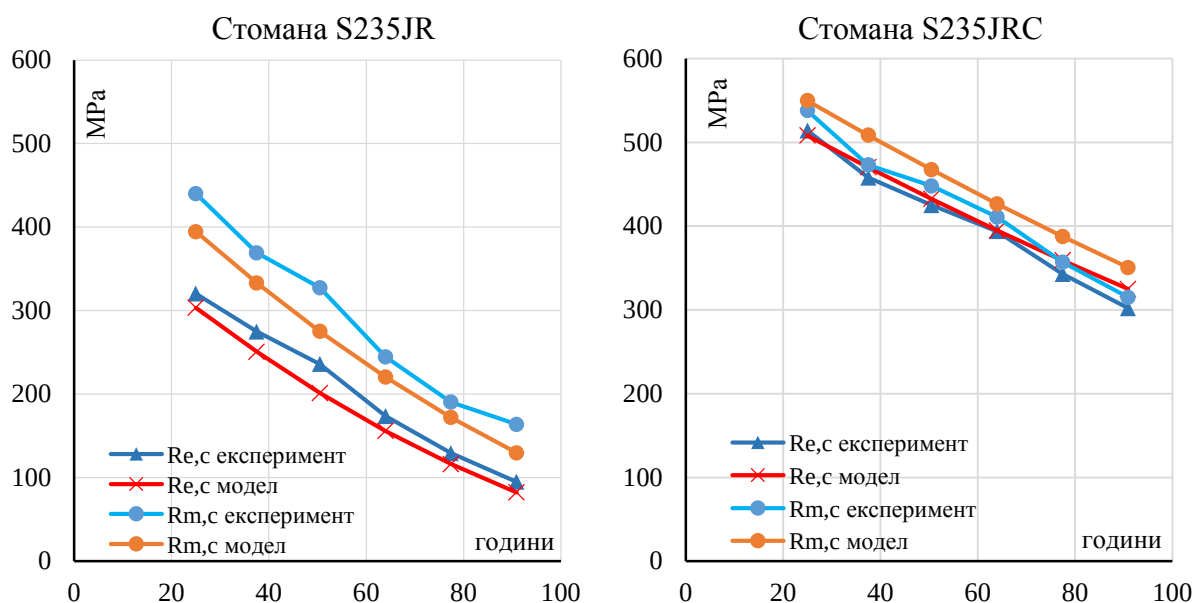
- за стомана S235JR: $\Psi_e = \left(\frac{d_0 - 0,0363t}{d_0} \right)^2$; $\Psi_m = \left(\frac{d_0 - 0,0329t}{d_0} \right)^2$;
- за стомана S235JRC: $\Psi_e = \left(\frac{d_0 - 0,0169t}{d_0} \right)^2$; $\Psi_m = \left(\frac{d_0 - 0,0170t}{d_0} \right)^2$.

$$(5)$$

От (25) следва, че якостните характеристики на стоманата могат да се прогнозират чрез следните зависимости:

$$R_{e,c} = \Psi_e R_{eH}; \quad R_{e,c} = \Psi_e R_{p0,2}; \quad R_{m,c} = \Psi_m R_m. \quad (6)$$

На фиг. 53 е направено сравнение между експериментално определените стойности и изчислените стойности чрез предложените зависимости (26) и (27) за $R_{e,c}$ и $R_{m,c}$.



Фигура 52. Прогнозиране на границата на провлачване и якостта на опън след 25-91 години атмосферна корозия.

Получената точност може да се приеме за достатъчна, предвид факта, че атмосферната корозия е природен феномен, който трудно може да се прогнозира. Трябва да се отбележи също и голямото разсейване на експерименталните резултати при корозиралите пробни тела.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Настоящият дисертационен труд е посветен на изследване на влиянието на корозията върху якостно-деформационните свойства на пръти от стомана S235. Резултатите, получени в него имат научно-приложен характер и могат да бъдат обобщени както следва:

1. Проектирана и изработена е машина за ускорена корозия на пробни тела чрез периодично потапяне в солен разтвор. Разработена е методика за работа с машината и за получаване на корозирали пробни тела.
2. Усъвършенствана е налична система за механични изпитвания на материалите при статично натоварване. Разработена е методика за работа със системата и за изпитване на опън.
3. Определени са якостно-деформационните свойства на некорозирали и корозирали пробни тела от стомана S235, получени чрез атмосферна корозия и чрез периодично потапяне в солен разтвор.
4. Разработена е методика за определяне на загубения диаметър Δd в резултат от атмосферната корозия, чрез изпитване с периодично потапяне в солен разтвор.
5. Предложена е зависимост за прогнозиране на влиянието на атмосферната корозия върху якостните свойства на стомана S235.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. V. Tsonev, N. Kuzmanov, B. Borisov, **K. Penkov**, *System for materials testing at static loading*, "TechSys 2019", Plovdiv, Bulgaria, 16-18 May 2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, Volume 618, article 012048, Indexed in Scopus (SJR)
2. N. Nikolov, V. Tsonev, **K. Penkov**, N. Kuzmanov, B. Borisov, *Machine for accelerated cyclic corrosion tests through alternate immersion in salt solution*, "BulTrans-2019", Sozopol, Bulgaria, 10-12 September 2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, Volume 664, article 012016, Indexed in Scopus (SJR)
3. V. Tsonev, N. Nikolov, **K. Penkov**, *Impact of atmospheric corrosion on the mechanical properties of S235 steel rods*, "TechSys 2020", Plovdiv, Bulgaria, 14-16 May 2020, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Volume 878, article 012064, Indexed in Scopus (SJR)
4. V. Tsonev, N. Nikolov, **K. Penkov**, Y. Marchecheva, *Simulation of steel rod atmospheric corrosion by alternate immersion in salt solution*, "BulTrans-2020", Sozopol, Bulgaria, 10-13 September 2020, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Volume 1002, article 012008, Indexed in Scopus (SJR)

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE STRENGTH-STRAINN PROPERTIES OF S235 STEEL RODS WITH VARIOUS DEGREES OF CORROSION

Kamen Ivanov Penkov

Technical University of Sofia, Faculty of Transport, Department of Mechanics

The aim of the dissertation is to study the influence of corrosion on the strength-strain properties of hot-rolled and cold-drawn S235 steel rods.

Chapter I includes literature review and finishes with the aim and the major tasks of the PhD-work.

Chapter II contains the major theoretical topics needed and related Bulgarian and international standards - Corrosion of metals and alloys, Corrosion test with periodic immersion in salt solution, Cleaning from corrosion products, Tensile testing of metals at room temperature.

Chapter III is devoted to the design, manufacture and usage of a machine for the preparation of corroded test specimens. A specially created machine is described, which is one of the main contribution of the dissertation. A methodology for working with this machine is given. The machine immerses and dries the test specimens, controlling the temperature and humidity in the working chamber and the temperature of the solution, in accordance with EN ISO 11130: 2018.

Chapter IV is entitled "Experimental Research and Results." It contains a description and the results of the following four main experiments: determination of the corrosion rate of the studied steels by periodic immersion in salt solution; determination of the influence of atmospheric corrosion on the mechanical properties of S235 steel; Simulation of atmospheric corrosion by periodic immersion of the tested steels specimens in salt solution; influence of the initial diameter of corroded test specimens on their strength properties. It was found that 52 days of accelerated test by periodic immersion in salt solution is equivalent to 25 years of corrosion in a natural atmosphere, for the tested samples. A methodology for determining the diameter loss without geometric measurement is proposed.

Chapter 5 is devoted to forecasting the influence of atmospheric corrosion on the mechanical properties of S235 steel. Accelerated tests were performed by periodically immersing in a salt solution of test specimens, lasting 52, 78, 105, 133, 161 and 189 days, which are equivalent to 25, 38, 50, 64, 77 and 91 years of corrosion in natural atmosphere. Dependencies and coefficients for predicting the yield strength and tensile strength for the studied steels according to the duration of the corrosion impact are proposed.

The dissertation ends with a brief description of the main results, a list of references and a list of related scientific publications. On the topic of the dissertation the doctoral student is a co-author in four scientific publications.