



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Факултет по Машиностроене и уредостроене
Катедра „Механика“**

Маг. инж. Иванка Лилова Делова

**ИЗСЛЕДВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА
ПУКНАТИНОУСТОЙЧИВОСТ ПРИ ЛЕГИРАНИ СТОМАНИ ЗА
РАЗЛИЧНИ РЕЖИМИ НА ТЕРМООБРАБОТКА.**

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: Приложна механика

**Научни ръководители: доц. д-р инж. Райчо Райчев
доц. д-р инж. Йордан Мирчев**

ПЛОВДИВ, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Механика“ към Факултет ФМУ на ТУ-София, филиал Пловдив на редовно заседание, проведено на 19.05.2025г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 26.09. 2025г от 14:00 часа в зала 4425 на Технически университет – София, филиал Пловдив на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.1-68 / 03.06.2025 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д.н. инж. Иван Кралов – председател
2. Проф. д-р инж. Вълчо Николов – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Васил Златанов
4. Проф. д-р инж. Евгени Иванов
5. Доц. д.н. инж. Николай Дойнов

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Васил Златанов
2. Доц. д.н. инж. Николай Дойнов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет ФМУ на ТУ-София, филиал Пловдив четвърти корпус, кабинет №4225.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Механика“ на факултет ФМУ. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Иванка Делова

Заглавие: Изследване параметрите на пукнатиноустойчивост при легирани стомани за различни режими на термообработка.

Тираж: 30 броя

Отпечатано в Технически университет – София, филиал Пловдив

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В условията на интензивно развитие на транспортната, енергийната и производствената инфраструктура, изискванията към надеждността и експлоатационната безопасност на машиностроителните компоненти непрекъснато се увеличават. В този контекст особено значение придобива поведението на конструкционните елементи при динамични и циклични натоварвания, които водят до явлението умора на материала – основна причина за над 80% от конструктивните повреди при инженерните системи. Преждевременното разрушаване на елементи вследствие на умора може да доведе до значителни икономически загуби, както и до сериозни рискове за човешки живот.

В основата на устойчивостта към уморно разрушаване стои свойството пукнатиноустойчивост на материала – способността му да се съпротивлява на растежа на пукнатини при наличие на локализирани концентрации на напрежения. Развитието на пукнатини в компоненти от легирани стомани е особено критично в железопътния транспорт, където динамичните натоварвания, променливата амплитуда и агресивната среда действат съвместно, ускорявайки процесите на стареене и деградация на материала. Шарнирните болтове в окачването на железопътни вагони са пример за детайли, изложени на сложни напрегнато-деформационни състояния, при които прогнозирането на остатъчния ресурс изисква задълбочен механичен и фрактографски анализ.

Легираните стомани като 42CrMo4 се използват широко поради съчетанието им от висока якост, добри механични свойства и технологична обработваемост. Независимо от това, техните характеристики се влияят силно от термичната обработка – процес, който определя микроструктурата, разпределението на остатъчните напрежения и съответно устойчивостта към умора и пукнатини. Въпросът за оптималния режим на термообработка, който да осигури максимална устойчивост към уморно разрушение и безопасност при експлоатация, остава до голяма степен отворен и изисква целенасочени експериментални и числени изследвания.

Съвременните подходи в механиката на разрушението, съчетани с числено моделиране (метод на крайните елементи), предлагат мощен инструментариум за прогнозиране на растежа на пукнатини и определяне на критичните им размери. За да бъде постигната адекватна оценка на остатъчния ресурс на конструктивните елементи, е необходимо взаимодействие между експерименталната механика, фрактографския анализ и компютърните симулации.

Настоящото изследване е актуално както от теоретична, така и от практическа гледна точка. То отговаря на необходимостта от систематичен подход към анализа на пукнатиноустойчивостта на легирани стомани при различни режими на термообработка, чрез съчетаване на лабораторни изпитвания, съвременни методи за безразрушителен контрол и числено моделиране. Получените резултати имат пряко приложение в индустрията и могат да бъдат основа за разработване на ефективни стратегии за инспекция и поддръжка на високоотговорни машинни елементи в реална експлоатационна среда.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Цел на дисертационния труд: Разработване на иновативна технология (структура на стомана, процедури за разрушителен и безразрушителен контрол, методология за оценка на разпространението на пукнатини и предвиждане на остатъчния ресурс) за изработка на ресорен болт, гарантиращ постигането на по-безопасен и по-бърз железопътен електротранспорт.

Основни задачи:

1. Числено моделиране поведението на разпространение на пукнатина в стоманен ресорен болт на основата на литературни източници.

2. Определяне механичните характеристики на материали използвани за направата на ресорен болт и оптимизиране на технологичните процеси за тяхното изработване.

3. Провеждане на ултразвуково изпитване със съвременни фазиращи осезатели по технология FMC/TFM за определяне вероятността на откриване на нецялостности, имитиращи пукнатини в ресорен болт.

4. Създаване и валидиране на адекватен числен модел за развитието на уморни пукнатини в ресорен болт с използване на експериментални данни от резултатите получени от механични и безразрушителни изпитания в настоящата работа.

5. Предлагане на теоретично-експериментален подход с разработеният числен модел и резултати от ултразвуково изпитване за определяне на текущо състояние и предвиждане на остатъчен ресурс на ресорен болт.

Научна новост

1. Извършен е систематичен сравнителен анализ на пукнатиноустойчивостта на легирана стомана 42CrMo4, подложена на различни режими на термообработка – без термообработка, след закаляване в масло, след закаляване във вода и след циментация с последващо закаляване. Анализът включва изследване на твърдост, якост, ударна жилавост и умора на материала, като са установени количествени зависимости между режима на термообработка и устойчивостта към растеж на пукнатини.

2. Разработен е оригинален числен модел за оценка на критичната дълбочина на пукнатини в шарнирни болтове, базиран на метода на крайните елементи в средата на ANSYS Workbench. Моделът позволява предсказване момента на преход към нестабилен растеж на пукнатината при реални експлоатационни натоварвания.

3. Въведен е нов интегриран подход за валидиране на FEM моделите чрез експериментални изпитвания на компактни образци (CT specimens) и анализ на коефициента на интензивност на напреженията (SIF), както в статичен, така и в динамичен режим. Направено е съпоставяне между аналитични, експериментални и числени резултати, потвърждаващи достоверността на моделирането.

4. Предложена е иновативна методика за безразрушителен контрол и оценка на остатъчния ресурс на шарнирни болтове, базирана на съвременни ултразвукови технологии с фазирани решетки (PAUT, FMC/TFM, FMC/PCI) и количествена оценка на вероятността за откриване и оразмеряване на дефекти.

Практическа приложимост

Получените резултати имат директно приложение в инженерната практика. Разработената методика за числено моделиране и безразрушителен контрол може да се използва за оценка на остатъчния ресурс и диагностика на шарнирни болтове от легирана стомана в железопътния транспорт. Предложените подходи подпомагат оптимизацията на термообработки, удължават експлоатационния живот на компонентите и повишават безопасността при работа. Методиката е приложима и за периодичен технически контрол, както и в обучението на инженерен персонал.

Апробация

Резултатите от дисертационния труд са апробирани чрез участие в национални и международни научни форуми, както и чрез публикуване на статии в рецензирани списания. Част от изследванията са представени на 13-тата Международна научно-практическа конференция „Environment. Technology. Resources“ (2021), както и на научни конференции по „Механика на машините“ и „Машиностроене и машинознание“ (2024–2025).

Дисертационната разработка е подкрепена от научноизследователски проекти, реализирани в рамките на Технически университет – София, филиал Пловдив.

Публикации

Основните резултати от дисертационния труд са публикувани в пет научни статии, от които четири в национални специализирани списания и една в международен рефериран сборник. Всички публикации са в съавторство, като докторантът е първи автор в четири от тях, което отразява водещата му роля в провеждането на изследванията. В публикациите са разгледани теми, свързани с определяне на механични характеристики на легирана стомана при различни режими на термообработка, анализ на границата на умора, числено моделиране на критични пукнатини и оценка на пукнатиноустойчивост на болтови съединения.

Резултатите от публикациите служат като научна основа за валидиране на методологията, разработена в дисертацията, и намират приложение в техническата диагностика и прогноза на остатъчния ресурс на натоварени машинни елементи.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **136** 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 **99** литературни източници, като **88** са на латиница и **11** на кирилица. Работата включва общо **82** фигури и **19** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА.

Настоящата глава представя задълбочен литературен обзор върху теоретичните основи и съвременните направления в изследването на умората на материала, пукнатиноустойчивостта и остатъчния ресурс на конструкционни елементи, подложени на циклични натоварвания. Разгледани са ключови аспекти от механиката на разрушението, методите за оценка на границата на умора и поведението на пукнатините при различни режими на натоварване, както и влиянието на фактори като микроструктура, термообработка, повърхностни дефекти и концентрации на напрежения.

Историческият преглед очертава развитието на изследванията още от 19-ти век с основоположниците Вюлер, Баушингер и Пончелот, и проследява еволюцията на методите до съвременните числени техники и физико-механични модели. Подчертана е ролята на линейната и нелинейната механика на разрушаването (LEFM, EPFM), както и на концепциите за SIF (коефициент на интензивност на напреженията), J-интеграл, енергийни критерии и модели, отразяващи затварянето на пукнатината.

Особено внимание е отделено на влиянието на топлинната обработка върху поведението на легирани стомани, в частност стомана 42CrMo4, която е широко използвана в машиностроенето и транспортната техника. Анализирани са методи за повишаване на уморната устойчивост чрез закаляване, отгряване, повърхностно уякчаване и циментация, както и техният ефект върху механичните свойства, включително твърдост, граница на провлачване, граница на умора и устойчивост срещу разпространение на пукнатини.

Разгледани са съвременни подходи за числено моделиране на растежа на пукнатини чрез метода на крайните елементи (МКЕ), включително параметрични симулации и мултифизични модели. Обърнато е внимание на аналитични зависимости като закона на Парис, NASGRO и мултилинейни модели за описване на кривите на растеж на пукнатините (da/dN – ΔK зависимости). Описани са и стратегии за предсказване на остатъчния ресурс и планиране на технически инспекции.

Обзорът включва и практически изследвания, насочени към реални приложения – железопътни оси, болтови съединения, елементи от окачването на вагони и други високонадеждни детайли. Подчертани са проблемите, свързани с инициране и стабилен растеж на уморни пукнатини при реални натоварвания, вибрации и въздействия от околната среда.

На базата на направения обзор са формулирани следните ключови изводи:

- Умората и пукнатиноустойчивостта остават актуален и нерешен в пълнота научен проблем с висока практическа значимост.

- Съществува необходимост от комплексен подход, съчетаващ експериментални и числени методи, за оценка на остатъчния ресурс при реални условия.

- Недостатъчно изследвано остава влиянието на конкретни термообработки върху уморното поведение на легирани стомани, особено при реални компоненти като шарнирни болтове.

- Липсва цялостна методика за числено предсказване и безразрушителен контрол на пукнатини в такива детайли, обвързана с реална експлоатация.

На тази основа е формулирана целта на дисертационния труд:

Да се изследва влиянието на различни режими на термообработка върху пукнатиноустойчивостта на легирана стомана 42CrMo4, чрез прилагане на експериментални, числени и диагностични методи, с цел прогнозиране на

остатъчния ресурс и разработване на методика за контрол на детайли, работещи при циклични натоварвания.

ГЛАВА 2. МЕХАНИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СТОМАНА 42CrMo4 ПРЕДИ И СЛЕД ТЕРМООБРАБОТКА.

В настоящата глава се разглеждат и анализират основните механични свойства на стомана 42CrMo4 в състояние без термообработка, както и след прилагането на различни режими на термична и химико-термична обработка. Представен е сравнителен анализ, който има за цел да изясни влиянието на всеки вид обработка върху поведението на материала при различни натоварвания. Това е от съществено значение за преценката на експлоатационната надеждност и устойчивост на компонентите, изработени от този вид стомана, особено в контекста на дългосрочна работа и възможно развитие на умора.

2.1 Анализ на химичния състав на използвания материал.

За нуждите на дисертационното изследване, преди да се пристъпи към оценка на механичните характеристики и поведението при натоварване, е необходимо да се установи точният химичен състав на използвания материал. Анализът е проведен върху два цилиндрични образца с диаметър 16 mm, без маркировка, обозначени като проба №1 и проба №2. Това осигурява не само съответствие съгласно изискванията на стандарт БДС EN 683-2:2016 за стомана 42CrMo4, но и гарантира коректността на последващите сравнения между различните състояния след термообработка. В таблица 2.1 са представени резултатите от извършения химичен анализ, който служи като основа за по-нататъшните изследвания.

Таблица 2.1

№	C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo	Ni %	Al %	Co %	Cu %	Nb %	Ti %
1	0,42	0,20	0,75	0,96	0,16	0,086	0,009	0,007	0,18	0,005	<0,001
2	0,41	0,19	0,76	0,96	0,16	0,085	0,009	0,007	0,18	0,006	<0,001

№	V %	W %	Pb %	Zr %	Bi %	Ca %	Ce %	Zn %	La %	Fe %
1	<0,002	<0,030	<0,010	<0,003	<0,003	0,002	<0,006	0,009	<0,002	97,1
2	<0,002	<0,030	<0,010	<0,003	<0,003	0,002	<0,006	0,009	<0,002	97,2

Анализът на резултатите показва, че основните елементи и тяхното съдържание попадат в характерните граници за този клас стомана, както е показано в таблица 2.1.

2.2 Определяне твърдостта на материала при различни състояния.

Оценката на твърдостта при различните режими на обработка е съществена за проследяване на микроструктурните изменения, настъпващи в стоманата и тяхната връзка с механичните характеристики.

За целите на изследването е извършено измерване на твърдостта на три различни състояния на стомана 42CrMo4 след термична и химико-термична обработка:

Проба №0 – без термообработка

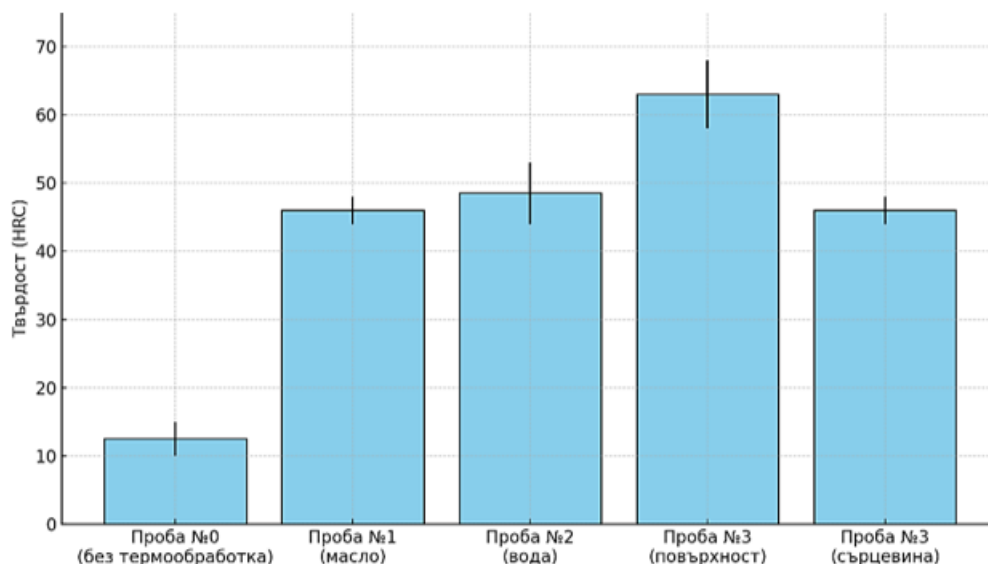
Проба №1 – закалена в масло

Проба №2 – закалена във вода

Проба №3 – подложена на цементация и закалена на дълбочина 1,2–2 mm

Измерванията са проведени в акредитирана лаборатория за технически измервания, с използване на универсален твърдомер модел ТН–140, позволяващ работа по методите на Роквел, Бринел, Викерс и Лииб.

На фигура 2.1 са визуализирани резултатите от измерената твърдост.



Фигура 2.1 Визуализиране на диапазона на измерената твърдост при различните състояния.

Резултатите показват ясно изразено повишаване на повърхностната твърдост при проба №3, в резултат на проведената цементация. Твърдостта в сърцевината на проби №1 и №2 е в близки стойности, но водната закалка при проба №2 води до по-широк диапазон и леко повишаване на твърдостта. Това потвърждава очакваното влияние на термичните обработки върху механичните свойства и е в съответствие с микроструктурните изменения в материала.

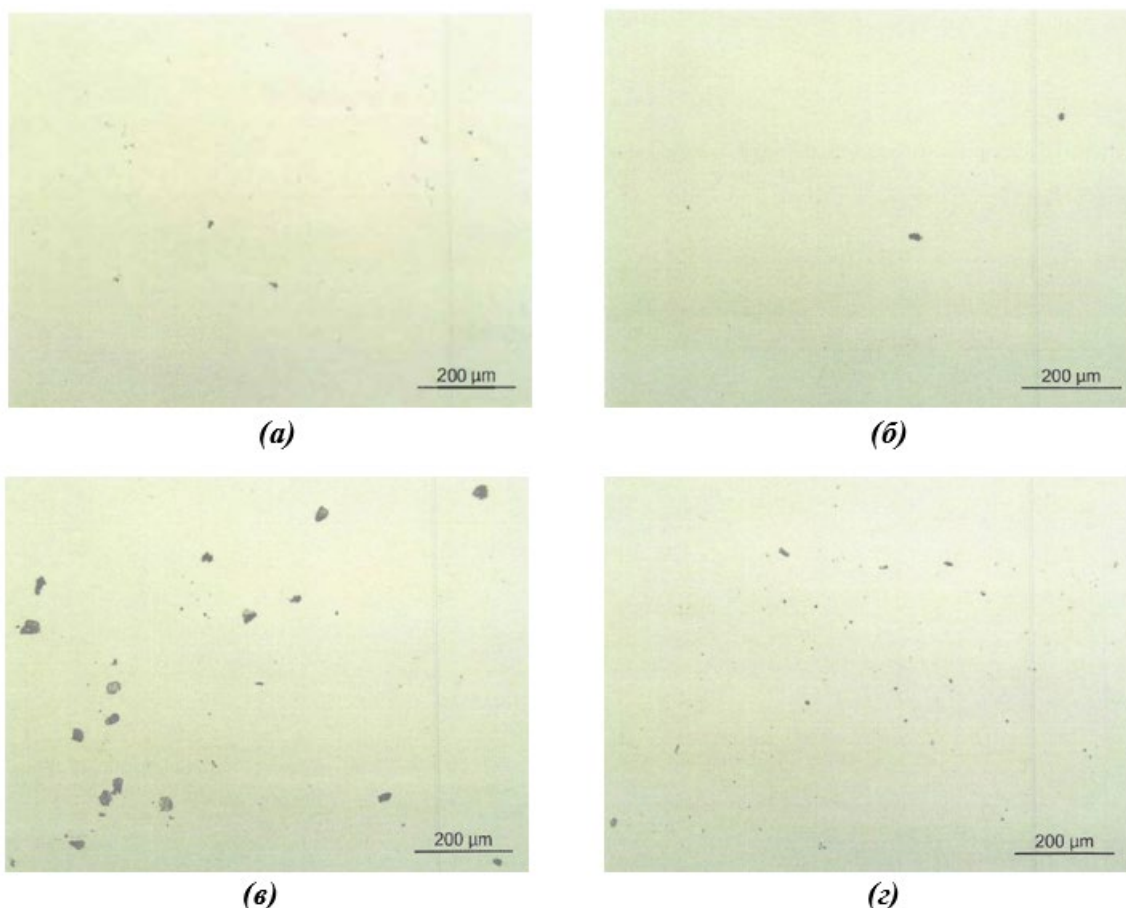
2.3 Анализ на структурата на материала при различни състояния.

Анализът на структурата е осъществен в съответствие със стандарти БДС 3326:1975, БДС 3690:1973, БДС 11174:1982 и методика ТПК 702-1/2024.

За металографско изследване са предоставени 4 бр. образци с означения 347-1 - без термообработка, 347-2 - закален във вода, 347-3 - закален в масло и 347-4 - подложен на цементация и закаляване.

Микроструктурата на образците е заснета чрез светлинен микроскоп "Polyvar Met" при увеличения до x1000, макроструктурата на образец 347-4 - чрез стереомикроскоп с вградена цифрова камера Ivesta 3.

На фигура 2.2 са визуализирани неметалните включвания при изследваните образци.

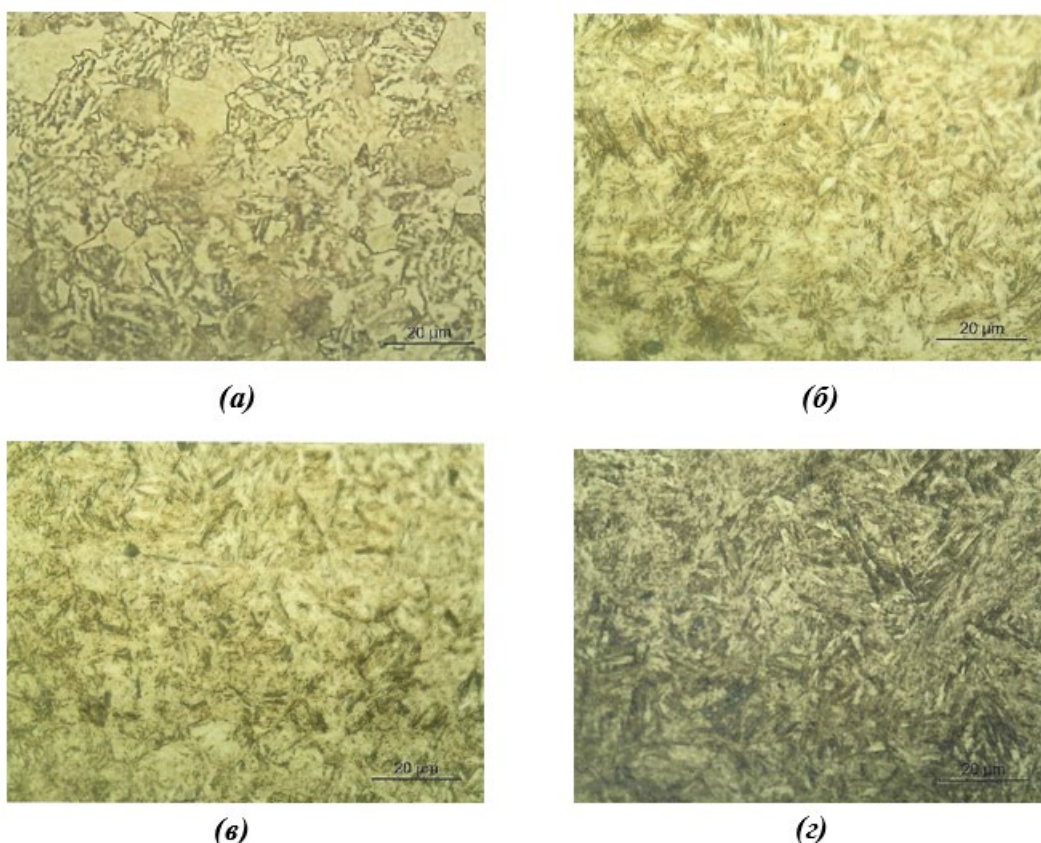


Фигура 2.2 Неметални включения при изследваните образци: (а) без термообработка; (б) след закаляване в масло; (в) след закаляване във вода; (г) след цементация и закаляване.

На фигура 2.3а е показана микроструктурата на образец 347-1(без термообработка) в проявено състояние. Матрицата се състои от феритни зърна с неправилна форма и долен бейнит (ТПК 702-1). Големината на феритните зърна по метода на сравнение с еталонни екали е определена като бал 9 - среден диаметър на зърната 0.015 mm (БДС 11174:1982).

Матриците на образци 347-2 (закален в масло) и 347-3(закален във вода) са подобни - състоят се от мартензит и горен бейнит (фиг.2.3б. и фиг. 2.3в), като в образец 347-2 количеството на мартензита е по-голямо (ТПК 702-1). Дължината на мартензитните игли е бал 6, което отговаря на средноиглест мартензит, с дължина на иглата 10 μm (БДС 3690:1973). Микроструктурите на образци 347-2 и 347-3 не позволяват определянето на големина на зърната по БДС 3690:1973.

На фиг.2.3г е показана микроструктурата на образец 347-4 (цементация и закаляване). Наблюдава се нехомогенност на структурата вследствие от проведената химико-термична обработка навъглеродяване (цементация), като са обособени отделни места (светли петна) по сечението на образца. На някои места по границите на бившите аустенитни зърна се наблюдава карбидна мрежа, вероятно вторичен цементит (ТПК 702-1/2024). Матрицата е мартензитна, с дължина на мартензитните игли - бал 7, едроиглест мартензит, с дължина на иглата 12 μm (БДС 3690:1973). Определянето на големината на зърната е направено в поле с проявена цементитна мрежа по метода на сравнение с еталонни екали - бал 6 - среден диаметър на зърната 0.044 mm (БДС 11174:1982).

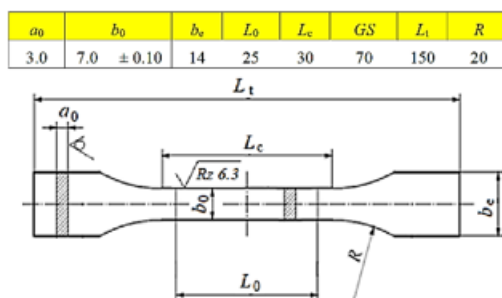


Фигура 2.3 Микроструктура на изследваните образци: (а) без термообработка; (б) след закаляване в масло; (в) след закаляване във вода; (г) след цементация и закаляване.

2.4 Определяне якостта на опън при различни състояния.

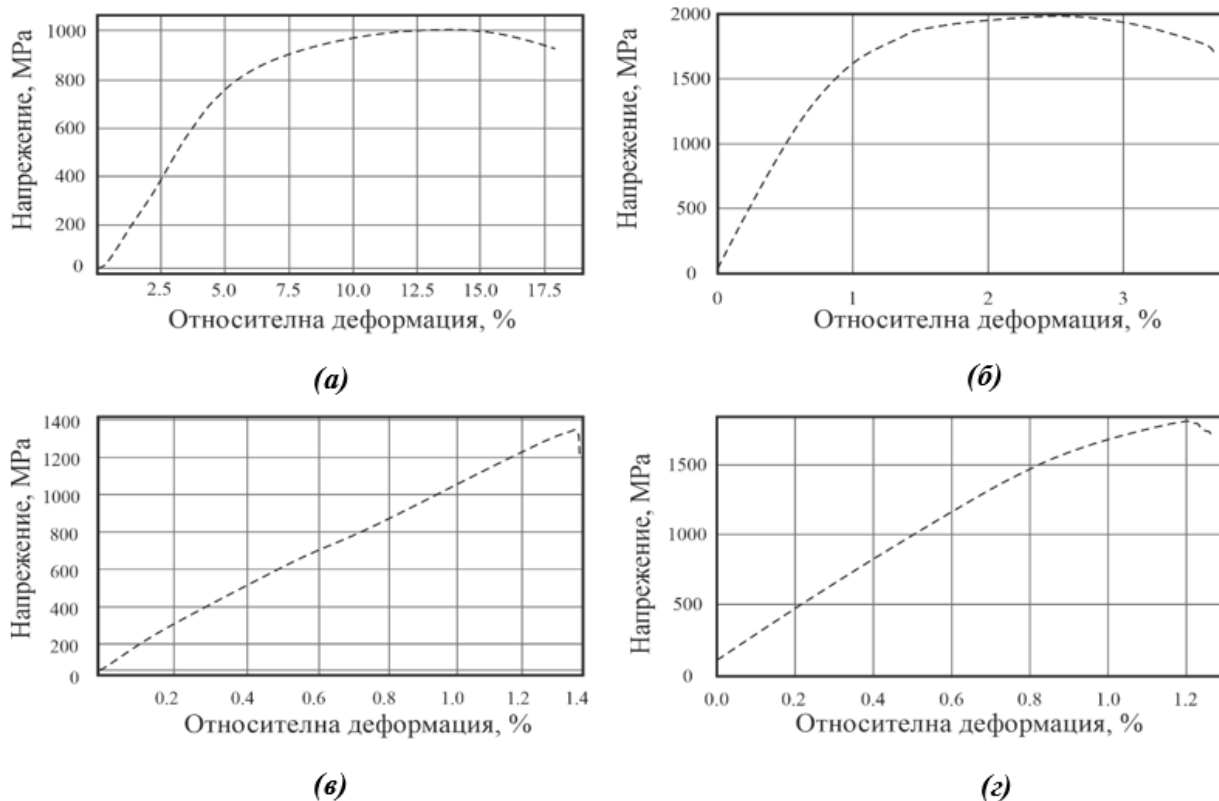
Изпитванията са проведени в акредитирана лаборатория съгласно изискванията на стандарт DIN EN ISO 6892-1:2020, като са използвани плоски проби от всяко състояние.

Размерите и формата на пробните образци са представени на фигура 2.4.



Фигура. 2.4 Схема на пробните образци (всички размери са в mm).

На фигура 2.5 в графичен вид са представени резултатите от механичните изпитвания.



Фигура. 2.5 Резултати от механични изпитвания на опън: **(а)** Образци без термообработка; **(б)** Образци след закаляване в масло; **(в)** Образци след закаляване във вода; **(г)** Образци след цементация и закаляване.

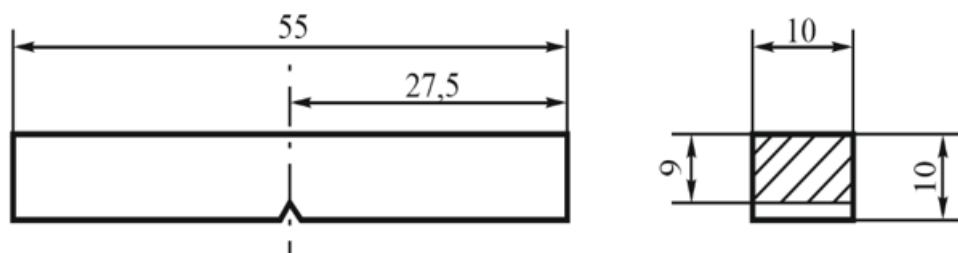
Резултатите потвърждават, че термообработките водят до значително повишаване на границата на провлачване и якостта на опън, като едновременно с това се наблюдава съществено намаляване на пластичността на материала. Най-високи якостни стойности са отчетени при пробите, подложени на водна закалка, докато най-високо относително удължение е наблюдавано при състоянието без термообработка.

2.5 Определяне на ударната якост по метода на Шарпи, при различни състояния на материала.

Целта на изследването е да се анализира влиянието на термообработките върху способността на материала да поглъща енергия при разрушаване, като се отчита и температурната зависимост на тази характеристика. Тестовите са проведени при три температурни режима – стайна ($\sim 20^\circ \text{C}$), 0°C и -20°C .

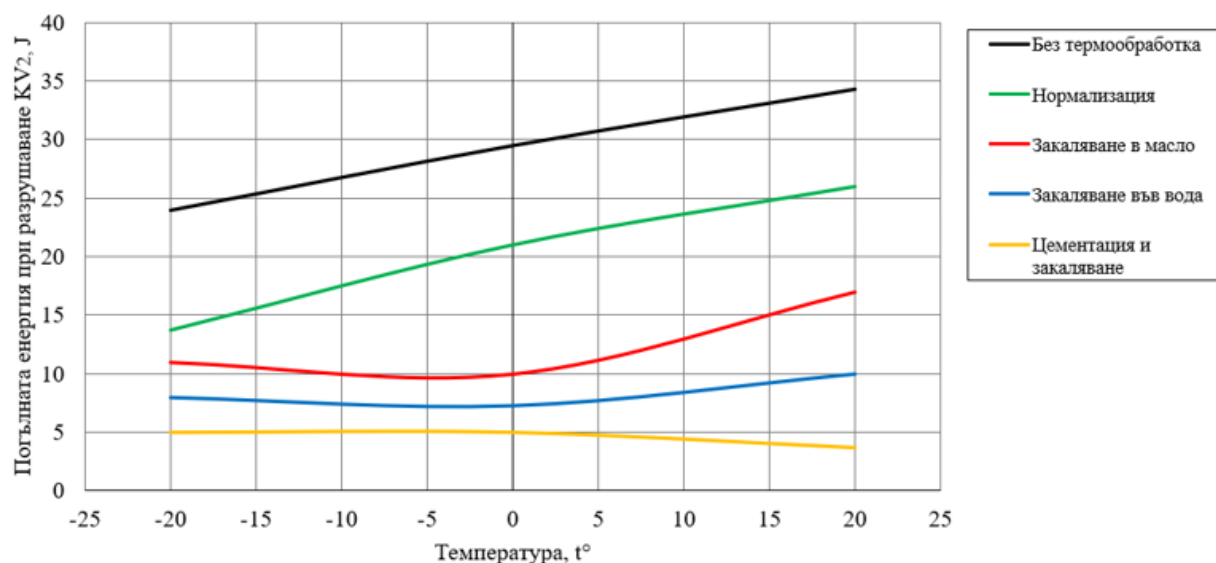
Изследването на ударната якост е извършено в Лабораторията за изпитване на материалите към Института по механика – БАН, с използване на стандартен чук на Шарпи съгласно изискванията на БДС EN ISO 148-1:2017.

Размерите и формата на изпитваните образци са представени на фигура 2.6.



Фигура. 2.6 Размери и форма на пробните образци (всички размери са в mm).

На фигура 2.7 е представена графичната зависимост, отразяваща погълнатата енергия за разрушаване на образците във функция от температурните диапазони.



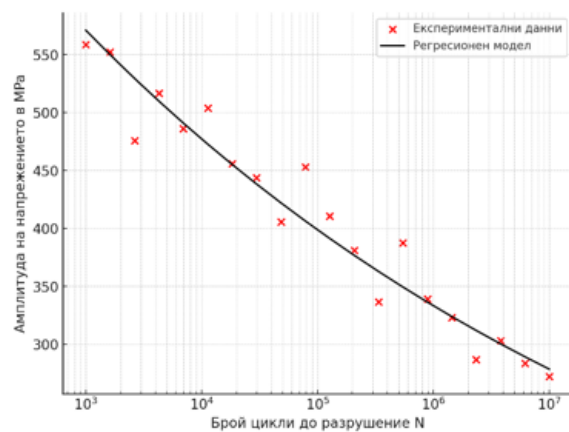
Фигура. 2.7 Погълнатата енергия при разрушаване във функция от температурата.

Получените резултати потвърждават, че процесите като закаляване и цементация значително намаляват способността на материала да поглъща енергия при удар, особено при ниски температури.

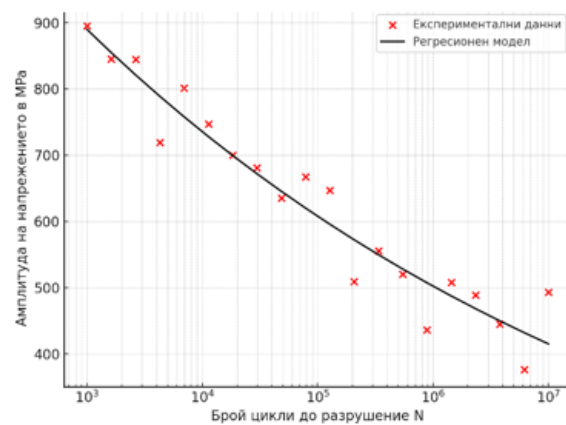
2.6 Определяне умората на материала при различните термични обработки.

За оценка на поведението на стомана 42CrMo4 при циклично натоварване е проведено изпитване на умора чрез огъване с въртящ момент, използвайки изпитвателна машина тип МУИ-6000. Методът се базира на стандартния подход за определяне на границата на умора, при който въртяща се проба е подложена на постоянно циклично огъване до разрушаване или достигане на предварително зададен лимит от цикли.

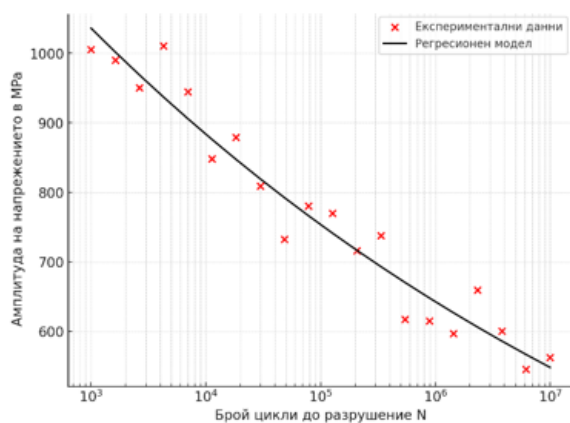
На фигура 2.8 са представени получените диаграми на Вюлер при изследваните образци за различните режими.



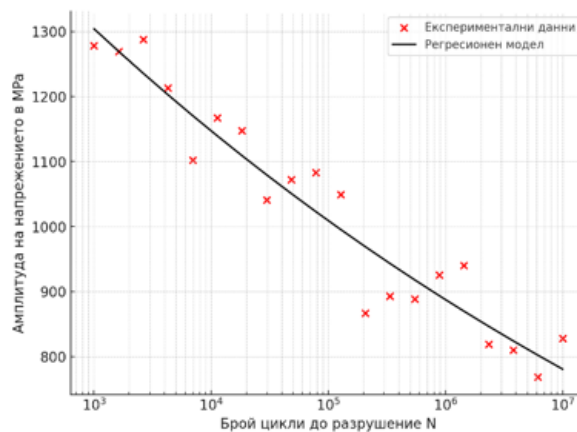
(а)



(б)



(в)



(г)

Фигура. 2.8 Резултати от изпитванията на умора:

(а) Образци без термообработка; (б) Образци след закаляване в масло; (в) Образци след закаляване във вода; (г) Образци след цементация и закаляване.

Базирайки се на анализа на получените резултати от изпитванията на умора, може да се направи заключение, че термичната обработка оказва съществено влияние върху уморната устойчивост на стоманата 42CrMo4, като променя както началната амплитуда на цикличното напрежение, така и скоростта на нейното намаляване с увеличаване на броя на циклите.

ГЛАВА 3. БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН КОНТРОЛ ПРИ ШАРНИРНИ БОЛТОВЕ НА ВАГОНИ С РЕСОРНО ОКАЧВАНЕ.

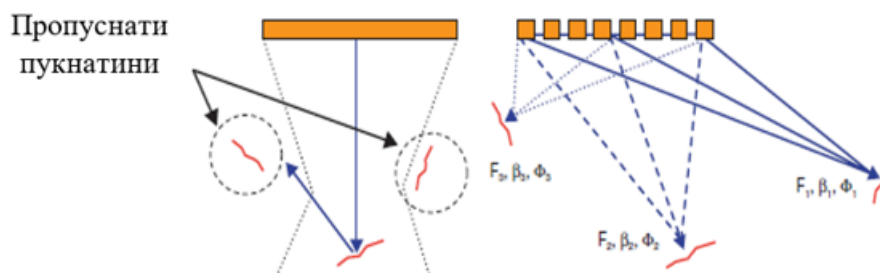
3.1. Същност и методология на безразрушителния контрол.

Безразрушителният контрол (дефектоскопията) е съвкупност от принципи, методи и средства за откриване и измерване на дефекти (всяко отклонение на продукцията на база изискванията в нормативните документи) и допустими отклонения в свойствата на материалите, изделията, съединенията и др., без да се разрушават и повреждат обектите на контрол. При него се търсят и оценяват следните основни групи отклонения и дефекти в материалите, изделията, съединенията и др.: нецялостности; отклонения във физико-механичните свойства (якост, твърдост, пластичност и др.); отклонения в размерите; отклонения в структурата; отклонения в химичните свойства и др.

3.2. Съвременни (иновативни) техники на ултразвуковия контрол.

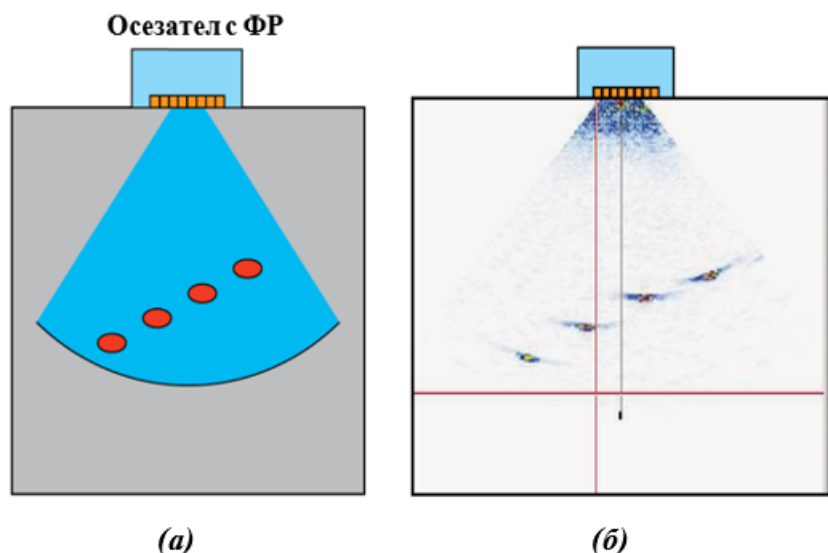
3.2.1. Ултразвукова технология с фазирана решетка (PAUT).

Основната характеристика на ултразуковата технология с фазирана решетка (PAUT) е използването на многоелементен осезател и компютърно контролираното възбуждане (амплитуда и закъснение) на отделните елементи в осезателя. Осезателя с фазирана решетка може да генерира визуално фокусиран лъч и множество ъгли чрез управление. Може да генерира фокусиран лъч и го управлява в широк ъглов диапазон. С помощта на PAUT могат да бъдат открити пукнатини с най-различна ориентация, както е представено и на фиг. 3.1



Фигура. 3.1 Откриване на нецялостности с различна ориентация чрез едноелементен (вляво) и многоелементен осезател (вдясно).

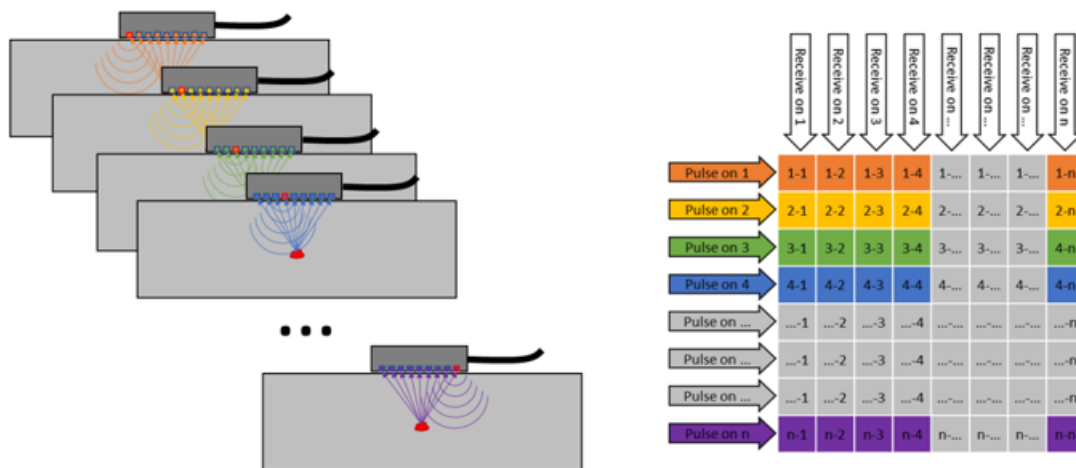
По време на сканиране с механично устройство се събират данни въз основа на позицията на енкодера. Обикновено при PAUT се използват множество подредени А-изображения с различни ъгли, време на движение и времеви закъснения върху всеки малък пиезокомпозиционен кристал (елемент) на осезателя. Информацията в реално време от общия брой А-изображения за конкретна позиция на осезателя, се показва в секторно сканиране (S-изображение) показано на фиг. 3.2.



Фигура. 3.2 Откриване на четири странично пробити отвора: (а) принцип на секторното сканиране, (б) S-изображение при $\pm 30^\circ$.

3.2.2 Пълно матрично сканиране (FMC).

FMC е процес на събиране на данни. Всеки елемент от осезателя се използва последователно като единичен излъчвател, а всички елементи се използват като приемници, като се създава матрица от данни в A-изображение. Предимството на FMC е, че може да се получат всички възможни взаимодействия между всеки излъчващ и приемащ елемент, което дава възможност за многобройни начини за възпроизвеждане на изображения. FMC се състои в улавяне и записване на сигналите в A-изображение от всяка двойка предавател-приемник в осезателя. Всеки излъчващ и приемащ елемент изобразява индивидуална форма на вълната (фиг. 3.3.).



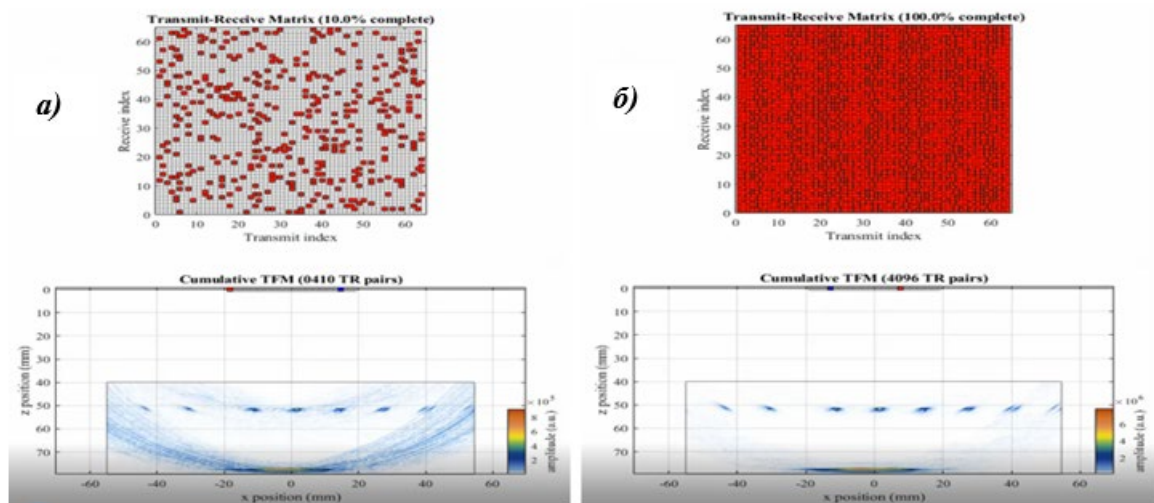
Фигура. 3.3 Схема на излъчване и резултатна матрица за FMC.

Наименованието Пълно Матрично Сканиране (Full Matrix Capture) произлиза от факта, че е възможно всяка придобита форма на вълната да се представи в матрична форма. Излъчващите елементи са редове, а приемащите елементи са колони. От индивидуалните сигнали на формата на вълната, събрани (A-изображение) по време на процеса на FMC, е възможно да се генерират изображения за подобрени алгоритми, като например "метод на пълно фокусиране" (TFM).

3.2.3 Метод на пълно фокусиране (TFM).

TFM описва всяка група алгоритми, които използват процес на сумиране за всеки пиксел в рамките на мрежата, за да генерират изображението. Наименованието „метод на пълното фокусиране“ произлиза от факта, че всяка точка, изчислена в решетката, трябва да бъде перфектно фокусирана. Важно е да се разбере, че ефектите на фокусиране са синтетично формирани чрез обработката на данните и не са физически фокусирани лъчи. Алгоритмите на TFM могат да се прилагат към множество схеми за събиране на данни от FMC и конфигурации на осезатели, включително метод на предаване и приемане.

Фигура 3.4. илюстрира пример за формиране на крайното TFM изображение.

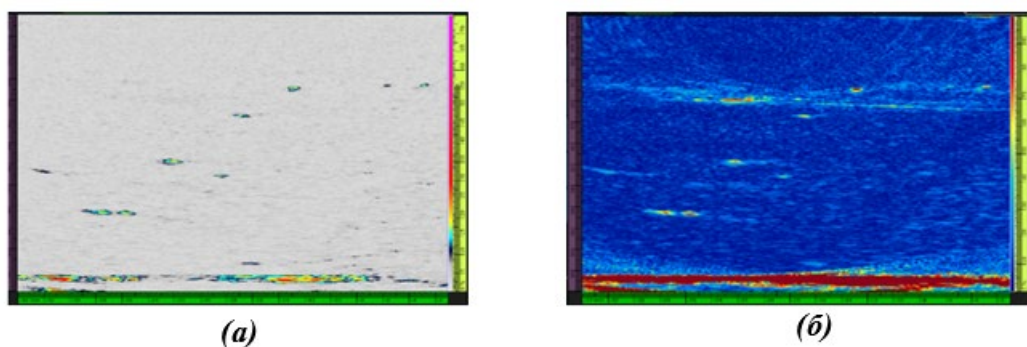


Фигура. 3.4 Формиране на крайното TFM изображение:
(а) при 10% изображение; (б) при 100% изображение.

3.2.4. Фазово кохерентно изобразяване (PCI).

Фазовата кохерентност е алгоритъм за изобразяване на TFM, който използва само фазовата информация на данните от FMC и игнорира амплитудната информация. Отхвърлянето на амплитудната информация от получените А-изображения позволява генерирането на изображения, които се основават единствено на кохерентността на сигнала. Разглеждането само на фазовата информация дава възможност за откриване на дефекти с амплитуди на сигнала, които иначе биха се считали за некохерентен шум в амплитудно базирано TFM изображение. Тъй като затихването на материала не влияе на фазата на сигнала, ефективността на неамплитудната TFM може да бъде значително подобрена при приложения за инспекция на дебели или силно затихващи материали или при шумни материали. Фазово кохерентното изобразяване не зависи от амплитудата на сигнала от отражателя, а на фазата, така че също така е практически невъзможно сигналът да се насити.

Както се вижда от фигура 3.5., по-малките обекти на разсейване се откриват по-добре с фазовата техника (PCI), отколкото с техниката, базирана на амплитудата (TFM). Освен това съотношението сигнал/шум е значително подобрено.



Фигура. 3.5 Резултат от повреда при тързене: (а) данни от PCI,
(б) данни от конвенционален TFM, базиран на амплитуда.

3.3. Апаратура.

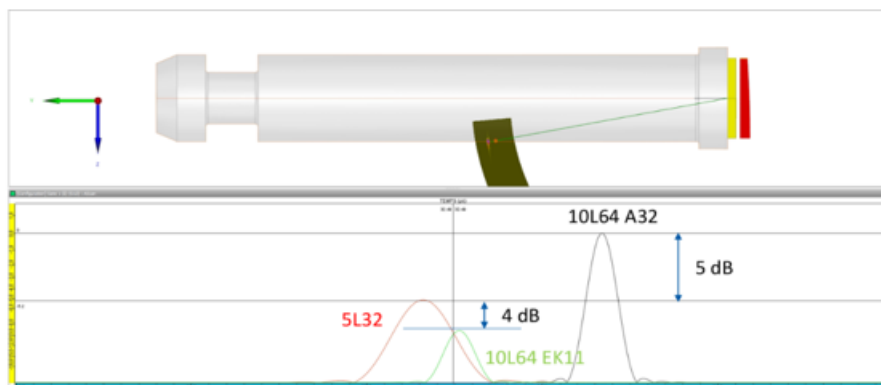
3.3.1. Ултразвуков дефектоскоп.

За нуждите на дисертацията е използван дефектоскоп с 64-канална паралелна архитектура. Софтуера, който използва е Capture v4.1., който предлага конвенционален ултразвуков контрол, стандартна фазирана решетка (PAUT) и метод на пълното фокусиране (TFM) и фазово кохерентно изображение (PCI) в реално време. Всички техники са приложими за осезатели с един, два и много елементи (линейни и матрични). Законите за закъснение могат да бъдат изчислени на апарата, като се избягва необходимостта от импортирането им от компютър. Събраните данни могат да бъдат експортирани за анализ и на компютър, като се използва специализирана програма необходима за отварянето на тези файлове.

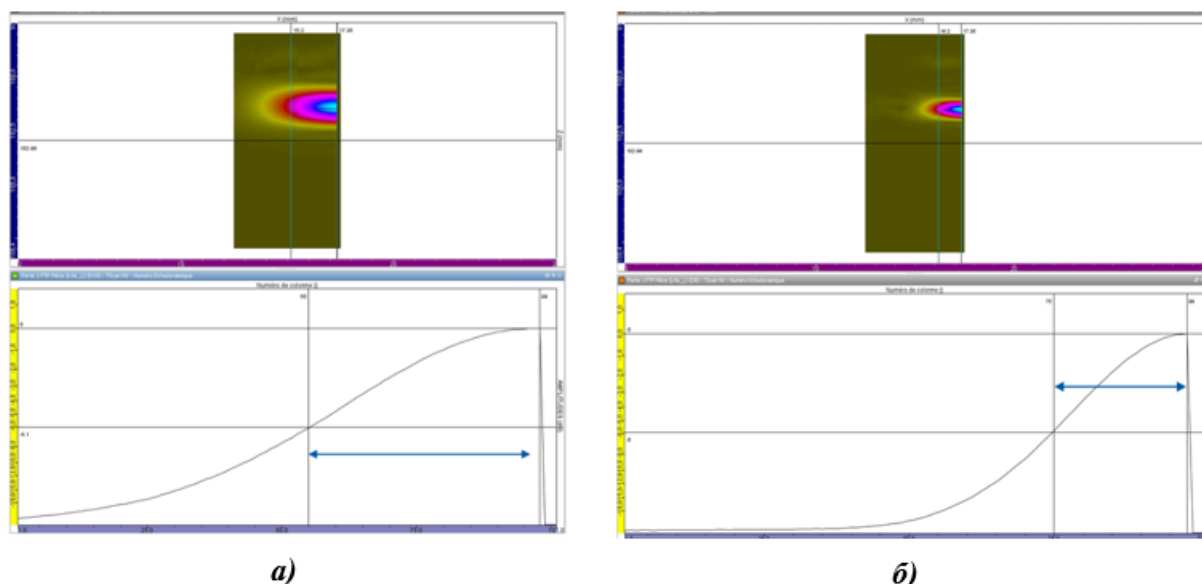
3.3.2. Осезател.

Първоначалната оценка за избор на осезател е направена със софтуерен пакет CIVA за визуализация на ултразвуковия сноп и симулация за откриването и оразмеряването на предварително избран размер на дефекта. Два линейни осезателя с 64 елемента и две различни честоти 5 MHz и 10 MHz бяха симулирани. Независимо от малко повече усилване, което се изисква за 10 MHz осезател, първоначалните резултати за оразмеряването на надреза с този осезател бяха по-добри в сравнение с 5 MHz. На фигура 3.6 и фигура 3.7 са показани примери за откриването, визуализацията и оразмеряването от симулацията.

Поради тази причина, за нуждите на експерименталните изследвания в настоящия дисертационен труд, е избран осезател с честота 10 MHz, 64 елемента, стъпка 0,3 mm, линейен тип, ширина на елемента 0,26 mm и активна площ 19,2 mm², който отговаря на изискванията за изследване на изкуствено създадените уморни пукнатини.



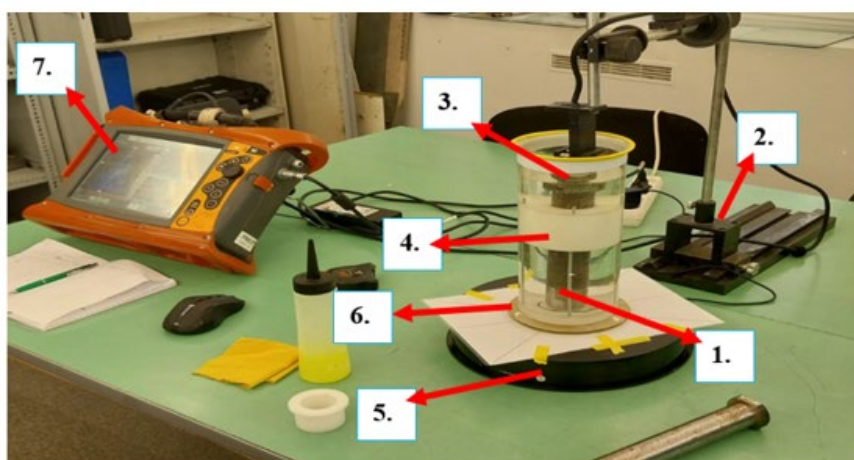
Фигура. 3.6. Резултати от инспекция и оразмеряване на нецялостност с големина 0,2 mm с 5 MHz и 10 MHz осезател.



Фигура. 3.7 Визуализация на резултатите след сканиране на нецялостност с размери 0,1 mm с: а) 5 MHz и б) 10 MHz

3.4. Метод за изпитване на образците.

В проведените изпитвания е използван имерсионен метод на разпространение на ултразвуковите вълни, при който средата на разпространение е течна. Опитната постановка е представена на фиг. 3.8.



Фигура. 3.8 Опитна постановка: 1. Образец на изпитване; 2. Статив за закрепване на осезателя; 3. Осезател; 4. Установка за фиксиране на образца; 5. Електрическа въртяща се платформа; 6. Цилиндричен съд с вода; 7. Ултразвуков апарат.

3.4.1. Описание на експеримента.

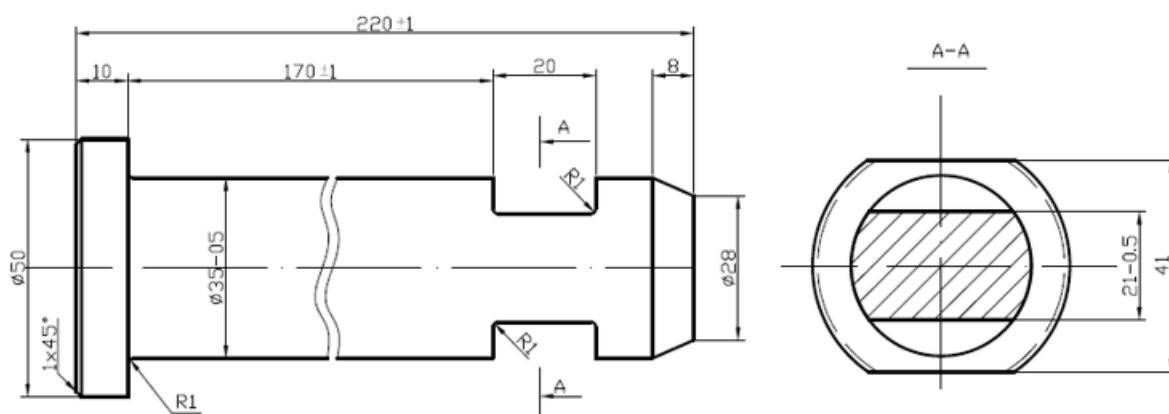
Цилиндричният съд с вода (6) се центрира върху електрическа въртяща се платформа (5), която се върти с постоянна скорост и извършва една обиколка за 33 секунди. Върху нея се монтира фиксиращата установка (4), в която се поставя изследваният болт (1). Осезателят (3) се закрепва към неподвижен статив (2), след което се стартира ултразвуковият апарат (7).

Използвани са три техники за сканиране: фазирана решетка (PAUT), пълно фокусиране (FMC-TFM) и фазово кохерентно изображение (FMC-PCI). Преди

началото на всяко сканиране се въвеждат необходимите настройки за апарата и осезателя. Настройките са извършени чрез използване на референтен болт, върху който предварително са направени осем ерозионни надреза с различни размери. За оптимизиране на работния процес и избягване на необходимостта от повторно конфигуриране при всяко сканиране, апаратът позволява запазване на веднъж въведените настройки. При последващо отваряне те могат директно да бъдат използвани за изследване.

3.5. Образци за изпитване.

На фигура 3.9 е визуализирана схемата на шарнирния безрезбови болт и неговите геометричните размери.



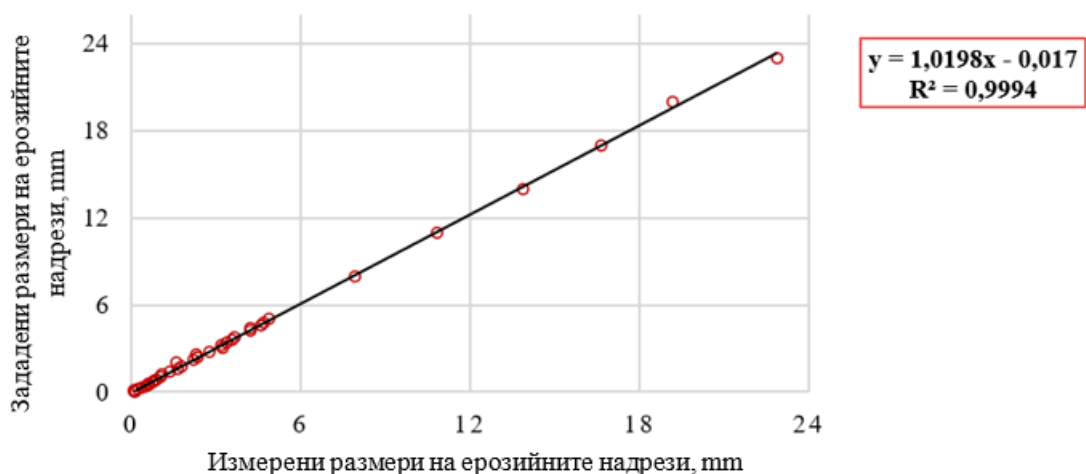
Фигура. 3.9 Визуализация на шарнирния безрезбови болт.

Експерименталните изследвания са проведени върху 39 броя безрезбови шарнирни болта, използвани в железопътния транспорт при вагони с ресорно окачване (фиг. 3.10). На всеки от 38-те болта е изработен по един ерозионен надрез с различни размери с цел имитация на уморна пукнатина. На един болт са нанесени осем отделни ерозионни надреза.



Фигура. 3.10 Шарнирни болтове с надрези.

На фигура 3.11 в графичен вид са визуализирани данните от проведения сравнителен анализ между зададените и измерените ерозионни надрези.



Фигура. 3.11 Сравнителна графика между измерени с пресетер за инструменти и зададени размери на надрезите в mm.

3.6. Анализ на резултатите от проведените изследвания.

3.6.1 Вероятност за откриване.

Вероятността за откриване представлява количествена мярка, характеризираща способността на даден метод за неразрушителен контрол (ултразвуков, радиографски и др.) да открие дефект с определен тип и размер в изследвания обект.

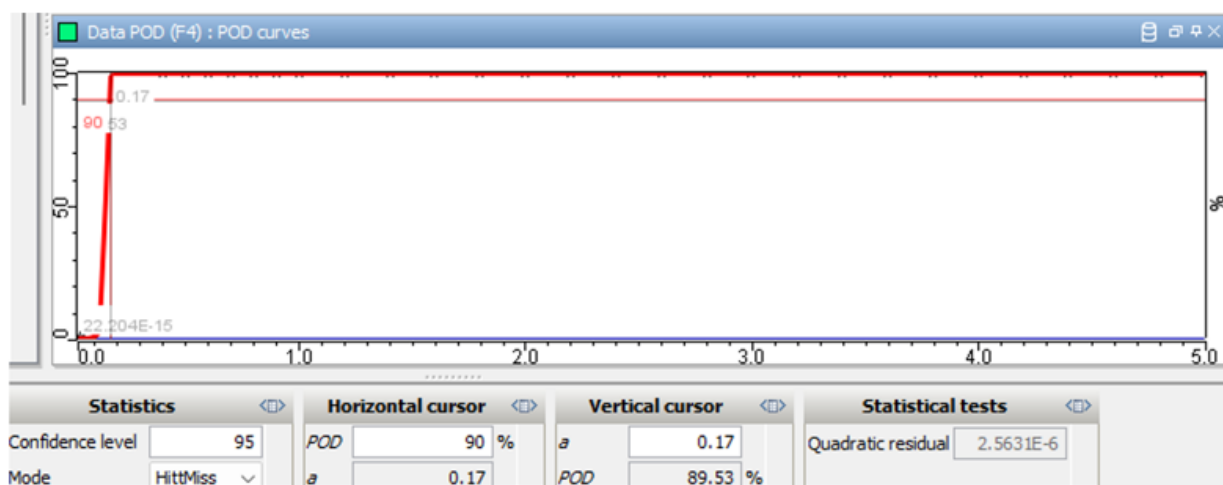
Една от функциите, която използва вероятността за откриване (POD е:

- Hit/Miss анализ – бинарен резултат (открит/неоткрит) - Тук се използва следната **логистична функция** (Logistic Regression):

$$POD(a) = \frac{1}{1 + \exp(-(\beta_0 + \beta_1 \cdot a))}; \quad (3.2)$$

където: β_0 ; β_1 – регресионни коефициенти;

За нуждите на настоящото изследване е използван Hit/Miss анализ, като резултатите за една от използваните техники за сканиране на изкуствено създадените уморни пукнатини, е представена в графичен вид (фигура 3.12).



Фигура. 3.12 Резултати от метода вероятност за откриване на техниката с фазирана решетка.

В таблица 3.1 е посочен най-малкият откриваем размер на ерозионен надрез с вероятност на откриване 90% и ниво на достоверност 95% ($a_{90/95}$) за съответната ултразвукова техника.

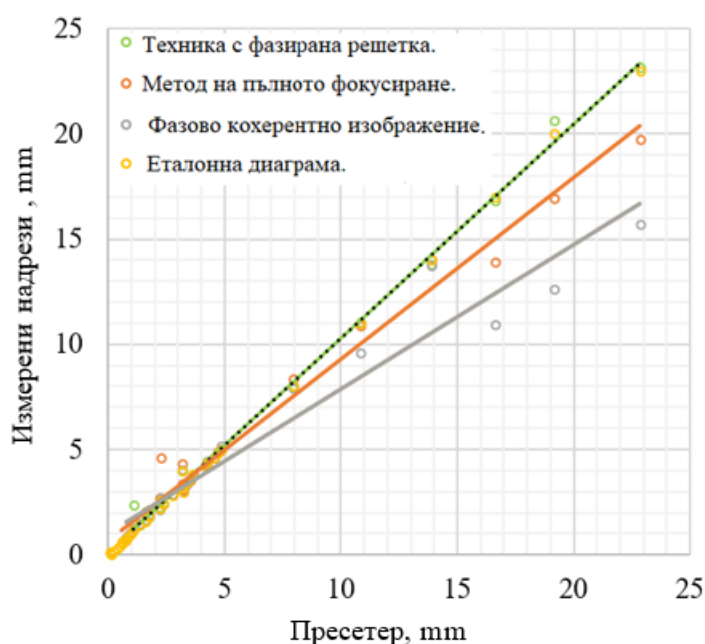
Таблица 3.1

Техника	$a_{90/95}$, мм
PAUT	0,17
TFM	0,095
PCI	0,208

3.6.2 Методика на оразмеряване.

За оразмеряване на индикациите е използван т.нар. метод -6 dB. Този метод е широко прилаган в практиката на неразрушителния контрол, тъй като осигурява висока повторяемост и добра съпоставимост между резултатите, особено при дефекти с отражателен характер, каквито са ерозионните надрези.

На фигура 3.13 е представена сравнителна диаграма от оразмеряването с трите техники и приетата за еталон диаграма, визуализирана на фигура 3.11.



Фигура. 3.13 Сравнителна диаграма между измерените надрези чрез използваните техники и приетата за еталон диаграма.

Анализът на получените резултати показва, че техниката с фазирана решетка (PAUT) демонстрира най-висока степен на съответствие с еталонната диаграма. Точките на измерване се подреждат около диагоналната линия, а трендът почти съвпада с нея. Това показва висока точност при оразмеряване на надрезите чрез техниката с фазирана решетка (PAUT), особено в целия разглеждан диапазон (от ~1 mm до над 20 mm).

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ И АНАЛИЗ НА РАСТЕЖА НА ПУКНАТИНИ ПРИ РАЗЛИЧНИ ЕКСПЛОАТАЦИОННИ УСЛОВИЯ.

4.1 Въведение в численото моделиране на растеж на пукнатини.

През последните десетилетия численото моделиране на разрушаването се развива значително, благодарение на напредъка в методите за крайни елементи (FEM) и разширените техники за анализ на пукнатини, като XFEM (Extended Finite Element Method) и SMART Crack Growth в софтуерни среди като ANSYS. Тези методи позволяват точно предсказване на развитието на повреди, като вземат предвид нелинейните ефекти, остатъчните напрежения от термообработка и влиянието на динамичните натоварвания.

Съвременните подходи в численото моделиране позволяват по-задълбочен анализ на механизма на растеж на пукнатини, като интегрират физически базирани модели за умора и разрушаване на материалите. Чрез тях е възможно да се предскаже не само скоростта на разпространение на пукнатините, но и да се определи критичната дълбочина, при която структурната цялост на болта е застрашена.

4.2 Валидиране на числения модел чрез симулации с компактен образец.

4.2.1 Аналитичен и числен анализ на коефициента на интензивност на напреженията (SIF).

За да бъде обосновано прилагането на числен анализ чрез специализиран софтуер, са проведени симулации с компактен образец, за който съществуват утвърдени емпирични зависимости, позволяващи валидиране на получените резултати.

За целите на анализа е разгледан компактен образец с определени размери, подложен на статично и динамично натоварване. Аналитичният метод използва следната емпирична зависимост:

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right); \quad (4.1)$$

където:

K_I – коефициент на интензивност на напрежението [$MPa\sqrt{m}$];

P – приложено натоварване [N];

B – дебелина на образца [mm];

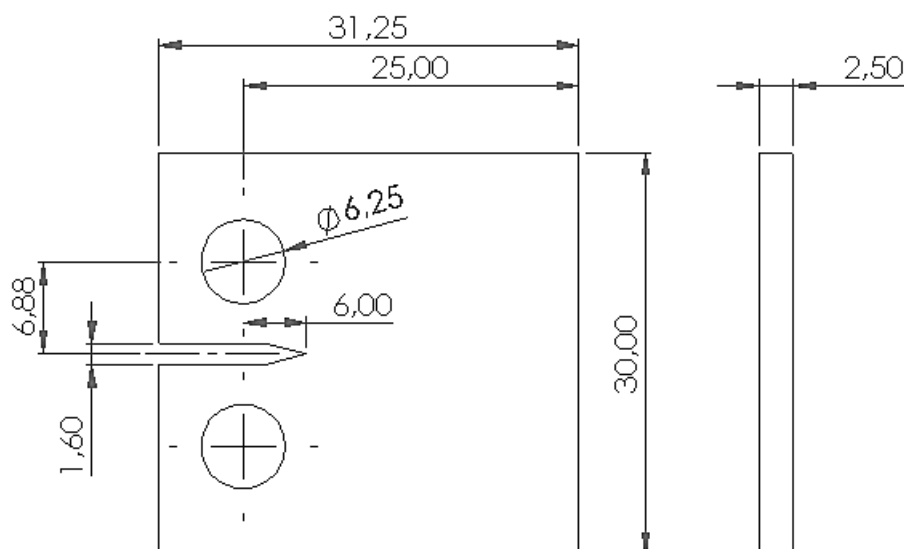
W – ширина на образца [mm];

a – дължина на пукнатината [mm];

$f\left(\frac{a}{W}\right)$ – емпирична корекционна функция, която зависи от относителната дължина на пукнатината $\frac{a}{W}$. Според ASTM E399, тя се задава чрез следното приближено уравнение:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2+\left(\frac{a}{W}\right)}{\left(1-\frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left(0,886 + 4,64 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) - 13,32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right); \quad (4.2)$$

На фиг. 4.1 е представен компактният образец, който е обект на числено моделиране и симулации.



Фигура. 4.1 Схема на компактния образец (всички размери са в mm).

Статичният анализ е извършен при различни съотношения на геометричните размери на образца. В изследването са приложени реалистични гранични условия и материални константи, характерни за стомана 42CrMo4. Обобщените резултати при статично натоварване са представени в Таблица 4.1.

Таблица 4.1

Натоварване	Дебелина на образца	Широчина на образца	Дължина на пукнатината	Отношение (a/W)	Коефициент на интензивност K _{Is} -Теоретично	Коефициент на интензивност K _{Is} Симулации	Отклонение в проценти
P [N]	B [m]	W [m]	a [m]	-	MPa.m ^{0,5}	MPa.m ^{0,5}	%
2000	0,0125	0,025	6.25E-03	0,25	4,91E+00	4,90E+00	0,205
			7.25E-03	0,29	5,46E+00	5,49E+00	0,477
			8.25E-03	0,33	6,06E+00	5,98E+00	-1,252
			9.25E-03	0,37	6,71E+00	6,72E+00	0,097
			1.03E-02	0,41	7,46E+00	7,46E+00	0,088
			1.13E-02	0,45	8,32E+00	8,48E+00	1,998
			1.23E-02	0,49	9,34E+00	9,28E+00	-0,639
			1.33E-02	0,53	1,06E+01	1,04E+01	-1,389
			1.43E-02	0,57	1,22E+01	1,21E+01	-0,465
			1.53E-02	0,61	1,42E+01	1,41E+01	-0,526

Разликите между теоретичните и числените стойности на K_{Is} са сравнително малки и остават под 2% в целия изследван диапазон. Максималното отклонение е 1.998% при a/W=0.45, а минималното отклонение е 0.088% при a/W=0.41. Това потвърждава високата точност на симулационния модел и коректно зададени гранични условия.

4.2.2 Динамичен анализ на растежа на уморни пукнатини при компактен образец.

За симулиране растежа на уморните пукнатини е използван вграденият в ANSYS Workbench модул SMART Crack Growth, който позволява проследяване на разпространението на пукнатината при зададени циклични натоварвания.

В основата на SMART Crack Growth е закона на Парис, който описва скоростта на растеж на пукнатината в зависимост от амплитудата на коефициента на интензивност на напреженията. Основната формула има следния вид:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m; \quad (4.3)$$

където:

$\frac{da}{dN}$ - скорост на растеж на пукнатината на цикъл (m/cycle);

ΔK - амплитуда на коефициента на интензивност на напреженията;

C, m - материални константи (зависят от термообработката);

В допълнение към симулациите, е извършено и числено моделиране в MATLAB, с цел потвърждаване на резултатите и оценка на влиянието на различни фактори върху растежа на пукнатините. MATLAB е използван за реализиране на алгоритъм, базиран на закона на Парис, с въведени входни данни като геометричните размери на образца, механичните характеристики на материала, както и материални константи.

За натоварването са използвани три различни нива на номинално напрежение: 1,63MPa, 3,26MPa и 4,89MPa, които съответстват на различни работни режими, покриващи ниско, средно и високо циклично натоварване. Изборът на тези стойности гарантира, че материалът остава в областта на линейно-еластично поведение, приложимо за закона на Парис.

За осъществяване на симулациите и численото моделиране са използвани следните входни данни:

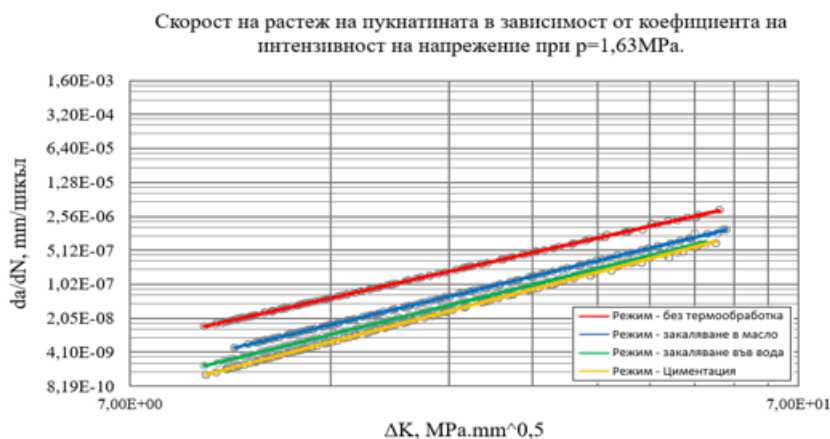
- Широчина на образца: $W=25\text{mm}$;
- Дебелина на образца: $B=2,5\text{ mm}$;
- Дължина на началната пукнатина: $a=6\text{mm}$;

В таблица 4.2 са представени стойностите на материалните константи C и m от закона на Парис.

Таблица 4.2

Термообработка	C [mm/cycle]	m	Съотношение на напреженията
Без термообработка	1.5×10^{-11}	3.1	$R = 0.1$
Закаляване в масло	2.5×10^{-12}	3.3	$R = 0.1$
Закаляване във вода	1.2×10^{-12}	3.4	$R = 0.1$
Циментация + закаляване	5.0×10^{-13}	3.6	$R = 0.1$

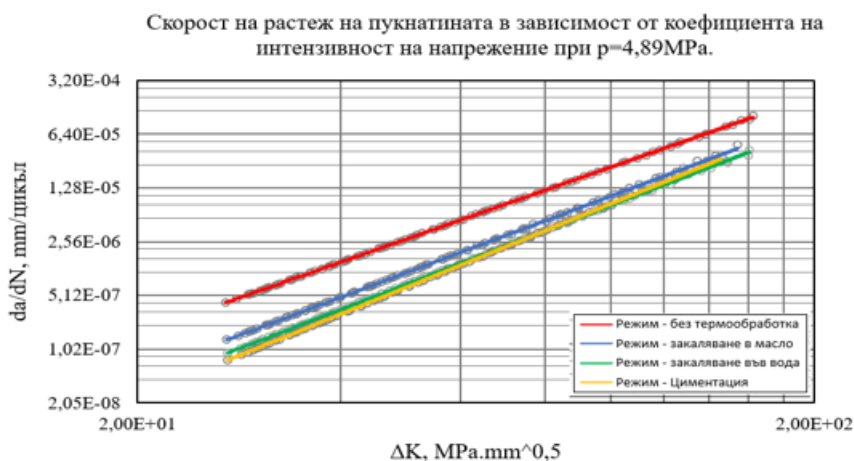
На фигури 4.2, 4.3 и 4.4 в графичен вид са представени резултатите от числени симулации, извършени в средата ANSYS Workbench с помощта на функцията SMART Crack Growth.



Фигура. 4.2 Визуализиране растежа на пукнатината в зависимост от ΔK при $p=1,63\text{MPa}$.



Фигура. 4.3 Визуализиране растежа на пукнатината в зависимост от ΔK при $p=3,26\text{MPa}$.



Фигура. 4.4 Визуализиране растежа на пукнатината в зависимост от ΔK при $p=4,89\text{MPa}$.

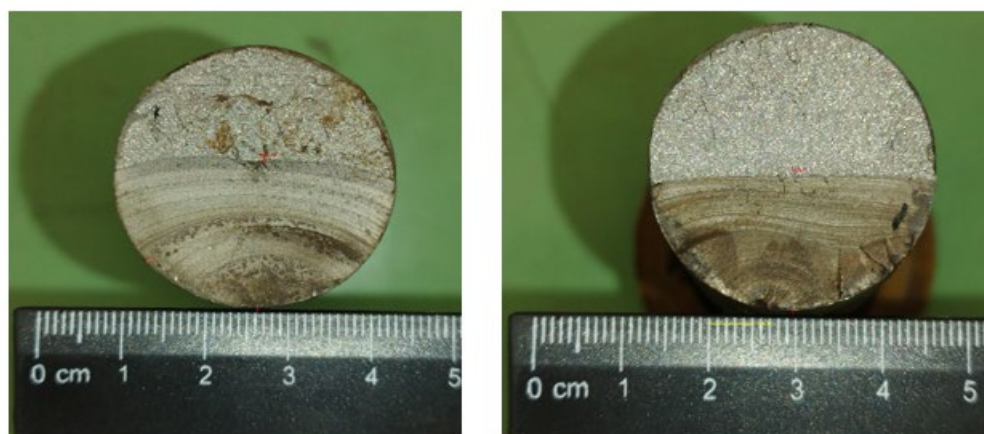
Получените резултати показват, че с увеличаване на приложеното номинално напрежение скоростта на растеж на пукнатината се увеличава значително. При най-ниското натоварване ($1,63\text{MPa}$) растежът на пукнатината е бавен и настъпва постепенно през по-голямата част от живота на компонента, като рязко ускорение се наблюдава едва в крайната фаза. При средното

натоварване ($3,26\text{MPa}$) ускорението на растежа настъпва на по-ранен етап, а при най-високото напрежение ($4,89\text{MPa}$) пукнатината започва да нараства с висока скорост още от началото на натоварването, което води до значително намаляване на остатъчния експлоатационен живот.

4.3 Фрактографски анализ на разрушени шарнирни болтове.

Фрактографският анализ е проведен върху два разрушени шарнирни болта с еднакъв номинален диаметър (35 mm). И при двата болта е наблюдаван характерен механизъм на уморно разрушение, съчетаващ инициране на пукнатина в близост до повърхността, стабилен и прогресивен растеж на уморната пукнатина последван от внезапно окончателно разрушение при достигане на критична дълбочина.

На фигура 4.5 са представени разрушените образци, които са обект на фрактографски анализ.



Шарнирен болт №1

Шарнирен болт №2

Фигура. 4.5 Разрушени образци, обект на фрактографски анализ.

Оценката на критичната дълбочина на пукнатината е извършена чрез визуално измерване спрямо приложената мащабна линия върху изображенията. За шарнирен болт №1 дължината на уморната пукнатина до преминаването към моментално разрушение е определена на приблизително $17\text{--}19\text{ mm}$, докато за шарнирен болт №2 критичната дълбочина е малко по-малка - около $15\text{--}18\text{ mm}$.

Тези резултати са от съществено значение за валидирането на численото моделиране. Изчислените на база фрактографски анализ критични дълбочини предоставят експериментални референтни стойности, които служат за сравнение с резултатите от числените симулации, проведени в средите MATLAB и ANSYS Workbench.

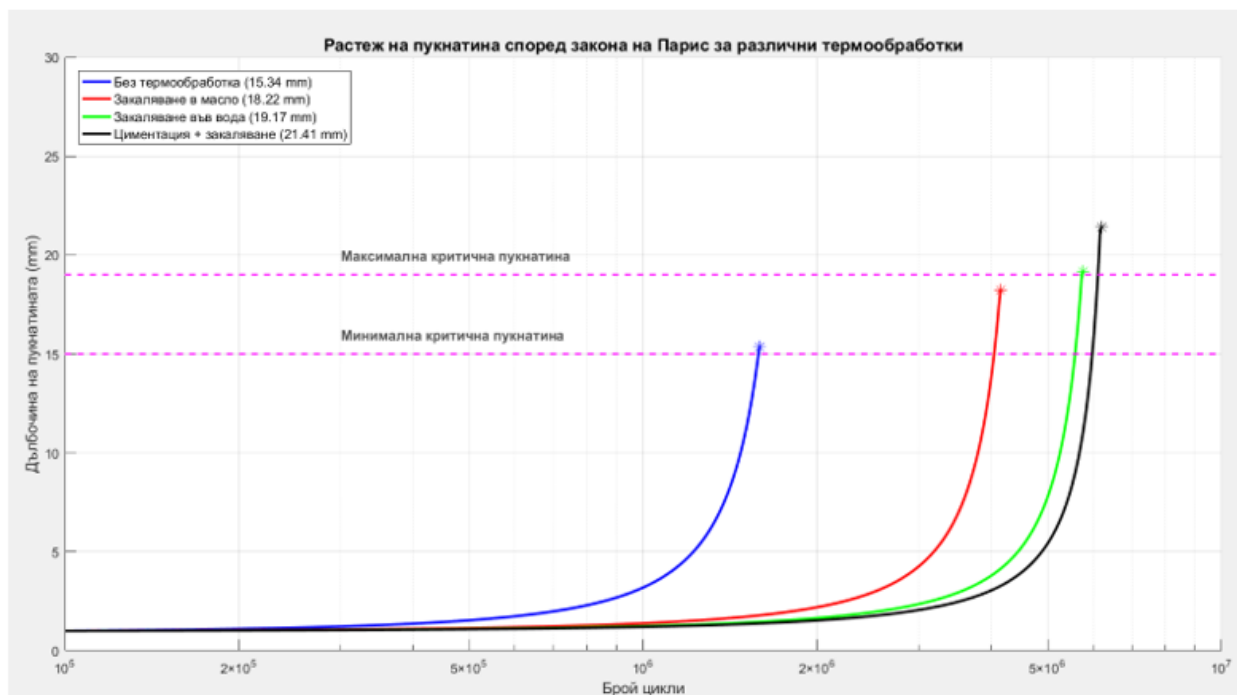
4.4 Числено моделиране на критичната дълбочина на пукнатини в шарнирните болтове.

Целта е да се предвиди поведението на уморните пукнатини под действието на циклични натоварвания и да се определи моментът на разрушение. Моделирането е осъществено в средата на MATLAB и се базира на закона на Парис.

Изследването се провежда при следните входни параметри: диаметър на болта 35 mm , дължина 220 mm и натоварване $49,03\text{ kN}$, което съответства на реално приложеното работно натоварване в конструкцията, в която са използвани изследваните шарнирни болтове. Към това натоварване са добавени и

стойностите на динамичните компоненти, посочени в специализираната литература: странично ускорение $3,75\text{m/s}^2$, вертикално ускорение 5m/s^2 .

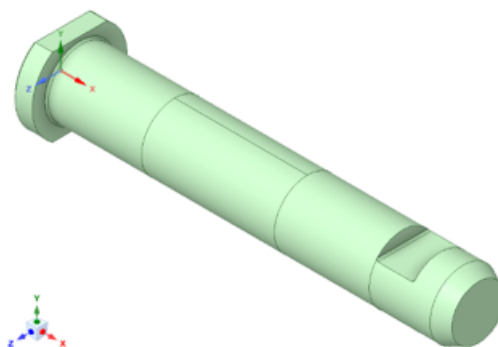
На фигура 4.6 са представени резултатите от численото моделиране.



Фигура. 4.6 Достигане на критичната пукнатина във функция от броя цикли.

4.5 Числено моделиране на растежа на пукнатини в шарнирни болтове чрез ANSYS Workbench.

На фигура 4.7 е представена геометрията на болта, използвана в симулационните изследвания.



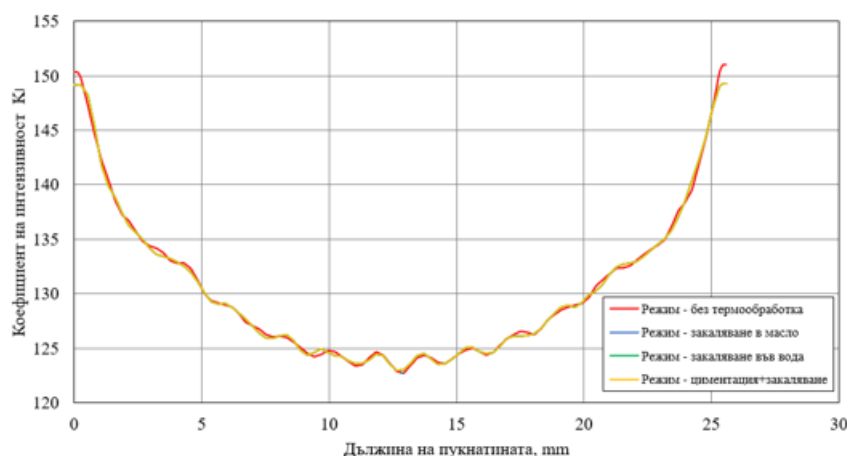
Фигура. 4.7 Модел на болта осъществен в средата на ANSYS.

Осъществени са както статични, така и динамични изследвания, за да се оцени влиянието на различните режими на натоварване върху критичната дълбочина на пукнатините и остатъчния живот на болта.

За настоящите симулации е изградена хибридна мрежа – с глобално по-едри елементи в обемната част на болта и локално фина мрежа в зоната около началната пукнатина. В зоната на върха на пукнатината е приложен

автоматизиран контрол на размерите с цел гарантиране на минимален размер на елементите и максимална прецизност.

Резултатите от статичния анализ са представени на Фигура 4.8, където е изобразена зависимостта на коефициента на интензивност на напреженията като функция от дължината на пукнатината.

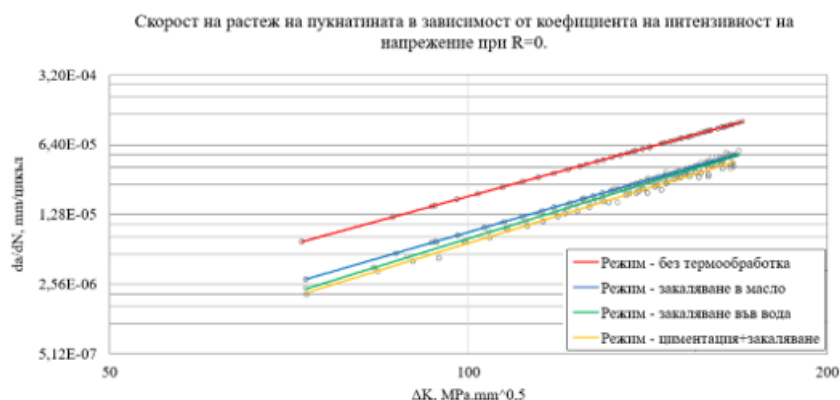


Фигура. 4.8 Резултати от осъществения статичен анализ.

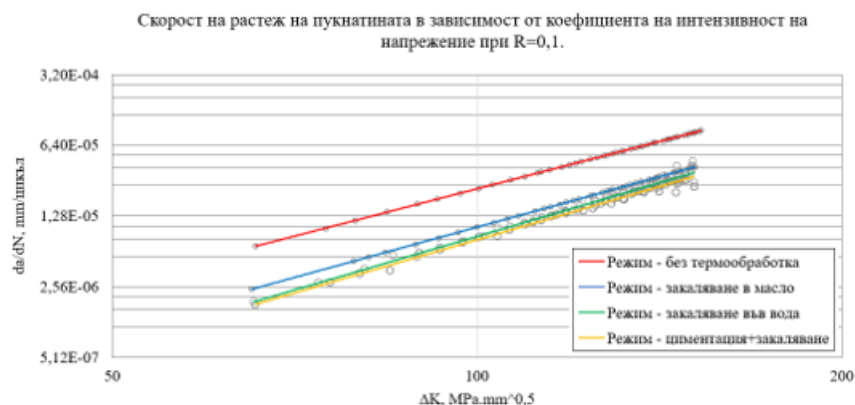
Получените резултати показват, че влиянието на термичната обработка върху локалното разпределение на напреженията около пукнатината е силно ограничено. Основната причина за това е, че коефициентът на интензивност на напрежение зависи предимно от геометрията на пукнатината и приложеното натоварване.

За провеждане на динамичния анализ е използван числен модел, реализиран в среда Ansys Workbench чрез модула SMART Crack Growth. Моделирани са условия на променливо натоварване с различни коефициенти на асиметрия R и предварително е дефинирана началната пукнатина. Анализът е извършен при същите гранични условия, при които е осъществен и статичния анализ. За всяко натоварване е проследено развитието на пукнатината във функция от броя на уморните цикли, като е отчетено влиянието на термичната обработка върху скоростта на растеж.

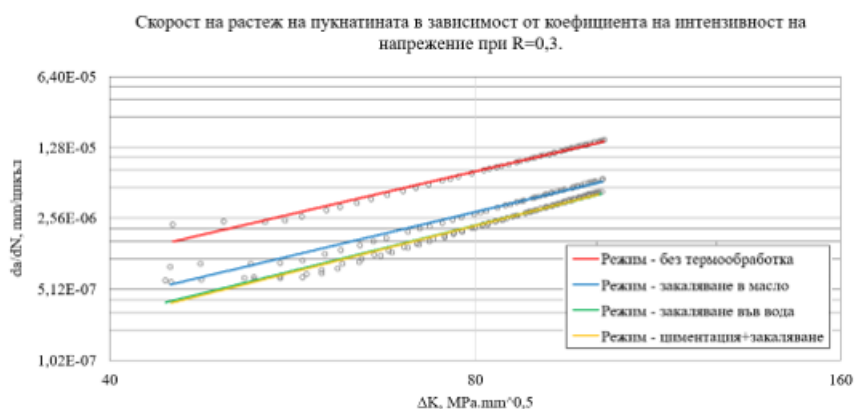
На фигури от 4.9 до 4.13 са представени зависимостите на коефициента ΔK във функция от скоростта на растеж на пукнатината за изследваните режими.



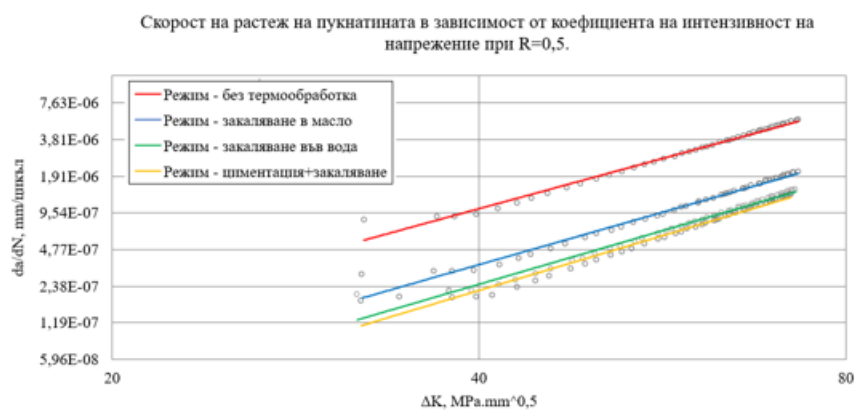
Фигура. 4.9 Зависимост на ΔK от скоростта da/dN при $R = 0$.



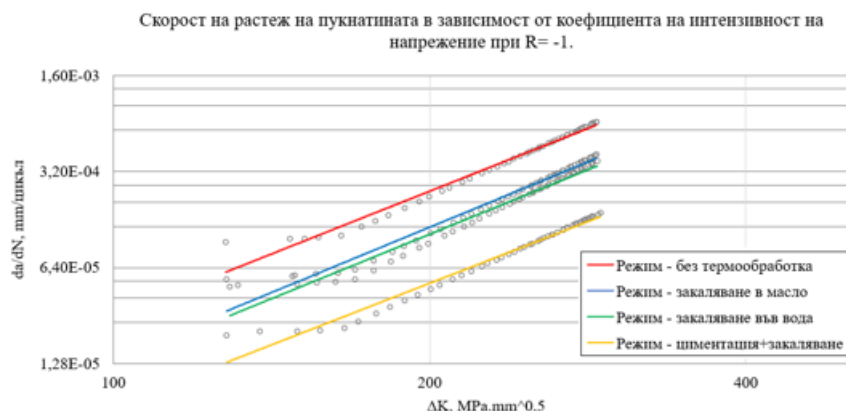
Фигура. 4.10 Зависимост на ΔK от скоростта da/dN при $R=0,1$.



Фигура. 4.11 Зависимост на ΔK от скоростта da/dN при $R=0,3$.



Фигура. 4.12 Зависимост на ΔK от скоростта da/dN при $R=0,5$.



Фигура. 4.13 Зависимост на ΔK от скоростта da/dN при $R = -1$.

Анализът на графиките, показва ясна линейна зависимост в логаритмична скала между скоростта на растеж на пукнатината da/dN и амплитудата на коефициента на интензивност на напреженията ΔK , характерна за закона на Парис. Получените резултати потвърждават, че материалът 42CrMo4 се държи в съответствие с принципите на линейната механика на разрушение (LEFM).

Влиянието на коефициента на асиметрия R върху скоростта на растеж на пукнатината е съществено. При отрицателни стойности на R ($R = -1$) се наблюдава най-бърз растеж, дължащ се на максималната амплитуда на напрежението. С увеличаване на R в положителна посока скоростта на растеж намалява, като при $R = 0,5$ се достига най-ниска скорост на развитие на уморната пукнатина.

ГЛАВА 5. МЕТОДИКА ЗА КОНТРОЛ И ПРОВЕРКА НА ШАРНИРНИТЕ БОЛТОВЕ, ИЗРАБОТЕНИ ОТ СТОМАНА 42CrMo4.

В настоящата глава е разработена цялостна методика за контрол, диагностика и прогнозиране на остатъчния ресурс на шарнирни болтове от легирана стомана 42CrMo4, използвани в силово натоварени възли на железопътни вагони. Методиката интегрира резултатите от предходните експериментални и числени изследвания, съчетавайки съвременни технологии за безразрушителен контрол (PAUT, FMC/TFM) с алгоритми за изчисление на критична дълбочина на пукнатина и остатъчен живот (чрез закона на Парис).

Предложената процедура обхваща:

- идентификация и класификация на болтовете според термообработка и експлоатационни условия;
- ултразвуков контрол с висока разделителна способност;
- количествена оценка на състоянието чрез сравнение с критични стойности;
- цифрова регистрация и архивиране на дефекти;
- периодично оценяване на остатъчния ресурс с помощта на FEM модел в ANSYS.

Въведени са три зони на състояние (безопасна, предупредителна и критична), както и препоръчителни интервали за инспекция според режима на термообработка. Методиката позволява оптимизирана поддръжка, намалява риска от аварии и удължава експлоатационния живот на компонентите.

Предложената система е приложима и за други болтови съединения в машиностроенето и транспорта и отговаря на съвременните изисквания за надеждност, безопасност и прогнозна поддръжка на базата на реално техническо състояние.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно- приложни приноси:

1. Разработен и валидиран е числен модел за растеж на уморни пукнатини в болтове от стомана 42CrMo4, реализиран в ANSYS (модул SMART Crack Growth) и MATLAB, който отчита влиянието на термообработка и динамични натоварвания. Валидността на модела е потвърдена чрез висока степен на съответствие (отклонение под 2%) между числено и аналитично определени стойности на коефициента на интензивност на напрежението (SIF) при анализ на стандартен компактен образец по ASTM E399.

2. Определени са с висока точност критичните дълбочини на пукнатини и остатъчният живот на болтове при различни режими на термообработка чрез прилагане на закона на Парис, с използване на експериментално определени материални константи. Доказано е, че термообработката оказва съществено влияние върху параметрите C и m в закона на Парис, което позволява адаптиране на модела към конкретни технологични режими и повишава точността на прогнозата за растежа на пукнатини.

3. Интегрирани са съвременни методи за безразрушителен контрол (PAUT, FMC/TFM, FMC/PCI) в комбинирана методика за диагностика, която обвързва реално измерена дълбочина на дефекта с числено определена критична стойност.

4. Разработен е алгоритъм за класификация на състоянието на болтовете, базиран на съотношението между измерената и критичната дълбочина на пукнатината, което позволява ранна оценка на риска от разрушение.

Приложни приноси:

1. Предложена е цялостна методика за контрол и техническа оценка на шарнирни болтове, която обединява: безразрушителна инспекция, числен анализ на пукнатини и критерии за техническа пригодност на база реално състояние.

2. Разработен е подход, който е приложим в реални експлоатационни условия, без необходимост от демонтаж на компонентите и може да се внедри в системи за техническа поддръжка на железопътни, автомобилни и машиностроителни компоненти.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Делова, И. Л., Димова, Д. П., Дочев, Б. А., Райчев, Р. П., "Определяне механичните характеристики на стомани 40X и 42CrMo4 при различни режими на термообработка", Машиностроене и машинознание, 2024, стр. 134-137, ISSN 1312-8612.

2. Делова, И. Л., Мирчев Й., Борисов Ц., Райчев, Р. П., "Изследване границата на умора при стомана 42CrMo4 с модифицирана структура", Механика на машините, стр. стр. 122-125, ISSN 1312-8612.

3. Делова, И. Л., Мирчев Й., Борисов Ц., Райчев, Р. П., "Софтуерно определяне на критичната пукнатина при шарнирен болт", Механика на машините, 2025, стр. 126-129, ISSN 1312-8612.

4. Делова, И. Л., Мирчев Й., Борисов Ц., Райчев, Р. П., "Софтуерно определяне параметрите на пукнатиноустойчивост при шарнирен болт с модифицирана структура", Механика на машините, 2025, стр. 130-133, ISSN 1312-8612.

5. Raychev, R. P, Delova I. L., "Methods for reducing the stress concentration in cylindrical specimens, at axial loading", 2021, 13th International Scientific and Practical Conference.Environment. Technology. Resources., pp. 300-303, <https://doi.org/10.17770/etr2021vol3.6535>

SUMMARY

In the context of rapid development in the transport, energy, and manufacturing infrastructure, the requirements for the reliability and operational safety of mechanical components are constantly increasing. Of particular importance is the behavior of structural elements under dynamic and cyclic loading, which leads to material fatigue—identified as the cause of over 80% of failures in engineering systems. Premature failure due to fatigue may result in significant economic losses and pose serious safety risks to human life and technical facilities.

A key property in the resistance to fatigue failure is the fracture toughness of the material—its ability to resist the growth of cracks, especially in the presence of localized stress concentrations. The formation and propagation of fatigue cracks in alloy steel components is especially critical in the railway sector, where dynamic loads, variable amplitudes, and aggressive environmental conditions act together to accelerate material degradation and aging. Hinge bolts in railway suspension systems are a typical example of high-risk elements, where reliable estimation of residual life requires detailed mechanical and fractographic analysis.

Alloy steels such as 42CrMo4 are widely used due to their excellent combination of high strength, good machinability, and structural stability after heat treatment. However, their fatigue performance is strongly influenced by the thermal processing regime, which determines the microstructure, residual stresses, and resistance to crack initiation and growth. The question of optimal heat treatment for maximizing fatigue resistance and ensuring operational safety remains largely unresolved and demands focused experimental and numerical investigation.

Modern approaches in fracture mechanics, combined with finite element modeling (FEM), offer powerful tools for predicting crack growth and determining critical crack sizes. To achieve reliable residual life assessments of structural components, it is necessary to integrate experimental mechanics, fractographic evaluation, and high-precision computer simulations.

This research is highly relevant from both theoretical and practical perspectives. It addresses the need for a systematic approach to the analysis of fracture toughness in alloy steels under different heat treatment regimes by combining laboratory testing, advanced non-destructive testing (NDT) techniques, and numerical modeling. The results have direct industrial application and provide a foundation for developing effective strategies for inspection and maintenance of high-reliability mechanical elements under real-world operating conditions.