

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАР  
НА**

**инж. Георги Георгиев Георгиев**

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА УМОРНИТЕ ПРОЦЕСИ В  
КОРОЗИОННО УСТОЙЧИВА ФЕРИТО –  
АУСТЕНИТНА СТОМАНА**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**на дисертация за получаване на образователната и  
научна степен „ДОКТОР”**

**по докторска програма: Технология на машиностроителните материали  
професионално направление: 5.1 Машинно инженерство**

**Научен ръководител: Доц. д-р инж. ЯРОСЛАВ АРГИРОВ**

**Рецензенти:**

- 1.**
- 2.**

**Варна 2019 г.**

Дисертационният труд е обсъден на ..... в катедра „МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ НА МАТЕРИАЛИТЕ“ на катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна ..... г. и насочен за защита.

**Автор:** инж. Георги Георгиев Георгиев

**Заглавие:** Изследване на уморните процеси в корозионно устойчива феритно – аустенитна стомана.

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАР  
НА**

**инж. Георги Георгиев Георгиев**

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА УМОРНИТЕ ПРОЦЕСИ В  
КОРОЗИОННО УСТОЙЧИВА ФЕРИТО –  
АУСТЕНИТНА СТОМАНА**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**на дисертация за получаване на образователната и  
научна степен „ДОКТОР”**

**Варна 2020 г.**

Дисертационният труд съдържа 166 страници, включително 199 фигури, 25 таблици, 15 формули, оформени в 6 глави, приноси на дисертационния труд, списък с публикациите на автора по темата на дисертационния труд и списък на използваната литература от 129 заглавия, от които 47 на кирилица и 82 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на ..... г. от ..... ч. в ..... на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора № ...../..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувалите се в Докторантски център, стая 318 НУК.

## ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### 1. Актуалност на проблема

Материалите от които се изработват повечето компоненти за контрол, както и линиите захранващи със химикали и течности за управление на крановете, трябва да са с изключителни добри механични и антикорозионни характеристики. Няма достатъчно данни за тези стомани в областта отнасяща се до заварените съединения работещи в корозионна среда. Тези процеси са неразривно свързани със структурата и фазовия състав на стоманата в зоната на заваряване, както и със свойствата на повърхностния слой, които се е получил. Не са напълно разгледани и изяснени процесите свързани с развитие на пукнатината в заварените зони на наварения метал, дълготрайността, както и процесите на развитие на пукнатината в повърхностния уякчен хомогенен слой S. Липсват достатъчно сведения за развитие на пукнатини в зоните където е протекла междукристална корозия - в зоната на наварения метал. При разглежданите технологични процеси не са открити достатъчно сведения за развитие на пукнатини в корозионна среда на повърхностни покрития (уякчен слой S).

### 2. Цели и задачи на изследването

Чрез провеждането на теоретични и експериментални изследвания относно зараждането и развитие на пукнатината предизвикана от многоциклова умора в зоната на наварения и основния метал на корозионно устойчива стомана от ферито аустенитен тип (2507), се определи влиянието на корозионното износване, както и възможностите за повишаване дълготрайността и механичните характеристики, чрез повърхностно уякчаване (нискотемпературно газово азотиране - карбонитриране).

**Задачите, които са формулирани за постигане на поставената цел са следните:**

- ✓ Разработване на предварителен компютърно симулационен модел на провежданото лабораторно изследване на разглежданата стомана подложена на циклично натоварване.
- ✓ Определяне резонансната честота на изследвания материал необходима за използваната методика на провеждания експеримент.
- ✓ Изработване на пробни тела, използвайки метод изключващ термично влияние върху обектите.
- ✓ Разработване на методика за определяне на растежа на пукнатината за цикъл.
- ✓ Методика за определяне уякчената област в зоната на формиране на пукнатина
- ✓ Методика за развитие на пукнатина в дълбочина и създаване на 3D профил

- ✓ Методика за определяне развитието на фронта на пукнатината в напречно сечение
- ✓ Разработване на металографска методика за установяване фокуса на зараждащата се пукнатина и определяне нейната скорост и път на развитие.
- ✓ Изследване на дълготрайността на заварени и незаварени образци от ферито – аустенитна стомана.
- ✓ Изследване влиянието на радиусите на закръгление върху дълготрайността на ферито – аустенитна стомана.
- ✓ Изследване на дълготрайността на заварени и незаварени образци от ферито – аустенитна стомана след корозионно въздействие.
- ✓ Изследване на дълготрайността след нискотемпературно газово азотиране – карбонитриране на заварени и незаварени образци от ферито – аустенитна стомана.
- ✓ Изследване на дълготрайността след нискотемпературно газово азотиране – карбонитриране върху заварени и незаварени образци от ферито – аустенитна стомана подложени на корозионно въздействие.
- ✓ Обобщаване на получените резултати.

### **3. Обект и предмет на изследване**

Обект и предмет на изследване е корозионно устойчива стомана от ферито аустенитен тип (SAF2507) в зоната на наварения и основния метал.

### **4. Методи на изследване**

Методите за изследване включват: експериментално изследване със знакопроменливо натоварване при различни технологични и химични условия, определяне на твърдост в зоната на пукнатините, металографски и рентгеноструктурен анализ на уякения слой, изследване скоростта, посоката в две направления и ъгъла на фронта на развитие на пукнатините.

### **5. Място на изследване**

Изследванията са проведени в лабораториите на катедра МТМ и ТМММ при ТУ – Варна. Лазерно изрязване на образците е направено във фирма “Плазмо”ЕООД.

### **6. Научна новост на изследването**

Чрез проведените изследвания и макроструктурни анализи по време на циклично натоварване и след разрушаване на изследваните образци, са установени различни режима на развитие на пукнатините, зависимост между ъгъла на фронта на пукнатините

и скоростта им на развитие в зависимост от химичните и технологичните условия. Разработени са модели показващи факторите влияещи върху дълготрайността на изследваната стомана приложими за корозоустойчиви стомани. Разработени са методики за определяне зараждането и растежа на пукнатините по време на знакопроменливо натоварване. Извършена е комплексна оценка и сравнителен анализ за влиянието на формата на ръба върху зараждането и развитието на пукнатината, както и уморната дълготрайност на материалите.

## **7. Практическа ценност на изследването**

Към резултатите с приложна насоченост могат да се посочат получени експериментални данни и зависимости с разработената методика за знакопроменливо натоварване; взаимовръзката между микроструктурата и механичните характеристики на изследваната стомана при различни технологични и химични условия. Получените резултати предоставят информация при избор за изработване на детайли в съответствие с реалните експлоатационните условия на работа.

## **8. Аprobация на изследването**

Основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните научни форуми и издания:

### ***Конференции:***

- International Conference "NDT Days 2017" – Sozopol

### ***Списания:***

- Известия на съюза на учените – Варна 1'2016 ст.65
- НТС, ТУ-Варна брой 1, 2016
- Bulgarian society for NTD international journal "NTD days" volume 1, issue 4, 2018
- Дни На Безразрушителния Контрол 2017" бр.1
- Годишник на ТУ-Варна , 2018
- Eastern Academic Journal ISSN: 2367-7384 Issue 2, pp.69-75, June, 2016

## **9. Публикации по дисертационния труд**

Основните етапи от разработването на дисертационния труд са отразени в 5 публикации, списък на които е приложен в края на автореферата.

## СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### Глава I. Анализ на някои аспекти от изследванията по проблема

В първа глава е представен литературен обзор, в който са засегнати основните технологични и химични условия при работещи в агресивни среди корозоустойчиви стомани. Разгледана е кинетиката на процеса зараждането и развитието на пукнатини. Разгледани са методите за изследване на дълготрайността, методите за заваряване, корозионните процеси при корозоустойчиви стомани и влиянието на легиращите елементи.

Обърнато е внимание на основни характеристики определящи цикличната устойчивост на стомани устойчиви на корозия и корозионни характеристики на уякчения слой след нискотемпературно газово азотиране – карбонитриране.

### Глава II. Материали и методики на изследване

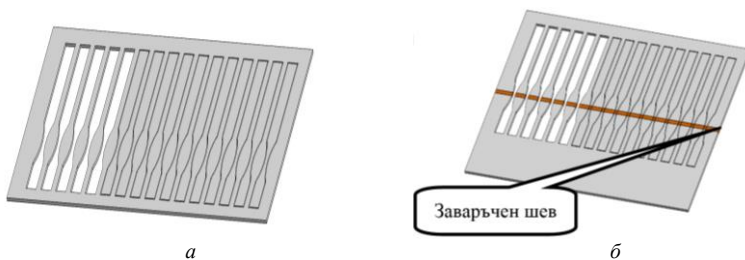
Във втора глава са разгледани методиките и материалите, които са подложени на циклично натоварване.

#### 2.1. Методика за изработване на образци

На фиг. 1. са показани изрязани на лазер незаварени и заварени образци.

**Незаварени образци.** От стомана SAF2507 с размери 350мм на 200мм и дебелина 3мм са изрязани на лазер образци за умора фиг. 1.а.

**Заварени образци.** От стомана SAF2507 са подготвени две плочи с размери 150мм на 350мм с дебелина 3мм. Двете плочи са заварени едностранно една към друга чрез електродъгово заваряване. Използвани са електроди ESAB ОК 68.82. Плочите са притиснати в четирите ъгъла за да се избегне изкривяването им. Шлифовани са грубо за да могат да бъдат изрязани на лазер. Заварената плоча се охлаждени са скоростно. Фиг. 1.б

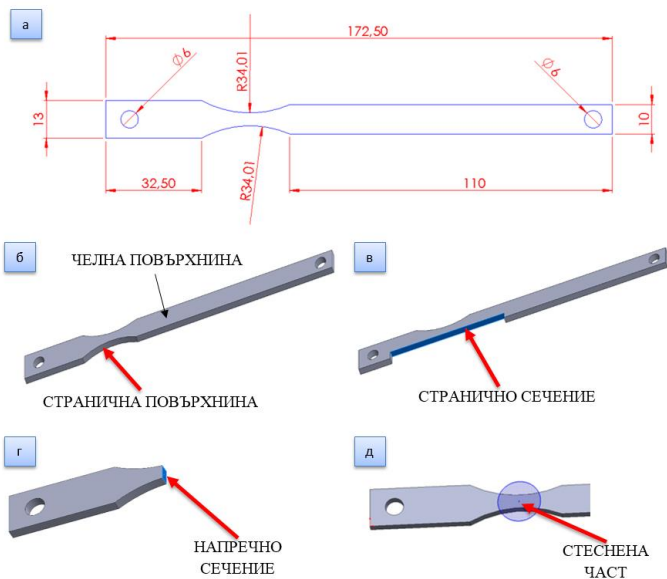


Фиг.1. Изрязани на лазер образци, а)незаварени; б)заварени.

**Геометрични размери и означения.** На фиг.2.а са показани геометричните размери на изследваните образци. Дължина на образца 172,5 мм, широчина на опашката



13 мм(място за захващане във вибромасата), широчина на свободната част 10 мм. На фиг.2.б –д са показани всички използвани в настоящата работа означения.



Фиг.2. Геометрични размери и означения.

## 2.2. Методика за определяне на работните режими на установката за циклично натоварване.

Приложението solidworks 3D разполага с голям набор от инструменти за различни по вид изследвания. За нас интерес представлява инструмента – frequency(честота) и fatigue(умора), чрез него ще можем да изчислим собствената честота на образеца и ориентировъчния брой цикли, които могат да послужат за ориентир при избор на работни режими на установката за циклично натоварване.

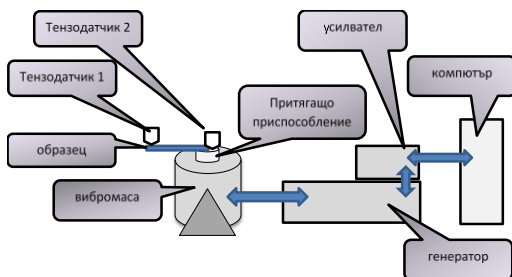
## 2.3. Корозионни изпитвания.

Образците се поставят в стъклен съд, който предварително се пълни с технологичен разтвор. Пробите са дистанцирани от дъното на съда за да се обмократ от разтвора всичките им повърхнини. Съда се поставя в суха камера на термостата. Камерата е изработена от чиста мед и външната и повърхнина се облича от нагрята вода до зададената температура. На изследваните проби се определя масата, с помощта на прецизна везна. За целите на това изследване образците са поставени в корозионна среда съставена от азотна киселина, солна киселина и морска сол. Използваната пропорция е в

1L. вода се прибавят 15 % морска сол, 1% азотна киселина и 3% солна киселина при температура 60°C (*МАСК60*). Образците престояват **368 часа** общо в разтвора, като на всеки 48 часа се изваждат, изтеглят се и се записва разликата в теглото им.

#### 2.4. Методика за изпитване на умора.

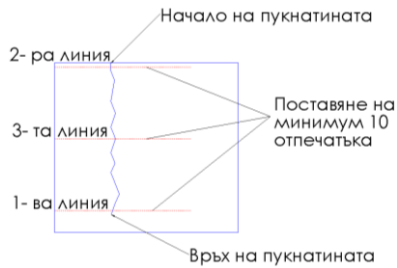
Образците се закрепват здраво в специално приспособление изработено за конкретната вибромаса. При недостатъчна сила на притягане в процеса на работа от вибрационните сили започва развиване на болтовете, а от там подаване на грешни данни от тензо-датчиците. Кабелите от тензо-датчиците трябва да бъдат внимателно прикрепени и да нямат допир до изследваният образец. Използва се специално подбрана честота която да отговаря на размера на образца. Амплитудата на натоварването се определя в зависимост от избраната стъпка от експерименталният план. Софтуерът предоставя възможност за определяне на момента на образуване на пукнатина която в повечето случаи е видима само при голямо увеличение фиг.3.



Фиг.3. Схема на установката за определяне уморната якост на материала.

#### 2.5. Методика за определяне уякчената област в зоната на формиране на пукнатина.

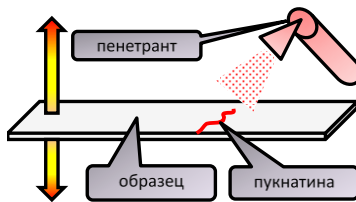
Изрязаната проба се поставя в скоба с метално фолио между отделните обекти на наблюдение с дебелина до 0,1мм фиг.11. Използва се приставка за измерване на микротвърдост „Викерс”. Изследваната част на образца в която се намира пукнатината се разделя на три участъка посредством три хоризонтални линии. Поставят се минимум 10 отпечатъка максимално близко един до друг. Първата линия е до върха на пукнатината, втората линия е максимално близо до началото на пукнатината, третата линия е на равно разстояние между първата и втората линия както е показано на фиг.4 Първият отпечатък е максимално близо до пукнатината, останалите се разполагат един след друг, като броят им зависи от дължината на изследваната зона. Методиката се прилага както за челно така и за странично сечение.



Фиг.4. Схема на поставяне на отпечатъци.

## 2.6. Методика за определяне на $DA/DN$ – растеж на пукнатината за цикъл.

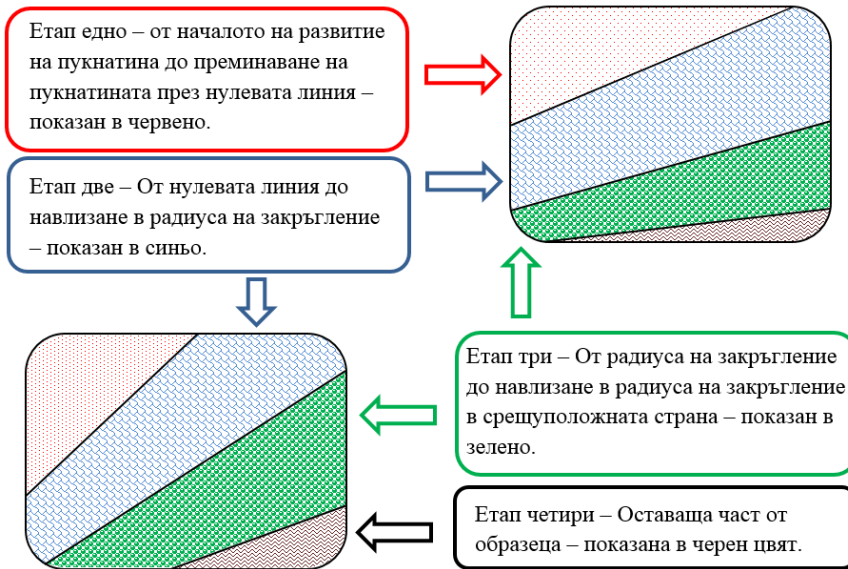
Разработена е методика за определяне на скоростта на растеж на пукнатината. При изпитване на умора след преминаване на определен брой цикли, софтуерът предоставя индикация отразяваща наличието на микропукнатина. Тази пукнатина е невидима дори при много големи увеличения. Чрез дълбоко проникващ пенетрант отново няма възможност за обозначаване на пукнатината поради факта, че тя е с много малка широчина. По тази причина пенетранта се използва само като обозначител на растежа на пукнатината при изпитването на умора. В момента на изпитване образеца изпитва опън-натискови напрежения увеличаващи широчината на пукнатина и по този начин пенетранта прониква в нея предоставяйки визуални данни за нейното разрастване.фиг.5.



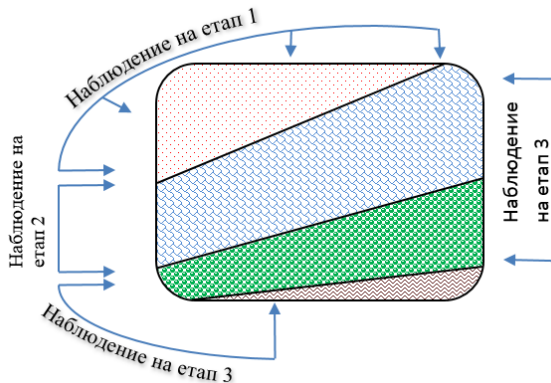
Фиг.5. Схема на установката за определяне на скоростта на развитие на пукнатина.

## 2.7. Методика за определяне развитието на фронта на пукнатината в напречно сечение.

Разработена е методика за определяне на фронта на пукнатината в напречно сечение след наблюдение на получените ломове от проведените експерименти. Определени са четири етапа за наблюдение показани на Фиг. 6. По време на всеки етап могат да бъдат заснемани допълнителни точки за по – точното му изобразяване. След етап едно пукнатината се наблюдава само напречно от двете страни на образеца. Фиг.7



Фиг.6. Етапи на развитие на пукнатината.

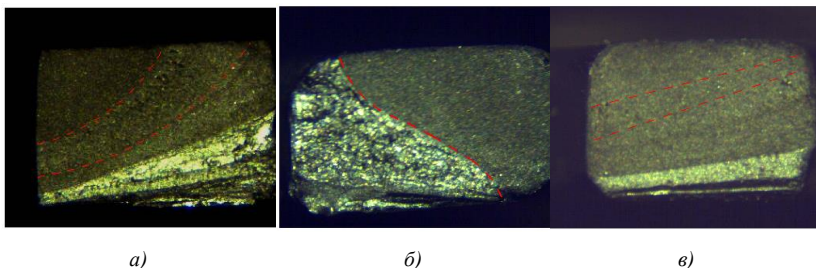


Фиг.7. Схема на наблюдение.

## 2.8. Методика за проследяване на развитието на пукнатината в дълбочина и създаване на 3D профил.

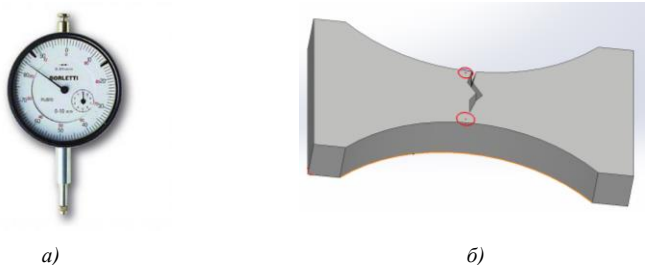
По време на циклично натоварване развитието на пукнатината може да бъде проследено в 2D пространството, посредством методика „Методика за определяне развитието на фронта на пукнатината в напречно сечение“. Фронтът на пукнатината в този случай е предполагаема линия, като формата му може да бъде разнообразна в

различните етапи на развитие. На фиг.8 а) е показан дъгообразен профил, на фиг.8 б) е показан S – образен профил, на фиг.8 в) е показан профил, който е почти права линия.



Фиг.8. Профили на фронта на развитие на пукнатини, а) дъгообразен профил; б) S – образен профил; в) профил, който е почти права линия.

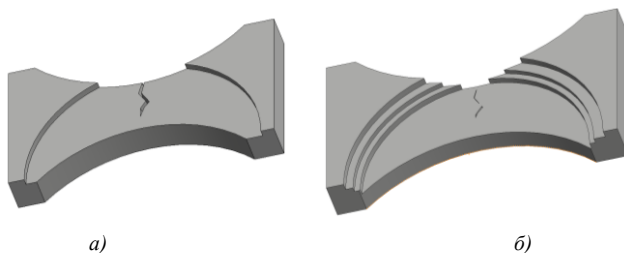
Разработена е методика за проследяване на пукнатината в дълбочина с която ясно да се определи вида, посоката и размера на фронта при различна дълбочина. При достигане на избраната дължина и дълбочина на пукнатината, образеца се измерва за равнинност в зоната на пукнатината. Използва се индикаторен часовник закрепен към магнитната стойка, позволяващ изключително точно измерване на отклоненията в повърхностите.фиг.9.а. Измерват се минимум две точки с точност до третия символ. На фиг.9.б схематично са показани местата на измерване.



Фиг.9. Измерване на повърхностите, а)индикаторен часовник; б) схематично са показани местата на измерване.

След първоначалното замерване с помощта на шмиргел се отнема слой от челната повърхнина. Отнетият слой се замерва по начина показан на фиг.9.б и се заснема с микроскоп с дигитална камера, като процедурата се повтаря за всеки отнет слой. Заснемането позволява изграждане на точния фронт на пукнатината и нейният профил в

3D пространството. На фиг.10 са показани схематично етапите на процеса, на фиг.10.а отнет един слой, на фиг.10.б отнети три слоя.



Фиг.10. Етапи на методиката, а) отнет един слой; б) отнети три слоя.

За по добро онагледяване на получените резултати при отнемането на слой, повърхнината може да бъде полирана, като последователно се използват шкурки с размер от P100 до P2000.

## 2.9. Методика за подлагане на образци на нискотемпературно газово азотиране - карбонитриране.

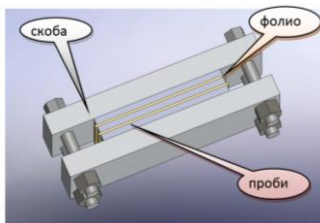
Методика за азотиране - карбонитриране на ферито - аустенитна стомана в лабораторна 2 – литрова шахтова пещ. Режимът на работа е следния:

1. Нагриване на пеща до зададената температура
2. Зареждане на пеща с  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , поставяне на дъното с цел да се избегне пасивация на повърхнината на пробите (получаване на окисен слой, който е много стабилен и псе явява като бариера за дифузията на N) и зареждане с подготвените проби.
3. При достигане  $T < 100^\circ\text{C}$ , се пуска амонак.
4. Първи работен; цикъл,  $T = 450^\circ\text{C}$ , се прима за начало на режима и се фиксират  $\text{NH}_3 = 120\frac{\text{h}}{\text{h}}$ ,  $\tau = 20\text{h NH}_3$ .
5. Втори работен; цикъл-след 20тия час  $T = 450^\circ\text{C}$ ,  $\frac{\text{NH}_3}{\text{CO}_2} = \frac{120\frac{\text{h}}{\text{h}}}{20\frac{\text{h}}{\text{h}}}$ ,  $\tau = 10\text{h}$ .
6. Охлаждането на пробите продължава в пеща с подаване на  $\text{NH}_3$ , целта е да се избегне окисляване до спадане на температурата под  $100^\circ\text{C}$ .

## 2.10 Металографски изследвания

Изрязаната проба се поставя в скоба. При наблюдение на повърхнините на пробите се използват скоби, а за повърхнините на пробите (при ХТО , повърхностно закаляване и други случаи за контролиране на повърхностния слой) се използват скоби,

като за запазване на слоевете между повърхността на образците и планката се поставя метално фолио с дебелина до 0,1мм фиг.11



Фиг.11. Пакетиране на пробата -стягане на проби между скоби и фолио.

### 2.11. Макроструктурен анализ

Макроструктурният анализ е металографски метод за изследване структурата на металите с невъоръжено око, с лупа, или с подходящи микроскопи при увеличения до 50 пъти. При него се наблюдава (без или след специална подготовка): повърхността на металните изделия в прясно разрушените участъци (лома на металите) или повърхността на сечения, направени през зони, които представляват интерес за специалиста.

### 2.12. Методика за определяне на макро и микротвърдост по Викерс.

При изследване на тънки слоеве изградени върху основния метал, основен метод за получаване на конкретни механични свойства на получените фази или смеси в зоните, е определяне на микротвърдост по Викерс. Измерването, може да се проведе със специализирана установка за измерване на микротвърдост, примерно ПМТ-3. Възможно е използването на приставка за микротвърдост HANEMANN съгласно БДС 2531- 70, за измерване на микротвърдост. Монтира се на оптичен микроскоп тип "NEOFOT 2"

### 2.13. Методика за фазов качествен анализ.

Фазовия рентгеноструктурен анализ е основан на това, че всяка фаза има своя специфична кристална решетка, проявяваща се на рентгенограмата със собствени линии. Многофазната сплав представлява резултат от суперпозиции на рентгенограмите на отделните фази. Интензитета на линиите им са пропорционални на техните количества в сплавта. Фазата, съдържанието на която в сплавите е малко, ще бъде представена само от най-интензивните си линии, които се наричат "реперни" линии. Минималното количество вещество, при което все още се забелязват реперни линии, определя чувствителността на фазовия анализ. Изследванията са направени с използване на рентгенов дифрактометър УРС-50ИМ, в излъчване на хромов анод, с използване на ванадиев филтър.

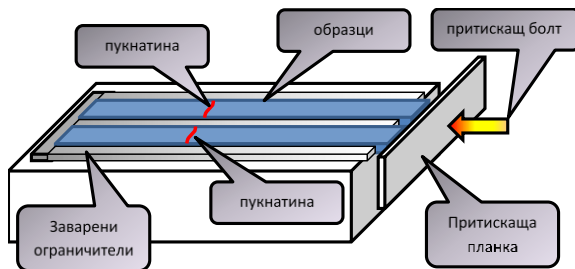
#### 2.14. Методика за определяне на количеството на остатъчен аустенит чрез количествен фазов анализ на стоманата.

Рентгеновият количествен фазов анализ е основан на това, че интегралните интензитети на дифракционните линии, принадлежат на различните фази, зависят от концентрацията на тези фази в сплавта. От друга страна, при едно и също съдържание на определената фаза, интензитета на нейните линии зависи от отражателната способност на съответната фамилия кристалографски плоскости и от съотношението на коефициентите на отслабване на рентгеновите лъчи за изследваната фаза.

Различните методи на количествен фазов анализ са основани на съпоставката на интензитета на линиите от търсените фази, избрани като линии за сравнение.

#### 2.15. Методика за микроструктурен анализ на пукнатина

Преди образците да бъдат поставени в условия на умора трябва да бъдат перфектно полирани, като се преминава от шкурка 100 до 1000. Следва полиране до перфектно гладка повърхност и липса на каквито и да е драскотини. При разрушаване на образците е видим само лома на съответният образец, но той не дава ясна представа и оценка за параметрите и особеностите на пукнатината. Чрез специално изработено приспособление (фиг.12) частите на вече разрушеният образец се притискат една към друга по протежението на пукнатината. Избрано е да се поставят едновременно два образца с цел равномерното им полиране. Този метод не е достатъчно обективен и не предоставя пълната информация за параметрите на пукнатината, поради факта, че вече разрушените образци трудно могат да бъдат наместени точно един към друг.



Фиг.12. Схема на приспособление за микроструктурен анализ на пукнатини.

Когато пукнатината достигне определена дължина (преди видимото и разтваряне), видима благодарение на методиката за DN/DA образеца се сваля от вибромасата, като по този начин чрез притискане на двата края на детайла се цели перфектно допиране на пукнатината. Следва заливане със полиестерна смола спомагаща

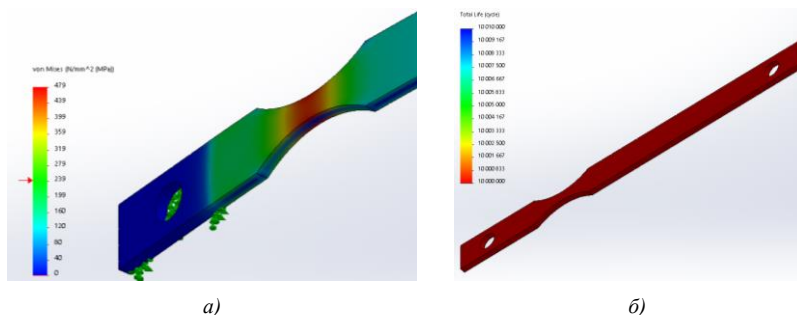


за ясно очертаване на ръбовете и недопускаща неправилното отразяване на светлината при последващият микроструктурен анализ. Използвайки разтвор на царска вода с последващо полиране и изсушаване, разяждаме структурата около пукнатината. Процеса се повтаря до постигане на заложеният резултат, а в конкретният случай ясно очертаване на границите на зърната. Чрез изработената методика получаваме ясни изображения на линиите на приплъзване, каква е причината да спре или да се отклони пукнатината. При снемане на необходимите данни може да се разгледа пукнатината в дълбочина като се отнеме още един слой преминавайки през шкурки от 100 до 1000.

### ГЛАВА III. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

#### 3.1. Симуляционен анализ на образци от ферито - аустенитна стомана SAF2507.

Целта на симуляционното изследване е да бъдат установени граници на работните режими на експерименталната установка. ( амплитуда, честота, вид на сигнала). Чрез методика 2.2. на програмният продукт Solidworks 3D е изчислена резонансната честота на образците и е симулирана дълготрайността им. Резонансната честота е 55Hz. При проведения симуляционен анализ с циклично натоварване от 700 Мра, дълготрайността на образеца е 4000 цикъла и е. Натоварване от 700 Мра ще бъде прието като максимално за целите на това изследване. Следващият тест е направен с цел да се симулира предполагаемата минимална граница под която не се наблюдават пукнатини. На фиг.13.a резултатите показват, че при натоварване от 470 Мра дълготрайността на образеца е над 10 000 000 цикъла (фиг.13.б), като това натоварване ще се приеме за минимално.



Фиг.13. Симулятивен анализ на образец подложен на натоварване от 470 Мра.

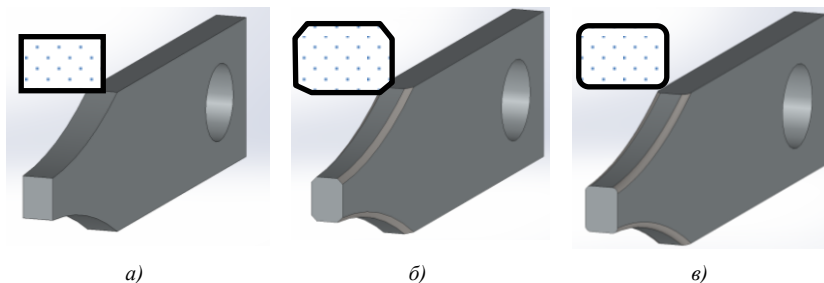
Посредством програмният продукт Solidworks 3D е симулирана дълготрайността и на заварени образци от ферито - аустенитна стомана SAF2507. При

натоварване от 480 Мра дълготрайността на образца е под 4000 цикъла. Натоварване от 480 Мра ще бъде прието като максимално за целите на това изследване. Следващият тест е направен с цел да се симулира предполагаемата минимална граница под която не се наблюдават пукнатини. Резултатите показват, че при натоварване от 300 Мра дълготрайността на образца е над 10 000 000 цикъла, като това натоварване ще се приеме за минимално.

### 3.2. Влияние на радиуси на закръгление върху цикличната умора.

Експерименталните данни, които бяха събрани по време на цикличните изпитания насочиха вниманието ни към образци, които са извън нормалното отклонение(5%) от SN – кривите. При направеното макроструктурно изследване е установена разлика в радиусите им на закръгление. За по – добро онагледяване на влиянието на радиусите на закръгление е направено допълнително изследване с конкретно подобрени режими на натоварване при различни радиуси.

За целите на това изследване са подготвени три групи образци, показани на фиг.14 Фиг.14 а) Група 1 – образци без предварителна обработка - с 90° ръбове. Фиг.14 б) Група 2 – образци, на които е премахнат връх на ръба (фаска) Фиг.14 в) Група 3 – образци със заоблени ръбове.



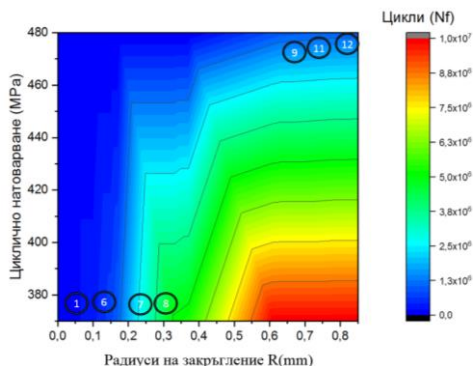
Фиг.14. Сечение и видове обработка в зоната на циклично натоварване.

Всички образци бяха подложени на циклично натоварване от 370Мра. Образците преминали  $1 \times 10^7$  цикли се натоварват отново със стъпка от 30Мра до разрушаване в посочения диапазон. Резултатите са представени в табл.1 като под всеки образец са посочени циклите  $1 \times 10^6$  След разрушаване на образците, същите са срязани напречно в зоната на пукнатина и са заснети. Измерени са ъглите и радиусите им на закръгление. При всички измерени ъгли на ръбовете, пукнатината започва от ръб, който е по – близък до челната повърхнина и по – малкия в сравнение с останалите челни ъгли.(от табл. 1)

Табл.1

групи подбрани по форма на ръбовете на пробата		група 1			група 2			група 3					
циклично натоварване	№ НА ПРОБИТЕ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Радиуси на закръгление, мм	0,02	0,03	0,02	2x 0,02	2x 0,12	2x 0,15	0,33	0,36	0,63	0,61	0,75	0,78
±370 Мра	брой цикли до разрушаване, $1 \times 10^6$	0,30	0,35	0,31	0,33	0,75	1,05	5,12	5,31	не са разрушени при 370Мра			
±480 Мра	брой цикли до разрушаване, $1 \times 10^6$	разрушени при натоварване от 370Мра							0,88	0,95	1,07	1,09	

На фиг.15. е съставен графичен модел от табл.1. По вертикала в Мра е отбелязано цикличното натоварване, по хоризонтала са нанесени радиусите на закръгление на всички образци. С цвetoва гама от червено до синьо са отбелязани циклите до разрушаване на образците. С номер е показано местоположението в графиката на избрани образци.

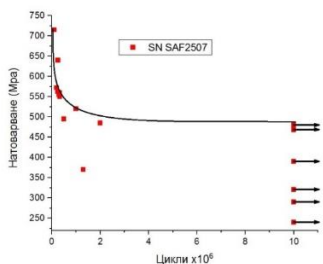


Фиг.15. Графичен модел от табл.1.

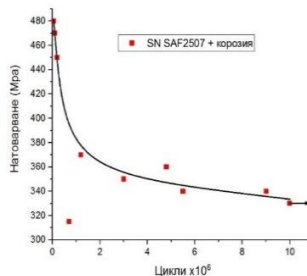
### 3.3. Провеждане на циклични изпитания на подготвените образци.

Резултатите от цикличните изпитания на образците, които не са предварително излагани на корозионно въздействие са графично изобразени на фиг.16. При тях е установена границата под която не се наблюдава зараждане на пукнатини 480 Мра (в диапазона до  $1 \times 10^7$  цикли). Въз основа на проведените изпитания на образци след корозионно въздействие е установена граница под която не се наблюдава зараждане на пукнатини и е съставена крива на умора, показана на фиг.17. При образците с измерени

до 0,5% загуба на тегло в корозионната среда, не се наблюдава зараждане на пукнатини до 335MPa в диапазона до  $10^7$  цикли.



Фиг.16 S-N крива на образци от стомана SAF2507.



Фиг.17. S-N крива на образци от стомана SAF2507 с предварително корозионно въздействие.

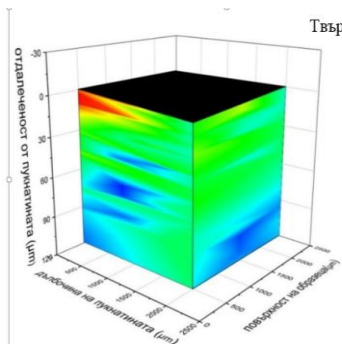
На фиг.18 са представени резултатите от циклични натоварвания преди и след корозионно въздействие като на изолиниите във легендата са обозначени процентните загуби на тегло. От тука се вижда, че синята зона са образците без загуба на тегло (без корозионно въздействие). От графичния модел може да бъде направен анализ, че силно корозиралите проби (формирали концентратор за развитие на пукнатина) в следствие на междукристална корозия издържат значително по-малко на циклично натоварване. Установено е също така, че образците със процентна загуба на тегло до 0,25% от корозионното въздействие нямат промяна на дълготрайността.



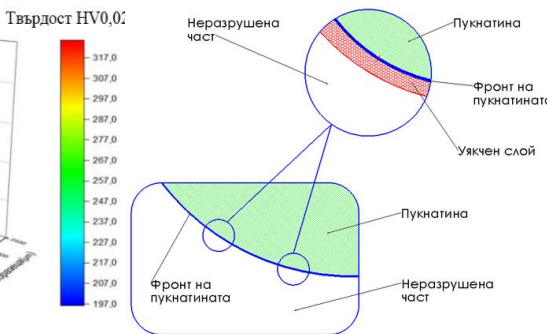
Фиг.18. Влияние на концентраторите създадени от корозионна среда върху дълготрайността на образците.

На фиг.19 е визуализирано разпределението на твърдостта, като с черен цвят е показана повърхнината на пукнатината. От фигурата става видно, че максималната твърдост визуализирана в червено е 320 HV0,02 . Това е и максимално уякчената зона в

близост на развилата се пукнатина и е в следствие от протичащите уморни процеси. На фиг.20 е показан схематичен модел на уякчения слой в напречно сечение.

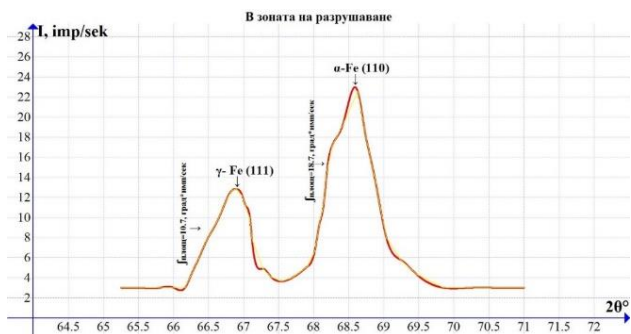


Фиг.19. 3D – модел на разпределението на твърдостта в зоните около пукнатината.



Фиг.20. Модел на уякчения слой в напречно сечение.

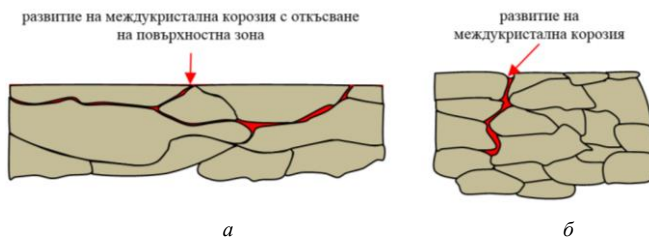
На фиг.21. е показан рентгеноструктурен анализ на изследваните образци в зоната на разрушаване. В тази зона са определени фазите и тяхното съотношение, като  $\gamma - \text{Fe}$  (111) = 46%, а  $\alpha - \text{Fe}(110)$  = 54%. Измерените интегрални площи съответно в зоната на разрушаване са за  $\gamma - \text{Fe}(111)$  = 10,7 град\*имп/сек. Наблюдаваното уширение на линията в зоната на разрушаване спрямо изходния образец се дължи на повишената дислокационна плътност и повишените вътрешни напрежения (които деформират кристалографските равнини). Подобен е случая и с феритната фаза, като е разглеждана плоскостта 110. Интегралната площ в изходно състояние е 13,7 град\*имп/сек, а в зоната на разрушаване е 18,7 град\*имп/сек. Следователно и при тази фаза ( $\alpha - \text{Fe}(110)$ ) се наблюдава значително уякчаване в следствие протеклите деформационни процеси, при създаване и развитие на пукнатината.



Фиг.21. Рентгеноструктурен анализ в зоната на разрушаване.

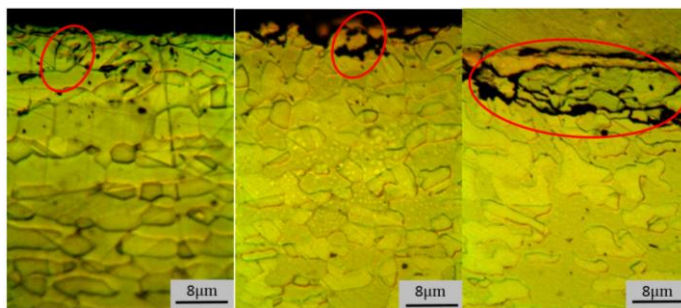
### 3.4 Микроструктурен анализ на образци от ферито –аустенитна стомана след корозионно въздействие.

Характерно при корозионно устойчивите стомани, е че в следствие на високото съдържание на хром се получава пасивиращ слой на повърхността който защитава повърхността от по нататъшно въздействие. В зони където в следствие на дълготраен корозионен процес се е получила депасивация на повърхностния слой,



фиг.22. Модел на междукристална корозия, а) структури с влакнест характер; б) при зърна със равноосна форма.

протича корозия, която за тези стомани е характерна като междукристална корозия. Това е така защото корозията протича по границата на зърната в зони бедни на хром. На фиг.22.а) представеният модел отговаря на досега разглежданите структури, които са с влакнест характер. При този тип структури се наблюдава междукристална корозия, която протича на по-малка дълбочина, но отделя по-голяма площ. На фиг.22.б) при зърна със равноосна форма, междукристалната корозия протича на по-голяма дълбочина, но с по-малка площ. Характерно при корозионно устойчивите стомани, е че в следствие на високото съдържание на хром се получава пасивиращ слой на повърхността който защитава повърхността от по нататъшно въздействие. В зони където в следствие на



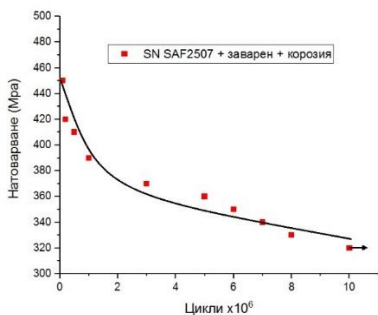
Фиг.23. Междукристална корозия с увеличение X1250

дълготраен корозионен процес се е получила депасивация на повърхностния слой, протича корозия, която за тези стомани е характерна като междукристална корозия. Това

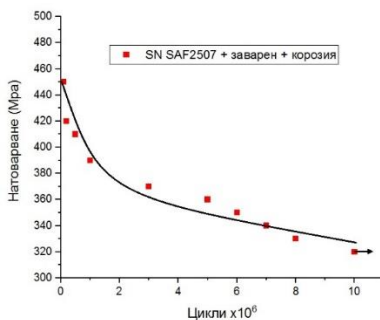
е така защото корозията протича по границата на зърната в зони бедни на хром. На фиг.23 от проведения експеримент, се наблюдава формиране на зародиши на междукристална корозия в следствие се наблюдава като втори етап отделяне на отделни зърна от повърхността на пробата, като процеса достига до етап при който цяла група от зърна се отделя тангенциално на пробата поради факта, че структурата е влакнеста.

### 3.5. Провеждане на циклични изпитания на подготвените заварени образци.

Резултатите от цикличните изпитания на образците, които не са предварително излагани на корозионно въздействие са графично изобразени на фиг.24. При тях е установена границата под която не се наблюдава зареждане на пукнатини 340 МРа (в диапазона до  $1 \times 10^7$  цикли). Въз основа на проведените изпитания на образци след корозионно въздействие е установена граница под която не се наблюдава зареждане на пукнатини и е съставена крива на умора, показана на фиг.25. При образците с измерени до 0,33% загуба на тегло в корозионната среда, не се наблюдава зареждане на пукнатини до 320МРа в диапазона до  $10^7$  цикли.



Фиг. 24. S-N крива на заварени образци без предварително корозионно въздействие.

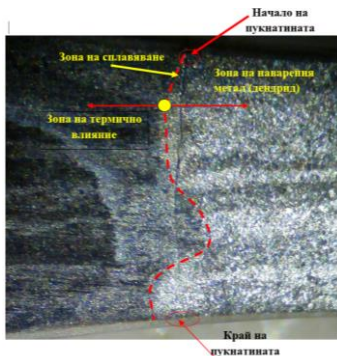


Фиг. 25. S-N крива на заварени образци с предварително корозионно въздействие.

### 3.6. Макроструктурен анализ на заварени образци от ферито –аустенитна стомана след корозионно въздействие.

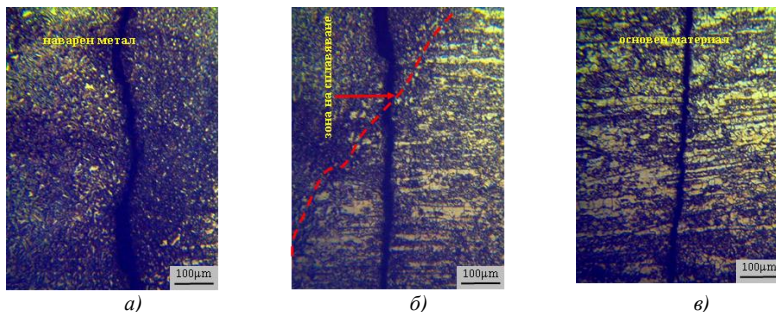
На фиг.26 се наблюдава развитието на пукнатината през зоната на сплавяване. Фокусът на пукнатината се е формирал в зоната на сплавяване. Очертана е зоната на сплавяване (ЗС) и се вижда движението на пукнатината преминаващо в близост до

самата зона. Зоната на сплавяване има S – образна форма, а пукнатината върви перпендикулярно на страничната повърхнина и пресича няколко пъти ЗС.



Фиг.26. Развитие на пукнатината през зоната на сплавяване челна повърхнина.

На фиг.27 е представено движението на пукнатината в странично сечение през наварения метал, пресичаща ЗС и преминаваща в основния метал. Фиг.27.а-в. Характерно е, че преминавайки през ЗНМ пукнатината има криволинеен характер, а преминавайки през ЗС и навлизайки в основния материал тя има линеен характер.



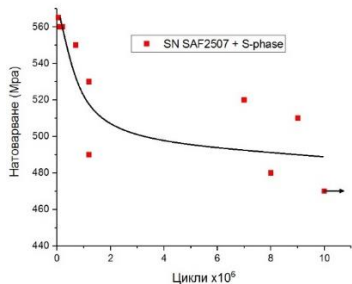
Фиг.27. Развитие на пукнатина през зоната на сплавяване, а) развитие на пукнатината през наварения метал X100; б) развитие на пукнатината през зоната на сплавяване X100; в) развитие на пукнатината през основния материал X100.

### 3.7. Провеждане на циклични изпитания на подготвените образци след нискотемпературно газово азотиране – карбонитриране (НГАК).

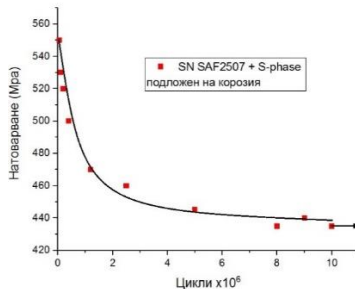
Резултатите от цикличните изпитания на образците, които не са предварително излагани на корозионно въздействие са графично изобразени на фиг.28. При тях е установена границата под която не се наблюдава зараждане на пукнатини 470 МРа (в диапазона до  $1 \times 10^7$  цикли). Въз основа на проведените изпитания на образци след корозионно въздействие е установена граница под която не се наблюдава зараждане на



пукнатини и е съставена крива на умора, показана на фиг.29. При образците с измерени до 0,17% загуба на тегло в корозионната среда, не се наблюдава зареждане на пукнатини до 435MPa в диапазона до  $10^7$  цикли.



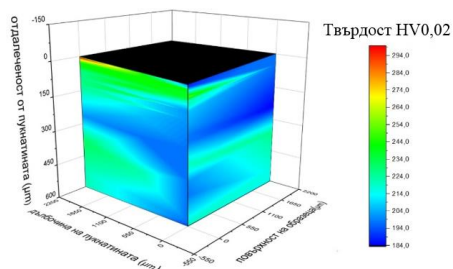
Фиг.28. S-N крива на НКГА образци.



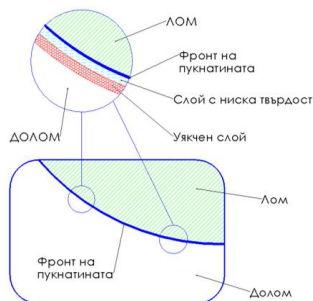
Фиг.29. S-N крива на НКГА образци подложени на корозионно въздействие

На фиг.30 са визуализирани разпределението на твърдостта, като с черен цвят е показана повърхнината на пукнатината. От фигурата става видно, че максималната твърдост визуализирана в червено е 297 HV0,02 . Това е и максимално уякчената зона в близост на развилата се пукнатина и е в следствие от протичащите уморни процеси.

На фиг.31 е показан схематичен модел на уякчения слой в напречно сечение. Показан е слой с ниска твърдост, непосредствено пред фронта на пукнатината, последван от уякчен слой. **Това е и една от разликите между образците подложени на НКГА и останалите образци.**



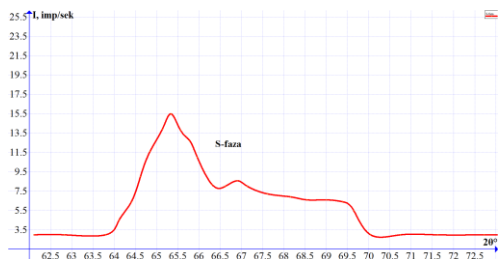
Фиг.30. 3D – модел на разпределението на твърдостта.



Фиг.31. Модел на уякчения слой в напречно сечение

### 3.8. Рентгеноструктурен анализ на нискотемпературно газово азотирани – карбонитрирани образци от ферито – аустенитна стомана.

На фиг.32 изследваната проба след НГАК е проведен рентгеноструктурен анализ с цел установяване на фазовия състав в повърхностния слой. На фиг.32 е показан профила на получената фаза - S – фаза, която е стенно центрирана кристална решетка с вмесени азотни атоми. Този тип фаза както се вижда от фигурата има висока плътност (от микроструктурен анализ е установена дебели 3-4 микрона) и висока отражателна

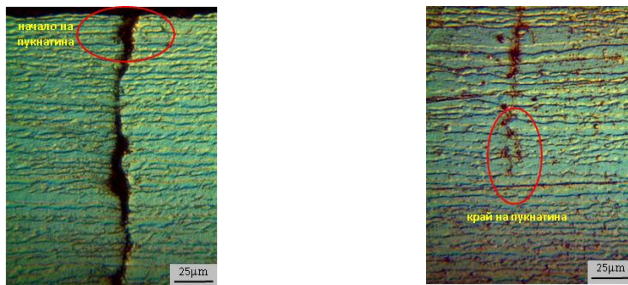


Фиг.32. Рентгеноструктурен анализ на НГАК образци( $\gamma - Fe(111)$ ).

способност в следствие на което рентгеновия лъч не преминава през нея. Независимо от малката дебелина не са отчетени линиите на ферит и аустенит, които се намират под нитридния слой.

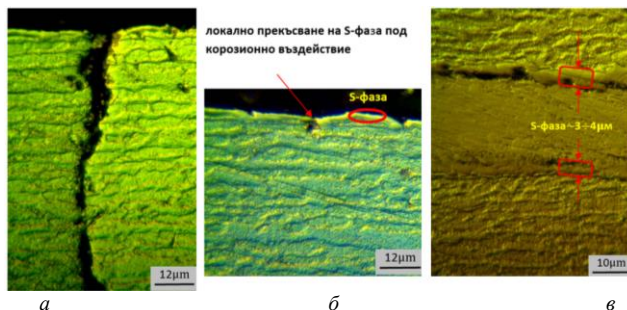
### 3.9 Микроструктурен анализ на образци след нискотемпературно газово азотиране – карбонитриране от ферито –аустенитна стомана преди и след корозионно въздействие.

За по прецизно проследяване на пукнатината и установяване на повърхностния слой (с много малка дебелина) са направени микроструктури с по-голямо увеличение фиг.33. а-б. На фиг.33.а се наблюдава фокус и нейното развитие, както и в челната повърхнина се



Фиг.33. Развитие на пукнатина, а) фокус на пукнатината с увеличение  $X400$ ; б) връх на пукнатина с увеличение  $X400$ .

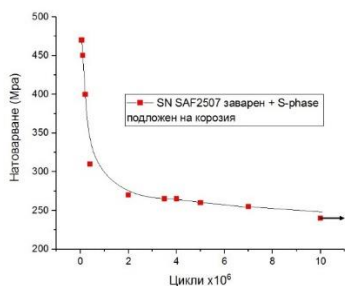
наблюдава тънкия повърхностен слой. На фиг.33.б наблюдаваме края на пукнатината, като около нейното развитие в следствие на динамичното натоварване могат да се проследят вторични отделения в района на развиващата се пукнатина (с по тъмен цвят). На фиг.34.а се наблюдава повърхностния слой. На фиг.34.б може да се проследят зони на локално прекъсване на С фазата, зона в която настъпва зараждането на пукнатината. На фиг.34.в е показана и измерена дебелината на повърхностния слой. От проведените микроструктурни изследвания може да се направи извод и да се построи модел за формиране и развитие на пукнатина в следствие корозионно въздействие.



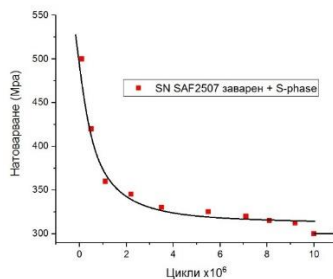
Фиг.34. Наблюдение на S-фаза с увеличение X800 и X1000, а) междукристална корозия с откъсване на зърна X800; б) локално прекъсване на S-фаза X800; в) ширина на S-фаза X1000

### 3.10. Провеждане на циклични изпитания на подготвените образци след нискотемпературно газово азотиране – карбонитриране (НГАК).

Въз основа на проведените изпитания на образци след корозионно въздействие е установена граница под която не се наблюдава зараждане на пукнатини и е съставена крива на умора, показана на фиг.35. При НГАК образците в корозионната среда, не се



Фиг.35. S-N крива на НКГА образци подложени на корозионно въздействие



Фиг.36. S-N крива на НКГА образци.

наблюдава зараждане на пукнатини до 240MPa в диапазона до  $10^7$  цикли. Резултатите от цикличните изпитания на НГАК образците, които не са предварително излагани на корозионно въздействие са графично изобразени на фиг.36. При тях е установена границата под която не се наблюдава зараждане на пукнатини 300MPa (в диапазона до  $1 \times 10^7$  цикли).

### 3.11. Рентгеноструктурен анализ на нискотемпературно газово азотиран – карбонитрирани образци от ферито – аустенитна стомана в зоната на наварен метал

На фиг.37 е представен проведенят рентгеноструктурен анализ на заварен образец подложен на НГАК в зоната на наварения метал. Може да се отчете, че в ЗНМ проведения качествен анализ отчита наличието на аустенит(111) и ферит(110). Възможно е в аустенитната линия да се е вместила и S-фазата. Двете линии са значително уширени. В количествено отношение можем да кажем, че количеството аустенит е 40% а ферита е 60%.



Фиг.37. Рентгеноструктурен анализ на НГАК от ФАС в ЗНМ.

### 3.12. Микроструктурен анализ на заварени образци след нискотемпературно газово азотиране – карбонитриране от ферито –аустенитна стомана преди и след корозионно въздействие.

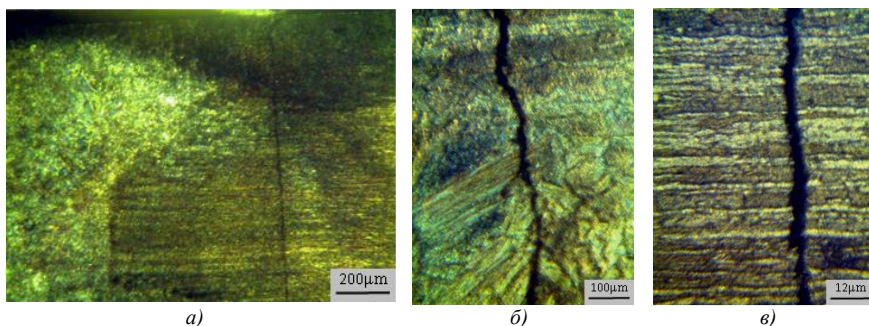
На фиг.38. е представена микроструктурата на пробата със формиран фокус, който е в ЗНМ. В тази зона се наблюдава повърхностно изградения уякчаващ слой след



Фиг.38. Микроструктура със формиран фокус, който е в ЗНМ Увеличение X800.

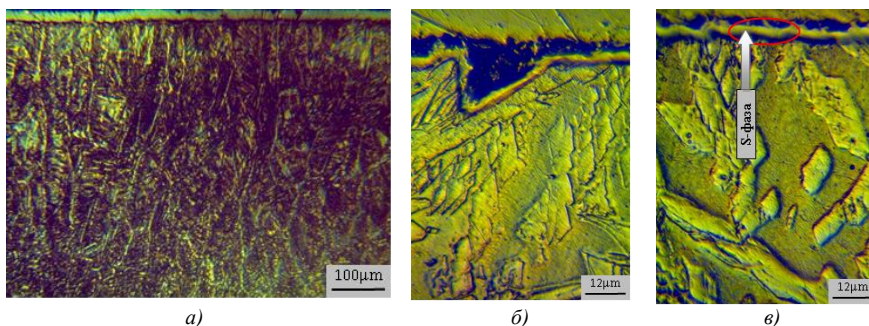
НГАК. Пукнатината започва от зона където имаме изтъняване и прекъсване на S-фазата в следствие на корозионно въздействие.

На фиг.39.а се наблюдава преминаването на пукнатината през зоната на наварения метал пресичайки ЗС и навлизането и в основния материал. Преминаването през НМ с дендриден характер е представено на фиг.39.б където преминаването на пукнатината е транскристално през дендридите. По същия механизъм пукнатината преминава и през влакнестата структура на основния материал.фиг.39.в.



Фиг.39. Наблюдение на пукнатината в зоната на наварен метал, а) пукнатина с увеличение X50; б) пукнатина в дендрид с увеличение X100; в) пукнатина извън дендридите X800.

Извън зоната на пукнатината в областта на НМ на фиг.40. се наблюдава уякчаващо покритие изградено върху дендридната структура. В зони с неравен релеф в наварената структура, покритието преминава през неравностите без да се прекъсва фиг.40.б-в



Фиг.40. Дендридна структура на наварения метал в зоната на пукнатината в странично сечение, а) увеличение X100; б) S – фазата е навлязла в концентратора и не е прекъсната увеличение X800; в) S – фаза с дебелина 2 -3 микрона, увеличение X800.

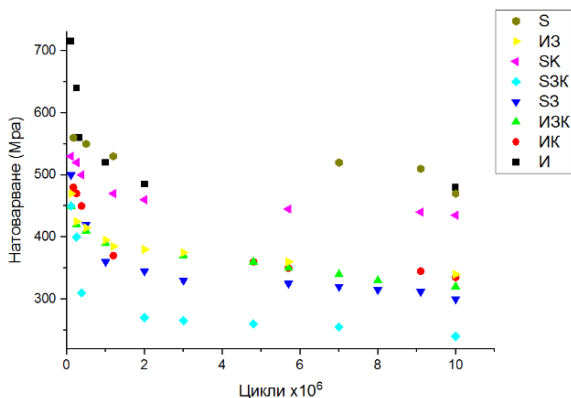
### ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА III

- ❖ Всички образци подлагани на циклично натоварване следва да имат радиуси на закръгление не по – малки от R0,61мм.( т.4.2, табл.4.1)
- ❖ Експериментално е установен момента на зараждане на пукнатина(фокус) на проби при различни технологични и химични условия.
- ❖ Чрез планиран и проведен експеримент са определяни дълготрайността на образци подложени на циклично натоварване при различни технологична и химични условия и са построени графични зависимости
- ❖ Установена зоната на уякчаване в оброста на пукнатината и е създаден 3D модел при различни технологична и химични условия.
- ❖ Определен е фронта на развитие на пукнатината при проведените фрактографски изследвания при различни технологична и химични условия.
- ❖ След проведените експерименти е локализирано местоположението и е установен момента на зараждане на фокус при различни технологични и химични условия на НГАК образци
- ❖ Чрез планиран и проведен експеримент са определяни дълготрайността на НГАК образци подложени на циклично натоварване при различни технологична и химични условия и са построени графични зависимости
- ❖ Установена зоната на уякчаване в оброста на пукнатината и е създаден 3D модел при различни технологична и химични условия на НГАК образци
- ❖ Установена зоната на уякчаване в оброста на пукнатината и е създаден 3D модел при различни технологична и химични условия на НГАК образци.

### ГЛАВА IV. СРАВНЕНИЯ И ОБОБЩЕНИЯ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

За по добро онагледяване на получените резултати на фиг.41 е направено сравнение на дълготрайността на различните групи. Като базова S-N крива е приета тази на изходния материал (в текста за образци от изходния материал ще бъде използвано обозначението И) При сравнение между образци И и образци след НГАК с изграден уякчен слой (в текста за хомогенния уякчен слой ще бъде използвано обозначението S е отчетено повишаване на дълготрайността и якостните характеристики на образците S. При сравнение между образци от И подложени на корозия (ИК) и образци с S подложени на корозия (SK) се забелязва значително подобряване на корозионните характеристики на образците SK. Якостните характеристики и дълготрайността на SK са близки до тези за И и S. Това сравнение показва, че слойт получен след НГАК освен повишени якостни

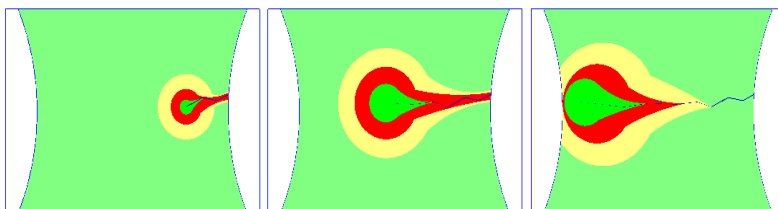
характеристики има значително подобрене и на устойчивостта срещу корозионно въздействие



Фиг.41. Сравнение на S-N криви при различни експериментални условия.

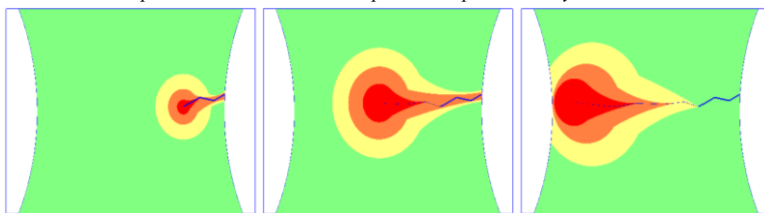
При сравнение на **заварени** образци подложени на корозия (ИЗК) и заварени образци с S подложени на корозия (S3K) се забелязва, че слой S не подобрява по никакъв начин характеристиките на образците, даже обратно на очакваното ги влошава. При сравнението на заварени образци (ИЗ) и заварени образци S (S3) се наблюдава понижаване на характеристиките на S3.

При образците подложени на НГАК фиг.42 се наблюдава зона с ниска твърдост (отбелязана със зелен цвят) в непосредствена близост до пукнатината (черен цвят), като след това следва зона която е значително уякчена (червен цвят). За разлика от образците със слой S, образците без този слой нямат зона с ниска твърдост, а се наблюдава уякчена зона в непосредствена близост до пукнатината (червен цвят). Фиг.43 При движението си пукнатината уякчава зона пред върха си, като я измества по посока на движението си. Уякчените зони отдалечени от върха на пукнатината по посока фокуса ѝ се разякчават.



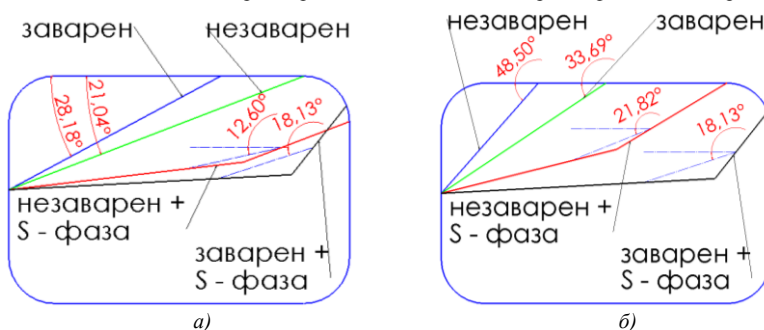
Фиг.42. Модел на уякчените зони на НГАК образци около върха на пукнатината и

разякчаване по посока обратна на развитие пукнатината.



Фиг.43. Модел на уякчените зони на образци без НГАК около върха на пукнатината и разякчаване по посока обратна на развитие пукнатината.

За по – добро онагледяване на резултатите сравнението е разделено по етапи. Разгледан е етап едно при образци от основния материал фиг.44.а и образци със



Фиг.44. Сравнение на фронта на пукнатината в етап I, а) без корозионно въздействие; б) с корозионно въздействие.

подложени на предварително корозионно въздействие фиг.44.б. На фиг.44.а се наблюдава, че при образците без слой S развитието на фронта на пукнатината е с по – голям ъгъл (21° до 28°) отколкото при образците със слой S (12° до 18°). На фиг.44.б са показани образците подложени на корозия. При еднакви условия сравнението показва, че образците подложени на предварително корозионно въздействие имат значително по – голям ъгъл на фронта на пукнатината. (от 18° до 49°) от образците без (от 18° до 28°). При образците подложени на НГАК и предварително корозионно въздействие се забелязва, че слой S (отбелязани с червен и черен цвят) задържа ъгъла на фронта на пукнатината по – малък (от 18° до 22°) от образците без този слой (от 34° до 49°) подложени на корозионно въздействие (отбелязани със зелен и син цвят) и се доближава до образците без предварително корозионно въздействие на фиг.44.а. При предварително корозионно въздействие слой S задържа увеличаване на ъгъла в диапазона от 0° до 10°. При образците без този слой, увеличението на ъгъла е значително по – голямо в диапазона от 5° до 27°.



Направено е изследване с цел изясняване скоростта на развитие на пукнатината при различните ъгли на фронта ѝ. За таз цел на 30 образци е проследено развитието на

Табл.2. Резултати от проведеното изследване.

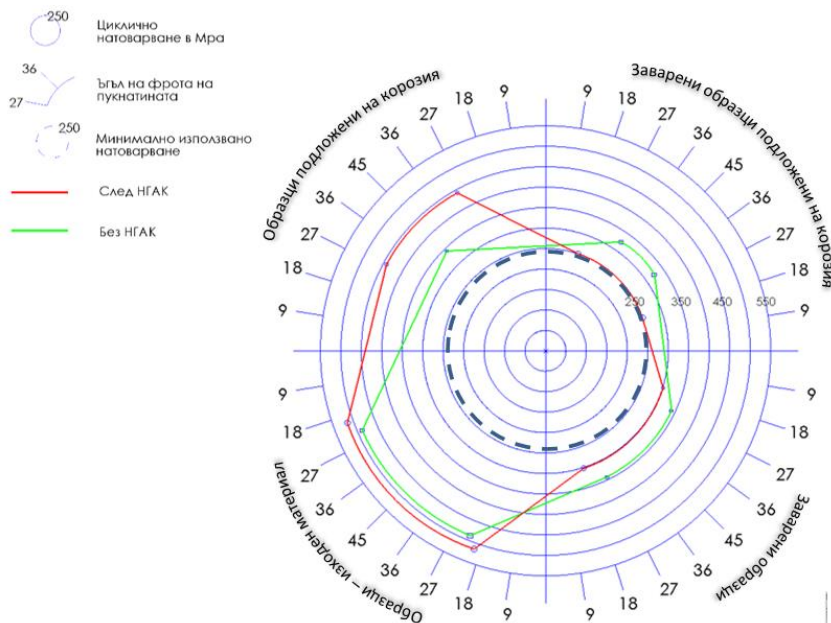
образец	Корозия		без корозия	
	Цикли x10 <sup>3</sup>	градуси	Цикли x10 <sup>3</sup>	градуси
SAF	7 - 40	45-12	70-90	21-6
SAF - заварен	15-50	34-9	50-80	25-8
SAF + S - фаза	70-100	29-8	90-110	20-2
SAF - заварен + S - фаза	70-90	18-2	70-90	18-4

пукнатината от появата на фокус до пълно разрушаване на образеца. Разглеждано е зараждането на пукнатината при всички образци. Образците които подлежат на изследване са със зародил се фокус след  $1 \times 10^6$ . Образците са подредени в групи и са показани в табл.2

В процеса на разрушаване на образци S се наблюдава, че изменението на фронта на пукнатината е с по-малък ъгъл спрямо останалите образци. При този тип на развитие на пукнатината дълготрайността е значително по-голяма от останалите типове пукнатини. При изграждане на повърхностно уякчаващ слой се създават повърхностни натискови напрежения, който увеличават дълговечността на материала и определя развитието на формата на пукнатината.

На фиг.45 е представен съставеният схематичен четири - секторен модел (ЧСМ) на влиянието на технологичното и химично въздействие върху стомана SAF2507. Избран е 2D концентричен модел, като по – ясно показващ влиянието на отделните експерименти върху площта заемана от изследваните образци. Площта представлява обема на извършваната работа А на всяка една група образци. Под група образци следва да се разбира съвкупност от образци подложени на различни химични и технологични действия понижаващи дълготрайността им. Неблагоприятните характеристики на образците са в следствие на заваряване и / или корозионно въздействие при циклично натоварване. Стесняване на площта показва, че дадена група образци имат по - слаба устойчивост породена от заваряване и / или корозионно въздействие. Разделянето на ЧСМ е на сектори съответстващи на броя влияещи фактори. За целите на това изследване следва да бъдат изобразени четири сектора. В сектор едно са въведени резултатите на образците без фактори намаляващи дълготрайността им. В сектор две е добавен един фактор – корозионно въздействие, в сектор четири също е добавен само един фактор – заваръчен шев, в сектор три са комбинирани двата фактора – заваръчен шев и корозионно въздействие. Цикличното натоварване на което се подлагат образците е представено с концентрични кръгове. Нарастването на кръговата площ в даден сектор

показва нарастването на дълготрайността на образците. (запазване работните характеристики на изследваните образци) Базата на изследването започва след 250 Мра като това е кръгът с пунктирна линия. За всяка група образци са поставени точки, които представляват праговете в Мра (взети от създадените криви на умора) под които не се развиват пукнатини. Влиянието на ъгъла на фронта на пукнатината при разрушаване на образците е избрано да бъде показано с огледални ъгли за всяка една зона.



Фиг.45. Четирисекторен концентричен модел.

За целта секторът е разделен на ъглополовяща на две под зони, които се явяват огледални. В двата края на сектора спрямо ъглополовящата започва отчитането на ъглите от 0°. Най – големият ъгъл е точно по средата на зоната, като по този начин по – малките ъгли отбелязани огледално ще спомагат за разширяване на зоната. Най – неблагоприятният ъгъл е 45°(ъглополовящата). По – малките ъгли определени като по – благоприятни разширяват зоната, а по – големите я стесняват. Сравнени са зоните на образци с и без НГАК. От графиката на модела можем да отчетем максималната площ в даден сектор на дадената проба, което ни дава възможност при различните технологични и химични условия да определим кой образец е най-подходящ. Общата площ по външния контур (сбор от площите на образци без НГАК и образци след НГАК) на пресичащите се преби в секторите, определя дълготрайността при различни химични и технологични условия на стомана SAF2507.

При така въведените стойности зоната обхваната от НГАК образци е с 12% по – голяма от образците, които не са подлагани на този вид обработка. При незаварените НГАК образци зоната е с 13% по-голяма от образците без този вид обработка. При заварените образци подложени на НГАК имаме намаляване на зоната с 28%. Влиянието на НГАК е най – силно изразено при незаварени образци подложени на корозия 43% по голяма зона от образците без тази обработка.(табл.3)

Табл.3. Таблично сравнение на изследваните образци.

	НГАК(mm <sup>2</sup> )	Работа А %	Без НГАК (mm <sup>2</sup> )
Образци без фактори намаляващи дълготрайността им	670	> 13%	579
Образци подложени на корозионно въздействие	473	> 43%	268
Заварени образци подложени на корозионно въздействие	180	< 28%	249
Заварени образци	256	< 19%	316
Обща площ	1579	> 11%	1412

#### ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА IV

- Образците подложени на предварително корозионно въздействие имат по – голям ъгъл на развитие на фронта на пукнатината от останалите образци.
- Образците подложени на нискотемпературно азотиране имат по – малък ъгъл на развитие на фронта на пукнатината от останалите образци.
- Образците подложени на нискотемпературно азотиране и предварително корозионно въздействие имат ъгъл на развитие на фронта на пукнатината близък до образците без предварително корозионно въздействие.
- По – големите ъгли разрушават образца по – бързо от по – малките и следва да се считат за по – неблагоприятни.
- S – фазата допринася за по – малки ъгли на развитие на фронта на пукнатината.
- При образците подложени на нискотемпературно азотиране пукнатината се развива с малка дълбочина по цялата челна повърхнина.
- При сравнение на образци подложени на корозия забелязваме, че при всички имаме значително занижаване на характеристиките спрямо изходния материал(И)
- При сравнение на образци със заваръчен шев забелязваме, че при всички имаме значително занижаване на характеристиките спрямо изходния материал(И)
- Определена е скоростта на развитие на пукнатината при образец след корозионно въздействие
- Разработен е ЧСМ (за определяне на дълготрайността на пробите по извършваната работа А(оградената площ от конкретната проба) за развитие на пукнатината.
- Разработения модел дава възможност да се използва и при други материали работещи при различни химични и технологични условия

## **ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **Научно – приложни приноси.**

➤ Чрез проведените изследвания и макроструктурни анализи по време на циклично натоварване и след разрушаване на изследваните образци, са установени различни режима на развитие на пукнатините в зависимост от химичните и технологичните условия.

➤ Установена е зависимост между скоростта на развитие на пукнатините и ъгъла на фронта при разглеждания материал в зависимост от химичните и технологичните условия.

➤ Разработен е модел показващ максималния обем работа извършван от изследваната стомана при циклично натоварване в зависимост от химичните и технологичните условия, който е приложим за корозоустойчиви стомани.

➤ Разработено е приспособление за провеждане на микроструктурно изследване на пукнатината след разрушаване на пробата.

➤ Разработена е методика за определяне развитието фронта на пукнатината в двете направления и създаване на 3D профил.

➤ Извършена е комплексна оценка и сравнителен анализ за влиянието на формата на ръба върху зараждането и развитието на пукнатината, както и уморната дълготрайност на материалите.

➤ Разработен е модел за развитие на междукристална корозия в зависимост от кристалния строеж, оказващ влияние върху дълготрайността на материала.

➤ Установено е влиянието на формата и размерите на структурата на разглеждания материал върху развитието на пукнатината.

➤ Установено е зараждането и развитието на пукнатината в наварената зона в зависимост от при различни технологични и химични условия.

### **Приложни приноси.**

➤ Установено е влиянието на S- фазата за повишаване уморната дълготрайност и корозионна устойчивост върху изследвания корозионно устойчив материал.

➤ Разработен е графичен 3D модел за влиянието на формата на ръба върху зараждането и развитието на пукнатината, както и уморната дълготрайност на материалите.

➤ Установени са S-N криви на заварени и незаварени структури от ферито – аустенитна стомана преди и след корозионно въздействие.

➤ Установени са S-N криви на нискотемпературно газово азотирани – карбонитрирани заварени и незаварени структури от ферито - аустенитна стомана преди и след корозионно въздействие.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Георгиев Г.** „Влияние на структурата върху разпространението на пукнатини в зоната близна до прага на разпространение“ Известия на съюза на учените – Варна 1'2016 ст.65
2. **Георгиев Г.** „Фрактографски изследвания на проби след уморни изпитания в зоната на разрушаване, „машиностроителна техника и технологии“ НТС, ТУ-Варна брой 1, 2016, issn 1312-0859;
3. **Georgiev G.**, Argirov Y., Dimitrov D., „Investigation of the fatigue strength and development of cracks in duplex steel 2507” Bulgarian society for NTD international journal “NTD days” volume 1, issue 4, year 2018
4. **Георгиев Г.**, Аргиров Я., Мечкарова Т., Антонов Г., „Моделиране на уморната якост на вал-работно колело от центробежна помпа изработени от дуплексна стомана saf2507“, „Дни На Безразрушителния Контрол 2017” бр.1
5. **Georgiev G.**, „Shape of a crack growth front under fatigue in the range of  $10^6$ - $10^7$ cycles“- предпечат в университетски годишник 2020

Научно - изследователска работа по други договори, теми и задачи:

- ✓ Проект в помощ на докторанта ПД-4/2017г. „Изследване на уморната якост в зоната на заваряване на аустенитен клас стомана (СС904Л) намираща приложение в химическата промишленост“.
- ✓ Научноизследователски проект НП21\_2016 „Изследване на уморната дълготрайност на заварени съединения и композитни материали“.

### Специални благодарности на:

доц. д-р инж. **Ярослав Аргиров**, доц. д-р инж. Диян Димитров, доц. д-р инж. Пламен Петров и на всички, които са били съпричастни към моята дисертационна работа.

### Annotation

The dissertation is devoted to research of technological processes and parameters related to corrosion resistant steels subjected to corrosion and fatigue wear. Studies have been made with regard to the corrosion and fatigue wear of welded steel of steel SAF2507. A significant increase in the properties of the steel in question (corrosion wear and fatigue strength) after S phase construction (after LGNC) has been found. The present work is a stage in the study of this specific area of technological activity in our country.