

Българска академия на науките
Институт по информационни и комуникационни технологии
Секция: „Вградени интелигентни технологии“

ДИСЕРТАЦИЯ

за получаване на образователна и научна степен „ДОКТОР“

автор: **маг. инж. Десислава Юлиянова Иванова**

Тема:

БЕЗРАЗРУШИТЕЛНИ МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА СВОЙСТВАТА НА МАТЕРИАЛИТЕ

научна област:	5. Технически науки
професионално	5.2. Електротехника, електроника и автоматика
направление:	
научна специалност:	“Автоматизирани системи за обработка на информация и управление“
научен ръководител:	проф. д-р Димитър Неделчев Карастоянов

Благодарности

Благодаря на своя научен ръководител проф. д-р Димитър Карастоянов, за ползотворната съвместна работа, за всички съвети и градивните критики, които отпрати.

Благодаря на колегите от секция „Вградени интелигентни технологии“ на ИИКТ-БАН за методологичната помощ, съветите и препоръките, без които настоящата дисертация не би се случила.

СЪДЪРЖАНИЕ

РЕЗЮМЕ.....	5
ИНОВАТИВНОСТ:	6
ГЛАВА 1. ПРЕГЛЕД НА СЪЩЕСТВУВАЩИ МЕТОДИ ЗА БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН КОНТРОЛ.....	7
1.1. Въведение	7
1.2. Дефиниция.....	9
1.3. Методи	9
1.3.1. Тестване чрез използване на магнитни полета	16
1.3.2. Ултразвук.....	20
1.3.3.Термография.....	25
1.3.4. Визуален контрол.....	27
1.3.5. Рентгенография и компютърна томография.....	27
ГЛАВА 2. ИНОВАТИВНИ МЕТОДИ ЗА БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН КОНТРОЛ.....	34
2.1. Компютърна томография.....	34
2.1.1. Индустриално значение и видове индустриални СТ системи	36
2.1.2. Параметри на сканиране	46
2.2. Алгоритми	53
2.3. Компютърни техники за визуализиране	60
ГЛАВА 3. АЛГОРИТЪМ ЗА ОТКРИВАНЕ НА ДЕФЕКТИ В КОМПОЗИТНИ МАТЕРИАЛИ	65
3.1. Граници на зони на отклонения в сканирани изображения	66
3.2. Изглаждане на изображението	67
3.3. Регресионен алгоритъм	72
3.4. Множествена линейна регресия	75
3.5. Идентификация	79
3.6. Метод на агрегиране	80
3.7. Анализ на процеса	85
ГЛАВА 4. ИЗСЛЕДВАНЕ	89
4.1. Оценка на ефективността на метода.....	89
4.2. База за сравнение	91
4.3. Анализ на резултати от изследването	96
4.4. Експериментални примери	101
4.4.1. Изследване на метални покрития	101

4.4.2.	Изследване на плътността на образци при брикетиране на стружки.	105
4.4.3.	Изследване на плътност и вътрешни дефекти на сплави.....	109
4.4.4.	Термографски изследвания за безразрушителен контрол	111
<i>ГЛАВА 5. ДИСКУСИЯ, ПРИНОСИ И БЪДЕЩИ НАСОКИ:</i>		116
<i>ГЛАВА 6. ПЛАН ЗА КОМЕРСИАЛИЗАЦИЯ НА НАУЧНИТЕ РЕЗУЛТАТИ</i>		118
<i>ЛИТЕРАТУРА:</i>		125
Декларация за оригиналност на резултатите		137
<i>СПИСЪК С ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА</i>		138

РЕЗЮМЕ

Дисертационният труд описва иновативни техники за безразрушително тестване на композитни материали.

В глава първа се дава определение на безразрушителния контрол и систематизация на съществуващите методи за безразрушителен контрол. Дава се систематизиран подход за методи за безразрушително тестване, използващи вълни в електромагнитния спектър.

В глава втора се разглежда томографския метод на изследване, който е важно направление в сферата на безразрушителния контрол.

Дава се общ преглед на големите и нарастващи брой индустриални приложения на рентгеновата компютърна томография (СТ) в преработващата промишленост и най – важните параметри при сканиране.

Томографските изследвания, са базирани на абсорбция и работят добре при тежки елементи, където плътността или вариациите на състава, дължащи се на вътрешната структура или дефектите, са достатъчно високи, за да доведат до значителен абсорбционен контраст.

Въпреки това, в много случаи, когато материалите са леки и / или композитни, които имат подобни масови абсорбционни коефициенти, конвенционалните рентгенови методи, базирани на абсорбция за НК, стават по-малко полезни. Всъщност изискванията за лекота и ултрависока якост за най-модерните материали, представляват голямо предизвикателство пред стандартните NDE инструменти, тъй като абсорбационният контраст, произтичащ от вътрешната структура на тези материали, често е твърде слаб, за да бъде използван.

Решение за този проблем е обработват на изображенията от компютър, с цел тяхното “прочитане” и откриване на евентуални дефекти в изследвания материал. Алгоритмите, с помощта на които се обработват компютърно изображенията, търпят постоянно развитие. В глава втора е даден типичен пример за алгоритъм.

В глава трета се предлага иновативен метод, насочен към изследване на композитни материали, и по – специално към материали, съставени от карбонови нишки, леки и

отличаващи се с голяма здравина, поради което тези материали играят важна роля при автомобилостроенето и авиостроенето. Методът е съчетание от алгоритъм, пригоден към спецификата на нишкови материали и тристъпков агрегационен метод, които гарантира достоверността и точността на получените резултати.

В глава четвърта се дискутират критично получените резултати и са описани проведените експерименти.

В глава пета са представени приноси и бъдещи насоки за развитие на изследванията с цел провеждане на технологичен трансфер за индустриално приложение.

В глава шеста се дава преглед на пазарните възможности, съществуващи предизвикателства и план за комерсиализация на научните резултати.

ИНОВАТИВНОСТ:

В дисертацията се предлага нова техника за откриване на аномалии в сивата скала, с приложение за откриване на деламинации в СТ сканиране на въглеродни материали. Разглежда се алгоритъм за кръстосана регресия, който позволява идентифицирането на отклоняващи се от нормата пиксели след моделиране на общата тенденция на фона на изображението. Този подход включва преобразуването на изображението в поредица от пикселни сигнали в x- и y- посоки, като всеки сигнал представлява един ред пиксели. Регресивните модели се прилагат към всеки сигнал, идентифицирайки крайните стойности, които могат да представляват аномалия в образа. Съществуващите в двете измерения отклонения се класифицират като аномалии. Използва се изглаждане за подобряване способността на регресионния метод за откриване на фини отклонения. В допълнение, тази работа въвежда тристранен агрегиран подход, който свежда до минимум фалшивите позитивни стойности и позволява значително увеличаване на ефективността при откриване на отклонения и аномални зони, с минимално внасяне на шум. Методът позволява характеристика на много очевидни аномалии, като същевременно запазва способността си за откриване и на много леки такива.

ГЛАВА 1. ПРЕГЛЕД НА СЪЩЕСТВУВАЩИ МЕТОДИ ЗА БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН КОНТРОЛ

1.1. Въведение

Безразрушителният контрол (БК) е важна задача в почти всяка област на човешката дейност, от гарантирането на целостта на въздухоплавателни средства до оценка на инфраструктурното разпадане, причинено от влошаване или повреда. Развитието на безразрушителни методи за управление на качеството има резултат в икономически и екологични ползи, води до повишаване на покриваемостта на продукта, както и до подобряване на обществената безопасност и сигурност. Този дисертационен труд съдържа преглед на съществуващите традиционни методи и иновационните разработки и нови приложения в БК. Той включва най-модерните методи за безразрушителен контрол, включително оптични, акустични, ултразвукови и електромагнитни техники, томография, рентгенография и термография. Резултатите са предназначени за изследователи и практики, свързани с проучване, тестване и поддръжка на машини, продукти и компоненти в лабораторни и индустриални среди.

Използването на застрашени от повреди компоненти в производствени процеси, при които спирането им поради повреда е критично, традиционно се регулира чрез премахване на тези компоненти от служба преди изтичането на тяхната прогнозирана продължителност на живот. Такова ранно "пенсиониране" на материали не гарантира, че дадена част няма да се повреди при употреба. Нарастващата цена на такава продължителност на живота основано увеличава търсенето на подобрена покриваемост в промишлеността и налага алтернативни форми за контрол на качеството. Съвременните приложения включват безразрушителна оценка (NDE), също наричана безразрушителен контрол (БК) като средство за наблюдение на нивата и развитието на дефекти в материали по време на операционния им живот.

При композитни материали по време на тяхната обработка, производството на компоненти или при експлоатация могат да възникнат редица увреждания, които най-често се изразяват в появата на пукнатини и порьозност. Редица методи за безразрушителен контрол (БК), са ефективни при изпитване на компоненти за дефекти, без да вредят на компонента. Ултразвуково тестване, X-Ray, рентгенография,

термография, вихрови токове и акустични емисии са актуални техники за различни приложения за тестване в сферата на безразрушителния контрол. Всяка една от тези техники използва различни принципи за откриването на дефекти в материала. Въпреки това, геометрията, физическите и материални свойства на компонента, който се подлага на тестовете, са важни фактори за приложимостта на техниката. Тази глава разглежда тези техники за БК и ги сравнява по отношение на характеристиките и приложимост при композитните части.

Различни безразрушителни техники са използвани в индустрията като приложения за откриване на дефект. Всяка техника използва има своите недостатъци и предимства. Таблица 1 показва различни техники заедно с вида дефекти, които са в състояние да открият:

	Visual Inspection	Penetrant	Acoustic Emission	Pulse/Echo	Through Transmission	X-Ray	Dielectric	Thermography	Neutron Radiography
Delamination	1,2	1	X	X	X	3		X	
Macro-cracks	1,2	2	X			3		X	
Fibre fracture						X		2,3	
Interfacial cracks								2,3	
Micro-cracks		1	2					X	
Porosity	1		2	X	X	X		2	
Inclusions	1			2	2	X		X	
Heat damage	1		2				2		
Moisture						2	X		X
Voids				X	X	X		X	
Surface protrusions	X							X	
Wrinkles	X								
Improper cure							X	2	X

1 = open to surface; 2 = unreliable detection; 3 = orientation dependent

Таб. 1: Техники за откриване на дефекти

1.2. Дефиниция

Предлагаме следната дефиниция, обединяваща основните характеристики на методите за БК:

Безразрушителните методи се отнасят до процеса на оценка и проверка на материали или компоненти за характеризирание или намиране на дефекти и недостатъци в сравнение с някои стандарти, без да променят първоначалните качества или причиняване на повреди на обекта, който се тества, като методите са ценово-ефективни и могат да се прилагат както за тестване на проба за индивидуално разследване, така и върху целия материал за проверка на система за контрол на качеството на продукцията.

Има редица методи за оценка на материали или компоненти и тези за безразрушително тестване са важна категория от тях с много приложения. Категорията на безразрушителна оценка (NDE - Non-Destructive Evaluation) или безразрушителен контрол (БК) включва идентифициране и характеризирание на повреди на повърхността и вътрешността на материали без рязане, отделяне или други промени на материала (Lockard, 2015). С други думи, безразрушителният контрол се отнася до процеса на оценка и проверка на материали или компоненти за характеризирание или намиране на дефекти и недостатъци в сравнение с някои стандарти, без да променят първоначалните качества или причиняване на повреди на обекта, който се тества. Техниките за БК предлагат ценово-ефективни средства за тестване на проба за индивидуално разследване или могат да се прилагат върху целия материал за проверка на система за контрол на качеството на продукцията (Newswire, 2013).

1.3. Методи

Голямото разнообразие от методи за безразрушителен контрол играе основна роля в тестване на композитни материали (Scott & Scala, 1982). Приложенията на БК на композитни материали и обекти могат да включват производство като цяло (Venkataraman, 2001), производство на тръби (Hufenbach и сътр., 2011; Schneider, 1984), на резервоари (Castaings & Hosten, 2008), на космическата техника (Liew и сътр., 2011; Yekani Fard и сътр., 2014), военна техника (Bennett и сътр., 2013), ядрената промишленост

(Vavilov и сътр., 2015), и характеристика на дефекти при композитни материали (Fotsing и сътр., 2014).

Многобройни техники са използвани в областта на безразрушителния контрол, включително ултразвуково изпитване (Peng и сътр., 2012), термографично тестване (Krueger, 2014), инфрачервена тестване термография (Vavilov и сътр., 2015), рентгенографско изследване (Tan и сътр., 2011), визуално изследване (VT) или визуална инспекция (VI) (Bossi & Giurgiutiu, 2015), тестване с акустични емисии (AE) (Sarasini & Santulli, 2014), акустично-ултразвуково тестване (Su и сътр., 2014 г.), шеарография – Shearography (Hung и сътр., 2013), оптично тестване (Liu и сътр., 2014 г.), електромагнитно тестване (Yang и сътр., 2013), тестване с проникващи течности (Kalinichenko и сътр., 2013), и тестване с магнитни частици (Lu и сътр., 2013).

Основните видове методи за безразрушителен контрол включват контактни и безконтактни методи, като и двата метода имат своите специфични приложения в тестване и оценка на композитни материали. Повечето техники за БК изискват добър контакт между сензора и тестваната композитна повърхност, за да се получат надеждни данни. Методи за установяване на такъв контакт са традиционни ултразвукови тестове, токове на Фуко, магнитно тестване, електромагнитно изпитване, както и тестване с проникващи вещества. Друг подход за ускоряване на процеса на събиране на данни е да се елиминира нуждата от физически контакт между сензора и тестваните структури. Безконтактни методи тук са чрез използване на ултразвукови вълни, тестване с радиография, термография, шеарография и визуална проверка (Newswire, 2013). Оптичните методи (например термография, холография или шеарография) са предимно безконтактни.

Таблица 2 дава категоризирани контактни и безконтактни методи за безразрушителен контрол.

Контактни методи за	Безконтактни методи за
---------------------	------------------------

изследване	изследване
Традиционни ултразвукови тестове	Чрез ултразвукова трансмисия
Тестване чрез токове на Фуко	Радиография
Магнитно тестване	Термография
Електромагнитно	С инфрачервени вълни
С проникващи течности	Холография
С проникващи течности	Шеарография
-	Визуална инспекция

Таб.2: Контактни и безконтактни методи за безразрушителен контрол

Има различни методи за тестване на композити. Важно е да се обръща достатъчно внимание на фактори като ефективност и безопасност при анализа кой е най-добрият метод за прилагане в съответна ситуация. Освен това при избрания метод трябва да се минимизират разходите, свързани с изпълнението на тестовете. Материалните дефекти са основните източници на повреди в композитни материали. Тези повреди могат да са под формата на пукнатини, отделяне на слоеве, фрактури в структурата и разтегляне (Mskiur, 2006). Структурната цялост е формализиран процес, който използва съвременни методи за безразрушителен контрол с цел откриване, локализиране и определяне на размера на увреждане (Andrzej Katunin и сътр., 2015). Методите на безразрушителен контрол могат да се категоризират според факторите, които оценяват.

Такова разделение е посочено в таблица 3.

Категория	Приложения
-----------	------------

Оценка на физико-механични свойства, и откриване на съществени недостатъци в композити	Измерване на: динамичен механичен анализ (DMA) (Sturm и сътр., 2015), фазово количество (El-Сабах и сътр., 2013), механична здравина и твърдост (Ray, 2006), еластични константи (Rojek и сътр., 2005), материално съдържание (El-Сабах и сътр., 2013), поява на дефекти и последващи развития (Talreja, 2008), разслояване (Ghadermazi и сътр., 2015), строителство, свързано с ламинат (Scarselli и сътр., 2015), състояние на смолисто закаляване (Aggelis & Paipetis, 2012) състояние по отношение на фаза / матричен интерфейс (Kersemans и сътр., 2014).
Определяне на целостта на структурните компоненти, които са произведени от композитни материали	Откриване на: пукнатини и разслояване (Giurgiutiu, 2016), механичното триене (Gostautas и сътр., 2005), влакнесто раздърпване (Кратко и сътр., 2002), фазово начупване (Нарита и сътр., 2014).

Таб. 3: Категоризация на методите за безразрушително тестване според факторите за тестване

Механичните свойства на материала определят неговата технологичност, ефективност и дълголетие. Това означава, че познаването на механичните свойства е от съществено значение за физическата и механична характеристика на един композитен материал (Sturm и сътр., 2015). Фибро-подсилена пластмаса (FRP) (наречена също така полимер, подсилен с влакна) е композитен материал, изработен от полимерна матрица, подсилен с влакна. Влакната обикновено са съставени от стъкло (в стъклопласт), въглерод, арамид или базалт. Рядко са използвани други влакна като хартия, дърво или азбест. Полимерът обикновено е епоксидна, винилестерна или полиестерна термореактивна пластмаса, въпреки че фенолформалдехидните смоли все още се използват. Mayer & Council (1993)

показват, че механичните свойства на Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) композити зависи от фазовата здравина и якост, здравина на матрицата и химическата стабилност. Ray (2006) показва, че колкото по-висока от температурата на околната среда и колкото по-дълго е времето на експозиция, толкова по-голям ще бъде спадът в силата и абсолютната стойност на GFRP. Rojek и сътр. (2005) установяват, че най-добрите методи определяне на еластичните свойства са методите на ултразвук. El-Sabbagh и сътр. (2013) изучават възможността за използване на ултразвукова надлъжна звукова вълна за определянето на фазовото съдържание и разпределението на естествените влакна. Talreja (2008) изследва механичните характеристики и повреди при композитни материали. Дефекти, свързани със разслояване, са открити експериментално върху стъклени / епоксидни композити чрез използване на термография със стъпково нагряване - step-heating thermography (Ghadermazi и сътр., 2015).

При прегледа на литературата могат да се посочат много начини за изследване на композитни материали и има много предложени методи за всеки от тях. За идентифициране на дефекти в композитни конструкции на въздухоплавателни средства, оценка на композитни материали в самолетостроенето, и мониторинг на състоянието на композитни структури в космическата индустрия се ползва ултразвуково изследване (Andrzej Katunin и сътр., 2015; Staszewski и сътр., 2009), термографско тестване (Andrzej Katunin и сътр., 2015; Meyendorf и сътр., 2014), вибрационно тестване (Andrzej Katunin и сътр., 2015; Loutas и сътр., 2012; Rizos и сътр., 2008), инфрачервена термография (Meola & Carlomagno, 2014), шеарография (Růžek и сътр., 2006), и X-вълнова компютърна томография (Bull и сътр., 2013).

Ултразвуковото изследване е най-приложният метод за контрола на състоянието на композитната структура на летателни крила (Grondel и сътр., 2004), идентификация на дефекти в композитни структури в самолетостроенето (Andrzej Katunin и сътр., 2015; Polimeno & Meo, 2009), оценка на композитни материали на въздухоплавателни средства (Růžek и сътр., 2006), контрол на състоянието на композитни конструкции на космическа

техника (Loutas и сътр., 2012), и контрол на състоянието на структурата (SHM) (Staszewski и сътр., 2009).

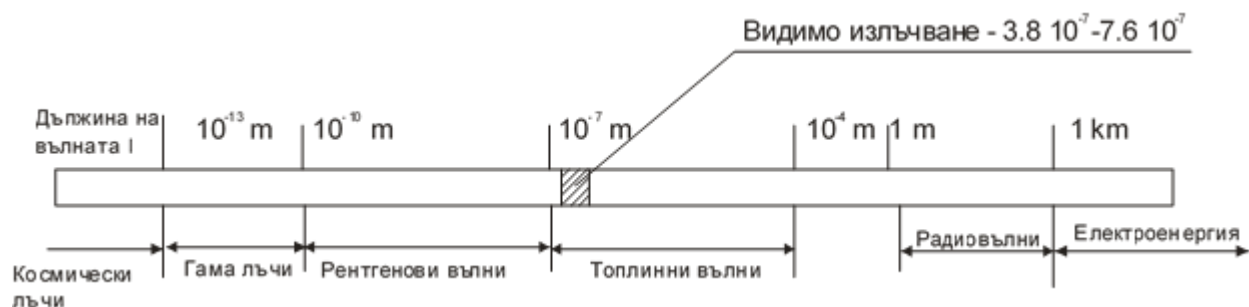
Таблица 4 представя видове изследвания и методи за безразрушителен контрол, които са използвани за всяко едно.

Вид на изследването	Метод за БК
Идентификация на дефекти в композитни структури (Andrzej Katunin и сътр., 2015; Polimeno & Meo, 2009), Оценка на композити в самолетостроенето (Růžek и сътр., 2006), Контрол на състоянието на композитни структури в космическата техника (Loutas и сътр., 2012).	Ултразвуково изпитване (Andrzej Katunin и сътр., 2015) Термография (Maierhofer и сътр., 2014, Usamentiaga и сътр., 2013) Вибрационни методи (Loutas и сътр., 2012; Rizos и сътр., 2008) Инфрочервена термография (Meola & Carlomagno, 2014) Шеарография (Růžek и сътр., 2006) Компютърна томография (Bull и сътр., 2013 г.)
Health monitoring of a composite wing-box structure – следене за състоянието на структурата на композитни материали в самолетни крила (Grondel и сътр., 2004)	Ултразвуково тестване (Grondel и сътр. 2004; Andrzej Katunin и сътр., 2015)
Structural Health Monitoring (SHM) – следене за състоянието на структурата (Staszewski и сътр., 2009)	Ултразвуково тестване (Andrzej Katunin и сътр., 2015; Staszewski и сътр., 2009)

Повреди в (GFRP) Glass Fiber Reinforced Polymer - подсилени полимери от стъклопласт - (Meola & Carlomagno, 2010; Rique и сътр., 2015)	Термографично тестване (Maierhofer и сътр. 2014; Usamentiaga и сътр., 2013) Радиография (Ataş & Soutis, 2013; Rique и сътр., 2015)
Автоматично откриване на увреждане на побитости в композитни въглеродни влакна (Usamentiaga и сътр. 2013) Характеризиране на повреди в GFRP (Ataş & Soutis, 2013; Maierhofer и сътр., 2014)	Термографично тестване (Maierhofer и сътр., 2014; Usamentiaga и сътр. 2013) Радиография (Ataş & Soutis, 2013; Rique и сътр., 2015)
Побитости на стъкло / епоксидни материали с производствени дефекти (Meola & Carlomagno, 2014)	Термографично тестване (Meola & Carlomagno, 2014)
Оценка на щетите в "sandwich" структури (Мео и сътр., 2005), параметри, влияещи на амортизация на структура (Адамс и сътр., 1978), поведението на структури (Каули; и Adams, 1979), динамични характеристики за откриване на структурни увреждания (Каули& Адамс, 1978), статистическо откриване на увреждане на повърхности, оценка и възстановяване (Rizos и сътр., 2008)	Вибрационни методи (Loutas и сътр., 2012; Rizos и сътр., 2008; Trendafilova и сътр., 2008)
Откриване на множествени пукнатини (Zhang и сътр., 2010)	Неутронна радиография (Zhang и сътр., 2010)

Таб. 4: Видове изследвания и методи за безразрушителен контрол

Направена е класификация на методи за безразрушителен контрол използващи вълни в диапазона на електромагнитния спектър. Радиационният способ на пренасяне на топлинна енергия се характеризира с това, че енергията се пренася посредством електромагнитни вълни. Колкото по-голяма е честотата на електромагнитните вълни, толкова по-голяма е пренасяната енергия с фотона. Когато дадено тяло е нагрето до определена температура, електроните в атомите на тялото преминават на по-високи орбити (възбудено състояние). Тези състояния са неустойчиви и електроните самопроизволно се връщат на стационарните си орбити, при което изпускат (излъчват) фотон с определена честота. Тази честота зависи от орбитата и енергийното състояние на електрона. Колкото по-голяма е разликата в енергийните нива, през които преминава електронът, толкова по-висока е честота на излъчения фотон. Количеството на изпускните фотони и разпределението им по честота (спектрално разпределение) зависят от температурата на тялото. Съществуват и други причини освен нагряването на телата за излъчване на фотони. Това може да бъде бомбардиране на повърхността на тялото с елементарни частици, наличие на електромагнитно поле и други. Пълният диапазон на изменение на дължините на вълните на излъчваните фотони от едно тяло се нарича електромагнитен спектър. На фиг. 1 е даден пълният спектър на електромагнитното излъчване.



Фиг. 1: Електромагнитен спектър

1.3.1. Тестване чрез използване на магнитни полета

Електромагнитното излъчване (ЕМИ) е разпространяваща се през пространството вълна с електрическа и магнитна компонента. Тези компоненти осцилират под прав ъгъл една

спрямо друга, както и спрямо посоката на разпространение на вълната. Изразът електромагнитно излъчване също се използва като синоним за електромагнитни вълни в по-общ смисъл, дори когато последните не се излъчват или разпространяват в откритото пространство. В този смисъл електромагнитно излъчване е например светлината разпространяваща се по оптично влакно или електрическата енергия предавана по коаксиален кабел. Електромагнитното излъчване притежава енергия, импулс и момент на импулса, които могат да се предават когато излъчването взаимодейства с някакво вещество. Според теорията променливото електрическо поле поражда магнитно поле и обратно. Така осцилиращото електрическо поле създава осцилиращо магнитно поле, което от своя страна създава осцилиращо електрическо поле и т.н. По този начин се създава ЕМ вълна, която се разпространява през пространството.

Методите за електромагнитно тестване използват магнетизъм и електричество за откриване и оценка на фрактури, повреди, корозия или други дефекти на материали. При тях се индуцира електрически ток, магнитни полета или и двете в тест обект и се отбелязва електромагнитния отговор. Електромагнитните методи включват Eddy Current Testing (EC) (Koyama и сътр., 2013), Remote Field Testing (RFT), Magnetic Flux Leakage (MFL) и Alternating Current Field Measurement (ACFM). Във всеки от тези техники, основната физика на процесите е коренно различна както и областите, описани от различни класове на частни диференциални уравнения (PDEs).

Инспекцията чрез магнетизирани частици (MPI – Magnetic Parts Inspection) е процес на безразрушително тестване за откриване на повърхностни прекъсвания в материалите и такива, които са плитко под повърхността, чрез използване на различни феромагнитни материали като желязо, никел, кобалт и някои от техните сплави. Процесът включва поставянето на материала под влиянието на магнитно поле, като той може да бъде магнетизиран чрез пряка или непряка магнетизация. Пряката магнетизация се получава, когато електрическият ток преминава през тествания обект и в материала се образува магнитно поле. Непряката магнетизация се получава, когато материала няма свойства за преминаване на електрически ток и съответно магнитно поле не може да бъде директно

образувано в него, но такова е налично във външен източник. Магнитните линии, които се образуват, са перпендикулярни на посоката на електрическия ток, който може да бъде или променлив ток (AC), или някаква форма на прав ток (DC) (изправен променлив ток).

Наличието на повърхностно или подземно прекъсване в материала позволява магнитният поток да изтече, тъй като въздухът не може да поддържа толкова магнитно поле на единица обем, колкото металите.

За да се идентифицира изтичането, металните частици, сухи или в мокра суспензия, се поставят върху материала. Те са привлечени от област на изтичане на потоци и формират това, което е известно като индикация (за проблем), която се оценява, за да се определи нейната природа, причина и следващите действия, ако има такива.



Фиг.2: Хоризонтална машина работеща с мокра суспензия

Хоризонтална машина работеща с мокра суспензия от частици - най-често използваната машина за масово производство. Машината има глава и опашка – като на струг, които имат електрически контакти, вход и изход, тя да се магнетизира. Между главата и опашката, индукционна намотка, която се използва за промяна на ориентацията на магнитното поле с 90 градуса спрямо обекта. Операторът има възможност да използва АС, полувървна или пълна вървна DC или DC. В някои устройства е вградена функция за демагнетизиране, която използва бобината и разлагащата се АС. За да инспектирате част, тя е захваната между две електрически контактни подложки. Магнитното решение, наречено баня, след това тече над повърхността на детайла. След това ваната се прекъсва и магнитизиращият ток се подава към частта за кратка продължителност, обикновено 0.5 до 1.5 секунди. (Трябва да се вземат предпазни мерки за предотвратяване на изгаряне или прегряване на частта.) Създава се кръгово поле, обикалящо около обиколката на частта. Течовите полета от дефектите след това привличат частиците, за да образуват индикации. Когато бобината се използва за създаване на надлъжно магнитно поле в частта, частта се поставя върху вътрешната повърхност на намотката, процедира се по същия начин както при нормално захващане на обекта за тест.

Използват се частици от железен оксид, както за сухи, така и за влажни системи. Системата от частици на влажна система е с размер от по-малко от 0,5 микрометра до 10 микрометра за използване с вода или маслени носители. Частиците, използвани в мокрите системи, имат пигменти, които флуоресцират при 365 nm (ултравиолетов А), изискващи $1000 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ ($10 \text{ W} / \text{m}^2$) на повърхността на частта за правилна проверка. Ако частиците нямат правилната светлина, приложена в тъмна стая, частиците не могат да бъдат открити. Промислената практика е да се използват UV-очила / стъкла, за да се филтрира ултравиолетовата светлина и да се усили видимият спектър на светлина (обикновено зелен и жълт), създаван от флуоресциращите частици. Зелена и жълта флуоресценция е избрана, защото човешкото око реагира най-добре на тези цветове. Праховете за сухи частици варират в размер от 5 до 170 микрометра и са проектирани да се виждат при условия на бяла светлина. Частиците не са предназначени за използване при др метод. Сухите прахове обикновено се нанасят с ръчни апликатори на прах за

въздух. Приложените с аерозол частици са подобни на мокрите системи, продавани в предварително смесени аерозолни кутии, подобни на спрей за коса.

Yoki е портативна електромагнитна система е много често използвано оборудване, което се използва за създаване на магнитно поле. Това се прави основно чрез обвиване на електрическа намотка около парче мека феромагнитна стомана. В електрическата верига е включен превключвател, така че токът и следователно магнитното поле да могат да се включват и изключват. Те могат да бъдат захранвани с променлив ток от електрически контакт или от постоянен ток от батерия. Този тип магнит генерира много силно магнитно поле в местна област, където полюсите на магнита докосват частта, която се проверява. Prods са ръчни електроди, които се притискат към повърхността на компонента, който се проверява, за да се осъществи контакт за преминаване на електрически ток през метала. Преминаването на тока между дръжките създава кръгло магнитно поле около лостовете, което може да се използва при инспекция на магнитни частици. Проудите обикновено са изработени от мед и имат изолирана дръжка, за да предпазят оператора. Един от дръжките има пусков ключ, така че токът може бързо и лесно да се включва и изключва. Понякога двата уреда са свързани с всеки изолатор (както е показано на изображението), за да се улесни работата на едната ръка. Това се нарича двоен прод и често се използва за проверки за заваряване. Ако не се поддържа подходящ контакт между дръжките и повърхността на компонента, може да възникне електрическо изкривяване и да причини повреда на компонента. Поради тази причина не се допуска използването на този тип оборудване, когато се извършват инспекции на авиокосмическите и други важни компоненти. За да се предотврати възникването на крайниците, продуктите трябва да се проверяват често, за да се избегне окисляването им, покриването им с мащаб или друг замърсител или повреда.

1.3.2. Ултразвук

Ултразвуковите вълни са звукови вълни с честоти в диапазона над 20 kHz. Това са по - скоро насочени, а не чуваеми звукови вълни и могат да пътуват свободно в течна и твърда

среда, в зависимост от плътността и еластични свойства на средата. Ултразвукови вълни, главно в диапазона от 2 MHz до 200 MHz, са широко използвани за приложения на БК.

Звуковите вълни могат да се разпространяват в два режима, а именно надлъжно или по нареза. Надлъжната вълна е най-често използвана за БК приложения. Те е по-бърза и може да се движи и в твърди и в течни носители, докато напречната по нареза се формира, когато материални частици осцилират, обикновено в посоката на разпространение на вълната. Тези вълни изискват акустично твърди носители за пътуване и следователно не проникват ефективно в течност и газове. Това свойство ограничава приложението им в БК с ултразвук.

Пиезо-електрически материал се използва за генериране на звукови вълни чрез прилагане на разлика в напрежението между всеки две от неговите повърхности. Промяната в размерите на пиезо-електрическия материал генерира импулс от механични вибрации, които се състоят от ултразвукови вълни.

За добрите резултати от ултразвуковото тестване е необходимо прекъсването/недостатъкът в обекта на изследване да бъде по-голям от половината от дължината на вълната. Освен това, качеството на резултатите зависи от чувствителността и резолюцията на апаратурата.

Чувствителност е способността на дадена система да открива най-малките недостатъци. Резолюция е способността му да открива два близко разположени недостатъци в материала и близо до повърхността. Чувствителността и резолюцията се увеличава с честотата на звуковата вълна, използвана за проверка. Оптималната честота на ултразвуковото тестване за откриване на пропуски в материал също така зависи от структурата на материала, вида недостатък, размера на недостатъка и неговото местоположение.

Колкото по-висока е честотата на вълните, толкова по - голямо ще бъде вибрационното разсейване на енергия в материала поради честите сблъсквания между вълнови елементи и частици материал. Този ефект води до намаляване на проникваща способност на

вълната т.е. максимална дебелина на материала, където недостатъци могат да бъдат засечени.

Интензивността на ехото на звукова вълна зависи също от несъответствието в акустичен импеданс между недостатъка и околната среда. Следователно, ехото от празнота в материала ще бъде по-силно, отколкото отразеното от самия материал, поради голяма разлика в съпротивлението.

Голямото разминаване в акустичния импеданс в рамките на материала позволява инспекция на по-дебело сечение поради силното ехо. Голямата пропускателна способност води до по-малко затихване на честотния обхват около една централна честота и осигурява на ултразвуковата система по-висока резолюция, поради високата крайна честота, но очевидно по-малко проникваща способност. От друга страна, по-малък спектър на високо заглушени честоти ще доведе до система с лоша резолюция, но по-високо проникване.

Ултразвуковият контрол като метод за оценка се състои от верига на предавател и приемник, датчик - инструмент и дисплей. Въз основа на информацията, носена от сигнала, може да се установи местонахождението на пукнатини и въздушни мехури, размери на дефекта, ориентацията му и други характеристики (Lu, 2010). Предимствата на ултразвуковите тестове включват висока скорост на сканиране, добра разделителна способност и дефектоскопия, способност за употреба в производствената среда. Недостатъците включват трудности при провеждане на теста, необходимите умения да се сканира частта точно, както и необходимостта от осигуряването на достатъчно проби, за да са сигурни точните тестове. Този вид изпитване е отличен за употреба в една поточна линия, където една и съща част от проектираното устройство трябва да се тества на няколко пъти. Има два подхода на БК с ултразвук, които обикновено се използват в различни приложения; рефлектометър и методи на трансмисия. И при двата от тези подходи се използват високочестотни звукови вълни от порядъка на 1-50 MHz за откриване на вътрешни недостатъци в материал (Garney, 2006). Ултразвуковото тестване може да бъде проведено в три режима, пренос, рефлексия и обратно разсейване, при

всеки от които се използва набор от датчици, свързващи средства и честоти (Stonawski и сътр., 2008).

Пулсарно-еховият (Pulse echo) ултразвуков метод може лесно да намери дефекти в хомогенни материали. При този метод трябва да се обърне внимание на времето за преминаване на вълната и загубата на енергия, дължащи се на отслабване и вълново разсейване при недостатъци. Методът помага да се открие дефект в материал, независимо дали той е хомогенен или хетерогенен (Warnemuende, 2006). За откриване на дефект, местоположение и цели изображения, както контрол на качеството в голям мащаб, са подходящи измервания на скоростта на ултразвуков импулс (ultrasonic pulse velocity, Oguma и сътр., 2012). Ултразвуковият метод чрез трансмисия се различава от конвенционалните ултразвукови методи. Този метод запазва датчиците и приемника на повърхността и на определено разстояние от извадката. Това е особено благоприятно, когато сложни геометрии не позволяват контакт на традиционният датчик и приемник на повърхността на детайла.

Най-често използваните показатели за свойствата са вълнова скорост на разсейване (wave propagation velocity), амплитуда (или енергийна) загуба. Някои от методите за изпитване, описани тук, се отнасят само до тестването на едно свойство на материала за изследване, докато други, по-гъвкави, могат да измерват два или три (Ducharne и сътр., 2015). Повечето приложения отчитат само скоростта на импулса и го свързват с различни параметри на обекта на изследване. Като се има предвид загубата на енергия може да се открият няколко допълнителни характеристики на материалите (Karabutov & Podymova, 2014). Редица автори са изследвали възможностите за анализ с метода на затихване на импулса (El-Sabbagh и сътр., 2013; Genovés и сътр., 2015). Разсейването, поглъщането и геометриката са три параметри, които влияят на затихването. Малки прекъсвания, като границата на нехомогенни образувания или мехури, са източник на разсейване.

Метод за тестване с акустични емисии Acoustic Emission (AE) е ефективен метод за анализ на дефекти. Тези механични вибрации са генерирани от материални дефекти като микро пукнатини в матрицата, фазово отлепване, локализирано разслояване, или изтегляне на

влакна и счупване (Arumugam и сътр., 2011, S. Gholizadeh и сътр., 2015). Отражателните вълни (stress waves), които са резултат от тези видове дефекти, се разпределят концентрично от техния източник и се откриват чрез набор от силно чувствителни пиезоелектрични елементи.

Техниката на акустичните емисии е различна от повечето други техники за БК в два аспекта. Първата разлика е произходът на сигнала. Вместо да доставя енергия към обекта, този метод се вслушва в "звук", генерирани от освободена енергия в обекта. Втората разлика е, че е метод, който се занимава с динамичните процеси в материала. Способността да се различава между развиващите се и вече налични и статични дефекти е значителна. Други предимства на метода включват висока чувствителност, бърза и глобалната проверка с помощта на множество сензори, постоянно управление на процеса, като няма нужда да се разглобява и почиства тестовия образец (Lu, 2010). Второто предимство на метода е, че той е много полезен за откриване на най-различни видове дефекти, причинени от натоварване на обекта на изследване при продължителна употреба - пукнатини, фазово счупване, матрични микропукнатини, отлепване и разслояване. Недостатъкът на този вид изпитване е нуждата от високообучен персонал, за да се съпоставят данните от акустични емисии на специфични видове щети.

Акустично-ултразвуковият метод е комбинация от акустично и ултразвуково изпитване, като се използва специално за определяне на степента на вътрешните несъвършенства и нехомогенност в композит. В безразрушителния контрол, акустичниото / ултразвуково тестване е с голям потенциал въз основа на оптимална икономичност, гъвкавост и чувствителност. Второто предимство е, че е добър показател за натрупани щети в структурата, поради умора от продължително натоварван на частта или материала или повреда от удар. Недостатъкът на този вид проверка е настройката и предварителните изчисления, задължителни преди всяко изпитване. Вторият недостатък е, че този тип изследване не е полезен за откриване на отделни големи недостатъци като разслояване или кухини (Schroeder и сътр., 2002).

Магнитошумовото изследване е комбинация от акустично и магнитно изпитване. Магнитошумовите изследвания се провеждат с оборудване, предназначено да измерва магнитошумовото напрежение при пренамагнитване на феромагнитни материали . Уредът е изграден от генератор на ток, усилватели на магнитния и акустичния шум и микропроцесорна система, която управлява уреда и диалога с потребителя, извежда резултатите от измерването на дисплей, записва ги в паметта на уреда и ги извежда по комуникационен порт към компютър. Честотата на генерирания ток е 80 Hz. Намагнитването е синусоидално. Уредът има ръчен режим и програмирано сканиране по намагнитващ ток и по честота на магнитния шум. Токът се променя с избираема стъпка в диапазон от 0 до 500 mA. Усилвателят на магнитния шум е с честотен обхват от 10 до 100 кГц. Уредът отчита и измерва едновременно два информационни параметри – средна стойност на магнитошумово напрежение на Баркхаузен U_m и създадената при пренамагнитването магнитоакустична емисия - магнитоакустично напрежение U_a .

Изследванията се провеждат с приложен П- образен магнитен преобразувател с вграден приемник на магнитошумовото напрежение, който се поставя върху работната част на епруветката, така че магнитното поле е перпендикулярно на приложеното опъново усилие. За регистриране на магнитоакустическа емисия се използва пиезоелектричен преобразувател тип VS 150M (Иванова, Пашкулева и Парталин, 2014).

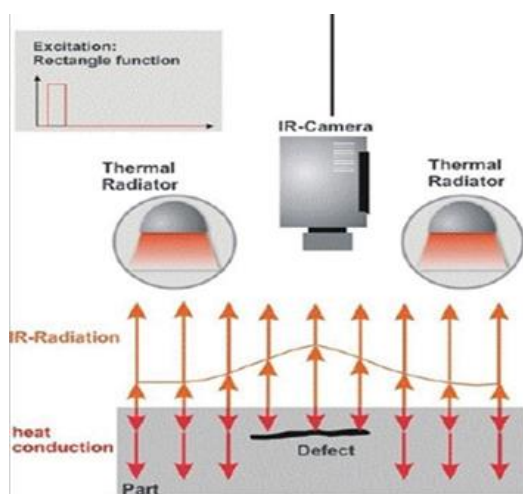
1.3.3.Термография

Термографското тестване използва инфрачервени изображения за откриване на дефекти в компоненти. Инфрачервена камера записва пространственото и времево разпределение на температурата на повърхността след нагряването на обекта на изследването. Дефектите нарушават потока на топлина и по този начин могат да бъдат открити. Термичните методи за безразрушителен контрол обикновено използват активна термография. При нея горещи вълни се изпращат с помощта на външен или вътрешен източник. Това дава възможност за измерване на дълбочина, дебелина и размер на вътрешни недостатъци. Активната термография е полезен инструмент за неразрушаваща

оценка на материали. По принцип са възможни два различни подхода: традиционна импулсна термография(PT) и lock-in термография (LT).

Пулсовата термография е вид термография, в която се прилага стимул чрез пулсова светкавица, обикновено с Xenon-ови източници на светлина.

Подбор на активни източници, различни видове инфрачервени камери, както и набор от аналитични инструменти са на разположение за наблюдение на реакциите на обектите към активните-източници (Фигура 3).



Фиг. 3: Импулсна термография: схеми, показващи как дефекти

водят до нарушаване на топлинния поток през изследвания обект

Lock-in термографията (LT), известна още като модулирана термография е напреднала безразрушителна (NDE) техника, която се прилага повече от десетилетие за откриване на дефекти и характеризиране на твърди и композитни структури, използвани в аерокосмическата промишленост,автомобилната промишленост, електрониката и други отрасли (Srajabr&Dillenz, 2012; Ibarra-Castanedo и сътр., 2007). При LT, изследваната структура се стимулира чрез термично използване на нагревателни лампи (халогени), което се нарича оптична lock-in термография (OLT) или генератори на еластични вълни, наречена ултразвукова lock-in термография (ULT). Като стимулиращ източник също могат да бъдат и вихрови токове, индуцирани чрез електромагнитна индукция.

Топлопроводимостта на материала може да се променя от наличието на дефекти, като термографската инспекция се използва за тънки части, защото когато дефекти се намират дълбоко под повърхността на частта за изследване, те са склонни да произвеждат по-малко топлинно колебание, в сравнение с тези, наблюдавани по-близо до повърхността на частта. Като цяло се счита, че дефекти, които имат диаметър по-малък от тяхната дълбочина в частта, не могат да се открият с този вид проверка. Недостатък като разслояване или увреждане на структурата причинява промяна на топлинното излъчване от площта (Meyendorf и сътр., 2013). Има много предимства и недостатъци на този вид проверка. Едно от предимствата е, че може да се изследва по-голяма площ на частта. Второто предимство е, че за разлика от много други видове, при този метод не е нужен допир или какъвто и да е контакт с обекта на тестване. Това дава възможност за проверка на части, където само едната страна на частта е достъпна за проверка. Недостатъците на този вид проверка включват необходимостта от чувствителна и скъпа апаратура, нуждата от висококвалифицирани инспектори за боравене с инструментите, както и липсата на яснота на дефекти, ако те се намират твърде дълбоко под повърхността на детайла. Инфрочервеното (infrared) термографско тестване (ИРТ) се основава на записа на топлинното излъчване, излъчвано от повърхността на образец с помощта на инфрочервена камера (Mulaveesalaa & Tuli, 2008).

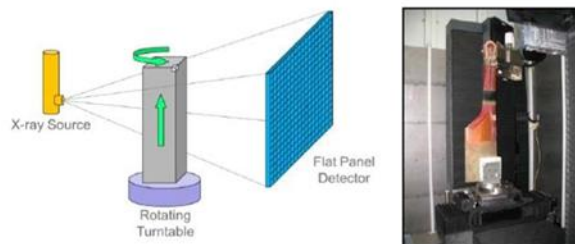
1.3.4. Визуален контрол

Това е първоначалният метод на БК, използван често, защото може да спести време и пари чрез намаляване на количеството на други тестове. Най-важното предимство на метода на визуалната проверка е неговата бързина. Другото предимство на визуална проверка е относителната достъпност на процеса. Визуалната проверка не се нуждае от оборудване, но този метод е с присъщите му недостатъци за невъзможност за откриване на вътрешни дефекти.

1.3.5. Рентгенография и компютърна томография

Радиографичният метод е един от основните и най-широко прилагани в практиката методи за безразрушителен контрол (Lockard, 2015). Използва се за откриване на вътрешни несъвършенства в различни продукти при производство и/или експлоатация. Най-често срещаният тип на увреждане на композитни материали е разслояването, при което се получават въздушни джобове, но разслояване може да се открие в РГ само, ако ориентацията не е перпендикулярна на рентгеновия лъч. Има много видове радиография и всеки вид има специфични приложения. Конвенционалната радиография е най-удачна, когато частите са нито твърде дебели, нито твърде тънки. За тънки части от 1 до 5 mm, се прилага радиография с нисъко напрежение, радиографията с гамалъчи е добра за дебели части. Тези видове радиография са полезни за откриване на големи кухини, съединения на материали и обекти, транс-пластинковите пукнатини, нееднакво разпределение на фази и неправилно ориентиране на фазите, като например вълнова деформация на влакната или заваръчни линии (Garney, 2006). Друг тип радиография използва гама лъчи, за да проникне в композита. Радиография с гама лъчи е подходяща за дебели части, защото лъчението има по-къси дължини на вълните. Радиография с разширено проникване е вид радиография, използвана специално за откриване на малки матрични пукнатини и разлепване (деламинации) в пробата (ATAS & Soutis, 2013). Има разновидности на радиографски методи за тестване за различни приложения. Тези методи са филмовата радиография (Burdick & Lemle, 1993), компютърна томография (Тап и сътр., 2011; Katunin и сътр., 2015), и цифрова радиография (Aidi и сътр., 2015). Рентгенова компютърна томография (ХСТ) е безразрушителна техника за визуализиране на вътрешни характеристики в твърди предмети, както и за получаване на цифрова информация за техните 3-D геометрии и свойства. Голямото предимство на ХСТ в сравнение с прожекционната радиология е 3-D визуализирането на изображение на конструкцията, докато в радиологията полученото изображение е само 2-D. Ето защо, данните от ХСТ се четат бързо и лесно. ХСТ ще промени мащаба на наблюдение от макроскопски до микроскопичен мащаб, така че резултатите от метода на ХСТ са много надеждни (Bayraktar и сътр., 2008). Томографското сканиране се използва за генериране на точно триизмерно изображение на напречен разрез на целия обект на изследване. Типични

дефекти, които могат да бъдат открити с помощта на тази техника са разслояване, неравности, порьозност, малки пукнатини или дефекти, получени при въздействията на различни фактори. Обемът е реконструиран триизмерно с помощта рентгенографски снимки от различни гледни точки – фиг. 4.



Фиг. 4: Принцип на спираловидна система за томографско сканиране

Като основно предимство на конвенционалната радиография с филми обикновено се посочва универсалността. Прилагането на метода не зависи от формата на обекта и мястото на пролъчване. Характеризира се с добри технологични възможности за откриване на индикации за несъвършенства, стабилни информационни носители - радиограми, а индикациите в двумерно изображение са адекватни по форма на сечението на несъвършенствата. Също така за извършването на основните операции не се изисква висока квалификация и опит. Като основни недостатъци на метода обикновено се посочват: ниската му производителност, фактът, че използването му застрашава околната среда. Методът е сравнително скъп, трудно открива пукнатини, изискващ повече време за получаване на изображението и е типичен пример за прекъснат процес с много ръчен труд и сложна логистика. Възможната алтернатива на конвенционалната радиография, радиоскопията позволява получаването на сравнително по-качествено изображение в реално време, намаляване на разходите, но също се характеризира с някои недостатъци.

Бързото развитие радиографията през последните двадесет години, обаче позволи въвеждането на редица иновации, които предизвикаха революционни изменения в процесите за контрол без разрушаване на несъвършенства с радиационните методи. В последните няколко години все по-често използвана е дигиталната радиография,

работеща не с технически филм, а с детектори, подходящи за цифровизация на аналоговите сигнали.

Дигитални методи за радиография

Създаването на изображение при дигиталната радиография е подобно на изображението получавано с конвенционалната радиография. Степента на прозрачност (оптическата плътност) на радиограмата от филмовата радиография при дигиталната радиография се възприема като нюанси на сив цвят в черно-бяло изображение, т.е. физическото възприятие е еднакво. По отношение на контрастна чувствителност и разделителна способност, качеството постигнато с финозърнести сребърни филми все още не е достигнато. Сред предимствата на дигиталната радиография са по-малки експозиции, по-малки разходи за консумативи, условия за архивиране на изображението.

При дигиталната радиография аналоговият сигнал, който може да бъде рентгеново и гама лъчение, или преобразувано светлинно лъчение, се измерва по точки чрез сканиране и се цифровизира в много дискретни нива на "сивия цвят". При 16 бита и 50 микрона резолюция на скенера могат да се получат приблизително 65 000 нива на сивия цвят. Изображението се формира от милиони точки (пиксели) със съответните нива на сивия цвят. Контрастната чувствителност зависи от дискретизацията (броя на битовете), а разделителната способност – от размерите и броя на пикселите. Преобразуването на аналоговите сигнали в цифрови е или в самия детектор или в преобразувателни устройства (конвертори). Използването на цифрово преобразувателното устройство спомага за създаването на подходящи условия за съхранение и архивиране и за подобряване на изображението върху компютърния дисплей.

Дигитална радиография с детектори твърди плоски панели

При дигиталната радиография с детектори твърди плоски панели, изображението се създава в почти реално време, подобно на дигиталните фотокамери. Експонацията и формирането на изображението се случват едновременно. Използват се същите детектори, каквито се прилагат и в съвременните радиоскопични системи. При тези

детектори границата между радиографичното и радиоскопично изображение се размива. Твърдите плоски панели се използват многократно. Техният експлоатационен живот зависи от дозовото натоварване - например познати са такива, на които се дава пролъчена доза 500 Sv. Температурният диапазон, в който работят, е предимно +10 °C до +35 °C. Налице са и отделни разработки, които позволяват работа при температура до -20 °C. Детектирането може да бъде пряко или непряко, като по този признак детекторите се класифицират в два типа. При прякото детектиране енергията на рентгеновото лъчение директно се преобразува чрез полупроводников материал (аморфни метали, металоокисни полупроводници и др.) в цифрови сигнали. При непрякото детектиране има междинно преобразуване на лъчението от сцинтилатор (CsJ) в светлина и последващо цифровизиране на светлинните сигнали от фотодиодна система. Според геометричната характеристика детекторите се разделят на линейни и двумерни. Използването на линейните детектори е свързано с наличие на механично устройство, което да осигурява относително движение между обекта, от една страна, и източника на лъчение и детектора от друга страна. Сред основните им приложения са устройствата за проверка на багажа в аерогарите. Получаваните линейни сигнали се преобразуват чрез компютър в двумерни изображения. При двумерните детектори не е необходимо относително движение на обекта и сканиране. Използваните в тях материали най-често са металоокисни полупроводници и фотодиодни системи в комбинация със сцинтилатори.

Компютърна радиография

Компютърната радиография се счита за подходяща алтернативна на филмовата радиография. Детекторът е слой от финозърнест фосфор, нанесен на полугъвкава основа – плака. Подобно на филмовата радиография, изображението не се създава директно, а чрез междинна фаза – скрито (латентно) изображение. Скритото изображение се създава в резултат на йонизиращото действие на преминаващото през контролирания обект рентгеново или гама лъчение. Подобно на филмовата радиография втората фаза от процеса е позната като проявяване. Препоръчително е проявяването на експонираната плака да е в рамките на няколко дни след експонацията, в противен случай част от

информацията се губи. При внимателна употреба плаките могат да се използват хиляди пъти (има случаи до 8000 пъти). По време на експонацията те се поставят в касети, чиято функция е същата както при филмовата радиография. За отбелязване е, че детекторите за тази технология са по-чувствителни към разсеяното лъчение в сравнение с филмите. Като предимства на компютърната радиография могат да се посочат бързото получаване на изображение, изключва се "мокра" фотообработка, не е необходимо използването на негативоскопи, намалено облъчване на персонала, голям обхват от дебелини, цифрова обработка на изображението и други.

Компютърна томография (CR)

Компютърната томография е метод, при който в условията на относително движение между обекта, от една страна, и източника на лъчение и детектора (или детекторите), от друга страна, обектът се пролъчва по сечения с определена стъпка. Пролъчването се извършва с тесен насочен сноп рентгеново или гама лъчение, като оптимални резултати се получават с микрофокусна рентгенова тръба. При безразрушителният контрол по-често срещано, в сравнение с медицината където пациентът е неподвижен, е сканирането на въртящ се обект по сечения с различна стъпка например 2° от 360° . Съответно при по-голям брой стъпки се повишава качеството на получената информация. Като детектори се използват както твърди, така и плоски панели. Детекторите регистрират интензитета на преминалото през обекта лъчение във всяко едно сечение и предават съответните цифрови сигнали на компютър, който преобразува големия брой двумерни изображения в тримерно. Разделителната способност зависи от размерите на пикселите на детектора и от размера на фокусното петно на източника на лъчение. Възможно е откриване на несъвършенства с размери до 25 микрона.

Рентгенографията (РГ) включва проникване на обекта с електромагнитно излъчване с къса дължина на вълната. Размерът на радиацията, която преминава през обектът е уловен от детектор. Абсорбцията е функция на плътност и дебелина на материала. Кухини и прекъсвания в материала водят до откриваема промяна в абсорбцията.

Радиографията като цяло е техника за изследване, която може да бъде свързана с високи разходи, за закупуване на нужното оборудване, както и за наемане на обучени специалисти за работа с оборудването и разчитане на резултатите. Обекти за изследване с голяма дебелина консумират значително количество време и енергия, което води до високи разходи.

1.4. Цел и задачи на дисертационния труд

Цел на дисертационния труд е чрез съвременни информационно-комуникационни технологии (ИКТ) и уникална научно-изследователска инфраструктура да се предложат иновативни методи и подходи за изследване на състава и вътрешната структура, локализиране и идентифициране на дефекти в материали и изделия, както и за безразрушителен контрол на качеството.

За изпълнение на целта ще се решат следните задачи:

Обзор, анализ и систематизация на методи и средства за безразрушителен контрол.

Разработка на алгоритми за томографски компютърни изследвания

Разработка на подход за оценка на ефективността на метода

Разработка на алгоритми за откриване на дефекти в композитни материали

Експериментални безразрушителни изследвания на различни материали

ГЛАВА 2. ИНОВАТИВНИ МЕТОДИ ЗА БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН КОНТРОЛ

2.1. Компютърна томография

Компютърната томография е иновативен метод за визуализиране на изображения, получени от безразрушително изследване на материали. Радиографското изследване разчита на използването на рентгенови лъчи, за да проникне в материята и създава образа на вътрешната структура на обекта. Разпределението на плътностите в структурата ще доведе до различна изходна стойност на рентгенографския образ. Компютърното томографско (СТ) сканиране е изпълнение на рентгеново устройство, което произвежда триизмерно изображение. За промишлени СТ сканирания, това изображение се създава чрез поставяне на обект върху въртяща се маса и създаване на редица двуизмерни рентгенови изображения, представляващи поглед от различни ъгли на материала. Тези срезове могат да бъдат комбинирани, за да образуват триизмерно представяне на обекта. В зависимост от плътността на материала, рентгеновите фотони ще бъдат или абсорбирани, разпръснати, или ще преминат безпрепятствено. Фотоните се събират от детектор; областите, през които са преминали повече фотони безпрепятствено, ще имат по-висока изходна плътност на събраните фотони. Това означава, че в материала има празнини или джобове въздух. Появата на по-тъмна област на изображението е при по-голям брой преминали фотони, по-тъмният пиксел се представя с по-ниска стойност в

сивата скала, което означава, че площите с деламации се очаква да имат по-ниски стойности от околните части на изображението.

Рентгеновото излъчване е широко използвано за изображения, голямата му дълбочина на проникване прави методът идеален за неразрушаващата визуализация на вътрешната структура и/или недостатъци на материали, които не могат да се постигнат по друг начин. Понастоящем използваните инструменти за неразрушаваща оценка - рентгенография и томография, са базирани на абсорбция и работят добре при тежки елементи, където плътността или вариациите на състава, дължащи се на вътрешната структура или дефектите, са достатъчно високи, за да доведат до значителен абсорбционен контраст. Въпреки това, в много случаи, когато материалите са леки и/или композитни, които имат подобни масови абсорбционни коефициенти, конвенционалните рентгенови методи, базирани на абсорбция, стават по-малко полезни. Всъщност изискванията за лекота и ултрависока якост за най-модерните материали, представляват голямо предизвикателство пред стандартните NDE (БК) инструменти, тъй като абсорбционният контраст, произтичащ от вътрешната структура на тези материали често е твърде слаб, за да бъде използван. Съществуват методите за изобразяване въз основа на абсорбция и фазово контрастно изображение.

Композитите са материали, които се състоят от повече от един основен материал, като отделните материали запазват собствената си структура и свойства вместо да образуват комбинирана сплав. Това позволява да се комбинират предимствата на компонентните материали. Различните видове материали показват значително различаващи се свойства при изследване със СТ изображения. Някои материали, които не са композитни, като неръждаемата стомана, са относително униформени в текстурата, с аномалии, които са представяни от ясно различаващи се области в различни стойности в сивата скала от основния материал. Например, един чест проблем, който възниква при неръждаема стомана, е образуването на въздушни мехурчета по време на процеса на заваряване, който води до сферична порьозност в материала. На компютърно сканиране тези кухини

се появяват като много тъмни кръгове с добре дефинирани граници, обвити в много по-лекия заобикалящ материал.

2.1.1. Индустриално значение и видове индустриални СТ системи

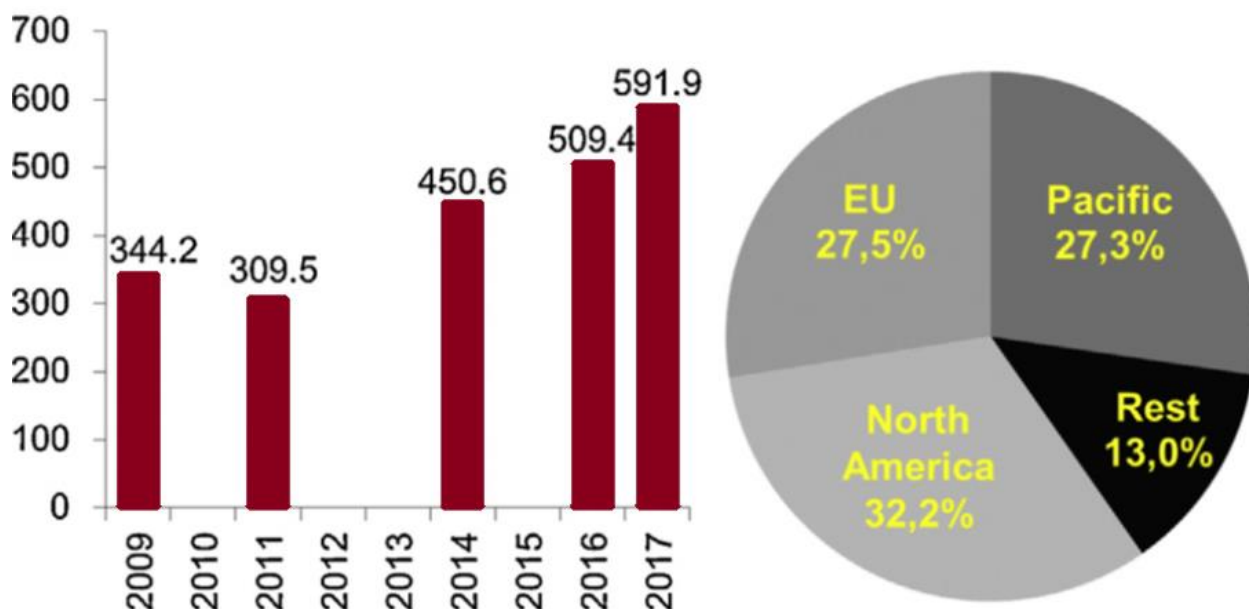
Тук се дава общ преглед на големите и нарастващи брой индустриални приложения на рентгеновата компютърна томография (СТ) в преработващата промишленост, както и в други отрасли, които нарастват на брой. Рентгеновата изчислителна томография, понякога съкратена на ХСТ или iCT (i за индустриален), е метод за използване на рентгеново лъчение за изграждане на двумерни (2D) изображения на обект в много позиции около оста на въртене. От тези изображения, използвайки софтуер, може да бъде изграден триизмерен (3D) модел на външния обект на обекта, да се реконструира и да бъде анализирана вътрешната структура. Първият СТ скенер е построен за медицински изображения с носител на Нобелова награда Hounsfield през 1969 г. От 1980 г. насам СТ става популярен метод за материалния анализ и неразрушителните тестове (NDT) и откриване на дефекти в материала. Съвсем наскоро, през 2005 г., СТ технологията влиза в областта на приложението на измервателната метрология, като алтернатива на тактилното или оптичното 3D координатно измерване на системи. СТ е подобно на магнитно-резонансното изобразяване (MRI), но където MRI използва неонизираща радиочестотна радиация за определяне на магнитния резонанс на водородните молекули, СТ използва йонизираща радиация и измерва абсорбцията на рентгеновите лъчи. Следователно двете техники имат различни области на приложение. СТ е полезен инструмент за изследване на материали с високо атомно число, докато MRI е изключително полезен метод при изследването на меки биологични тъкани. Други техники за 3D изображения, използващи неутронни източници, понастоящем са разработени за меки материали и известно припокриване по отношение на методологията и приложенията. Типични области на използване на СТ в промишлеността са в откриването на недостатъци като пукнатини и пукнатини и анализ на частиците в материалите. В метрологията, СТ позволява измерване както на външните, така и на вътрешна геометрия на сложните части. Досега СТ е единствената технология, способна

да измерва както вътрешната, така и външната геометрия на компонент, без да е необходимо неговото разрушение или раздробяване.

Като такава, това е единствената технология за промишлен контрол на качеството на обработвани детайли, които имат недостъпни вътрешни характеристики (например компоненти, произведен чрез производството на добавки) или мулти-материални компоненти (например двукомпонентни пластмасови части с впръскване чрез впръскване или пластмасови части с метални вложки). СТ може да се счита за трето революционно развитие в координатната метрология, следвайки въвеждане на тактилни 3D координатно- измервателни машини (CMM) през седемдесетте години, и тази на оптичните триизмерни скенери през осемдесетте години. Броят на индустриалните приложения на СТ е голям и бързо расте. Тук се прави кратък преглед за състоянието на приложението на метода в индустрията.

След разработването на първия СТ (наречен EMI сканиране) за целите на хуманната медицина в началото на седемдесетте години на миналия век от научен клон на британската EMI, приложението му расте бързо. Технологията се подобрява значително и броят на внедрените системи се увеличи. Приложението в индустрията като метод за безразрушителен контрол (NDT) за проверка на технически обекти за пори и вътрешни дефекти е открито през през осемдесетте години, но има малък принос. Недостатък при конвенционалните 2D рентгенови системи е филмът, който може да бъде преодолян от високо напредналите цифрови системи 2D рентгенови панели за откриване и компютърна оценка. Използването при изследване на 2D дефекти (недостатъци), и проверка за пълнота в електронно производство, например при печатни електронни платки (PCBs), както и технология за повърхностен монтаж (SMT), на следващ етап води до значително увеличаване на приложението на СТ системи. Прилагането на СТ за триизмерни измервания е изследвано, но се проваля често поради липса на точност. Проблемът с 3D точността и проследимостта е преодолян с настойчиво решение, прилагайки конвенционална 3D координатна измервателна система за калибриране и проследимост, и нов метод за извършване и оценка на измерванията с добра точност.

Първата координатна измервателна машина с устройството за рентгенови лъчи, разработено от Werth Messtechnik, е представена на пазара по време на международния панаир "Контрол" (Щутгарт, Германия) през 2005 г. Бързо и точно (в диапазона от микрони) холистични измервания на целия детайл с няколко стотици отклонения (дори вътре в кухи детайли) сега са възможни. В днешно време прилагането на СТ в промишлеността обхваща контрол на качеството, с основна цел за измерване на размерите и откриване на дефекти. Днес цифровите рентгенови системи са често срещани в медицинските приложения, но индустриалните цифрови рентгенови системи за проверка все още са зараждащ се пазар. Развитието на СТ в медицината може да бъде разглеждано като прекурсор за рентгенови системи в индустриалния пазар. Независимо от това, нуждите и изискванията в промишлеността за СТ метрологията са доста различни от тези в медицинските области (главно точност и проследяемост). Фигура 3 показва, че пазарът за промишлени цифрови рентгенови инспекционни системи е оценен от компанията Frost&Sullivan (2016) през 2009 г. за 344,2 милиона щатски долара, за 2011 година - 309,5 милиона. Прогнозата за 2014 г. е 450,6 милиона щатски долара, а за 2016 г. е 509,4 милиона щатски долара.



Фиг. 5: Пазарни данни. Тенденция за годишните приходи от индустриални системи за тестване и контрол и глобално разпространение на инсталирани СТ системи. Източник: Sun и сътр. (2012) и Фрост & Съливан (2016).

Прогнозата на Фрост & Съливан за пазара на промишлени рентгенови системи за тестване през 2017 г. възлиза на 591.9 млн. долара. Комбинираният коефициент на годишен ръст (CAGR) от 2009 г. до 2017 г. е около 7%, което е значително по-високо от CAGR като цяло. Глобалното географско разпределение на инсталираните системи през 2007 е показано на фигура 3. Повечето инсталации са в Северна Америка, Европа и Япония. Бъдещото развитие на пазара ще се наблюдава главно в Индия и Китай, както и в Русия, Бразилия и Южна Африка (държави BRIC). Тенденциите на пазара за промишлени СТ могат да се видят от две гледни точки: приложенията в съществуващи клонове се разширяват поради нови изисквания във водещите в технологиите области като космическата, автомобилната и транспортната индустрия. В производството общата производителност и ефикасността на производствените процеси трябва да се подобри. Икономика на производствените процеси могат да бъдат подобрени чрез заместване на конвенционалните машините за измерване на координати (CMM) от СТ системи. Ново по-всеобхватни и по-гъвкави решения ще подпомогнат увеличаването на пазара с такива приложения. В електрониката и микроелектрониката има подобрения за изчерпателността на проверките. Иновационните системи в близък период от време ще могат да проверяват пълнотата на окомплектовката на устройства, на схеми и - с подходящи системи - и на всяка точка на запояване, дори на нови устройства със скрити точки на запояване като мрежи от решетъчни топки (BGA). Значително висок брой системите за компютърна томография ще са необходими, за да осигурят търсенето на адаптивни решения. Могат да бъдат идентифицирани нови пазари. Нарастващ нов голям пазар е хранителната промишленост. Интегрирането на СТ в опаковъчните линии може да се провери съдържанието на вакуумно - запечатани опаковки, кутии или консервирани буркани малко преди доставката. Включването на замърсители като стъкло, метал, камък и други могат да бъдат открити. Освен това, в предприятията за месопреработка и преработката на месо, всяко парче месо може да бъде тествано за съдържанието на скрита мазнина и костите и

цената може да бъде изчислена съответно. Има приложение при откриването на експлозивни и други опасни материали, не само при летищата и корабните терминали, но и за железопътни гари, обществени сгради, като съдебни сгради, училища и други привлекателни туристически забележителности, както и фабрики.

При нови материали като метална пяна и CFRP (подсилена с въглеродни влакна пластмаса) и други композитни материали, СТ ще позволи нови технически решения. Процедури за тестване на тези материали, както и за тестване на компонентите трябва да следват технологията, което води до значителен пазарен дял на промишлени СТ системи.

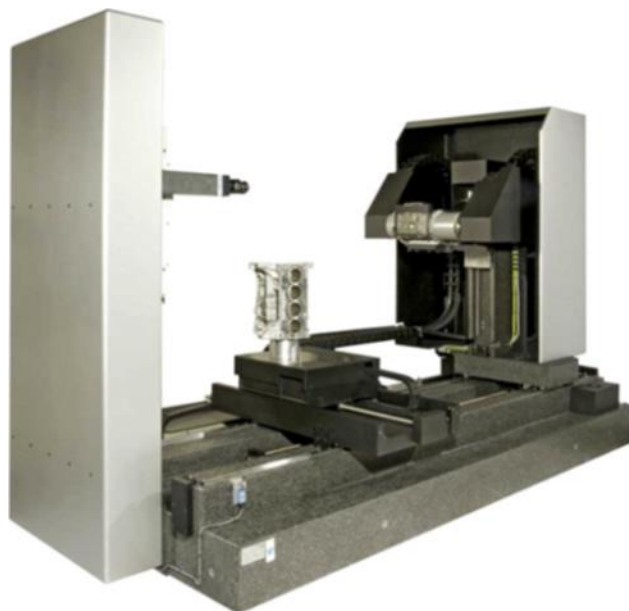
Съществуват множество индустриални СТ системи.

В медицината, при клиничните томографи, рентгеновата единица (която носи източник и детектор) непрекъснато се върти около обекта или пациента (който остава неподвижен или бавно се пренася хоризонтално по оста на въртящото се устройство) за получаване на томографски изображения, представляващи резени на сканираното тяло. През повече от четири десетилетия медицински приложения, няколко поколения клинични СТ скенери са разработени, осигуряващи непрекъснато увеличаване на производителността (Hsieh, 2009).

При СТ системи за анализ на материали и други промишлени приложения без нужда от разрушаване на обекта на изследване, са фундаментално различни от клинични скенери. В тези системи обектът се завърта под рентгенов лъч, докато рентгеновият източник и детекторът остават стационарни. Тук няма такива ограничения за интензитета на лъчение и той е по-голям от този, прилаган при клиничните СТ. Освен това, защото изискванията за резолюция и точност са различни, параметрите за сканиране обикновено се различават значително от тези при клиничните СТ (Kalender, 2011; Kastner, 2012). Разделителната способност и точността могат да бъдат коригирани с придвижване на оста на въртене, поддържаща обекта или по-близо източника (по-голямо увеличение на изображението и резолюция на пикселите, но повече размиване) или по-близо до детектора (по-ясни изображения, но по-малка резолюция) (Kruth, 2011). Това обикновено не е възможно при

клиничните скенери, където оста на въртене е центрирана между източник и детектор. За разлика от клиничните скенери, при повечето СТ системи за материален анализ с индустриална употреба се прилагат геометрия на конусовидна гредка и детектори с плосък панел, при което се получава стократно намаление на времето за сканиране (няколко визуални разреза, измерени с едно завъртане) и добро качество на изображението (Goebbels&Zscherpel, 2011). Системи с геометрия на излъчвателния вентилатор и линейни детектори също се използват, особено за намаляване на разсейващите ефекти, когато трябва да се проникне на голяма дълбочина, използвайки тръби с високо напрежение.

СТ технологиите намират широко приложение и в димензионалната метрология. При конвенционалната метрология (например измерване на тактилната координатна) измерването трябва да бъде планирано, като се вземе предвид всяка функция. СТ въвежда промяна на парадигмата към цялостното измерване на детайли. Тъй като измерванията на размерите се извършват с виртуален модел, събирането на данни (СТ сканиране) и оценката може да бъде направена по различно време и различно място. При приложения за измерване на размерите, се обръща особено внимание на точността и проследимостта на резултатите от измерванията (Kruth и сътр., 2011). За да се подобри точността на СТ измерванията, измервателни системите за СТ са проектирани, включващи принципи и технологии от машините за измерване на координати (СММ). Например могат да се конструират метрологични СТ машини използвайки механизми с висока точност и термично стабилни структури. СТ може да се използва в мултисензорни СММ, разширявайки гъвкавостта и приложимостта (Christoph и Neumann, 2007). Фигура 6 показва пример на многосензорен СММ, включително СТ сензор, тактилен сонда и стабилна гранитна основа.



Фиг. 6: Пример на метрологична СТ система с източник на лъчение с точно охлаждане и термично контролиран шкаф.

За да се автоматизира товаренето и разтоварването на обработвания детайл за сканиране, СТ системи могат да бъдат интегрирани с роботи. Фигура 7 показва пример за СТ управляван от робот.



Фиг. 7: Компютърна система интегрирана в производствената линия посредством автоматизирано натоварване (Carl Zeiss IMT)

Специфични СТ устройства могат да бъдат прикрепени към електронен микроскоп (SEM), позволяващ 3D изобразяване на малки проби с разделителна способност до 500 nm, без да се компрометира нормалната способност за изображения на SEM (например Bruker SkyScan). Тези устройства използват рентгеновото излъчване, което се отразява обратно от метален обект, подложен на електронен лъч в SEM. След това рентгеновото излъчване се придобива чрез а специална камера, монтирана на страничния прозорец на SEM камерата за образци (Фигура 8). Обектът се върти в рентгеновия обхват като се използва ротационен стадий, монтиран на мястото на стандартния държател за обекта на изследване.



Фиг. 8: СТ устройство, прикрепено към стандартен сканиращ електронен микроскоп
(Bruker SkyScan)

Приложение в индустрията намират и високоразмерни СТ, като основното ограничение при сканирането на големи части е свързано с коефициента на отслабване на материала, който ограничава максимална натрупана дебелина на материала, която може да бъде пробита. За да увеличите максимума на дълбочина на проникване, се използват рентгенови тръби с високо напрежение. Търговските стандартни тръби обикновено са ограничени до 450 kV, но специални тръби до 800 kV са днес също на разположение (напр. SPS Inspection Systems). Друг важен въпрос, който трябва да се има предвид при сканирането на големи части, е нуждата от големи детектори. Като алтернатива, може да се извърши съединението на множество рентгенови проекции или множество СТ реконструкции, като се използват различни процедури (Maass и Stephan, 2012).



Фиг. 9: 7.000 кг стоманена отливка (тяло на клапана), подложена на рентгенография с помощта на 8.5 MeV линеен ускорител (Goodwill Steel Casting Foundry)

Най-често срещаните рентгенови източници използват електронни оръдия, но съществуват и други възможности за ускоряване на електроните за създаване на

рентгенови лъчи - линейни ускорители и синхротронни СТ. Линейните ускорители и особено синхротроните, въпреки че са много скъпи източници, предлагат специфични предимства по отношение на обикновените електронни пистолети. Линейните ускорители (LINAC) значително увеличават скоростта на електрони или други заредени частици, като ги подлагат на серия на осцилиращи електрически потенциали по линеен линеен диапазон. Благодарение на тяхната висока енергия, линейни ускорители могат да се използват за проникване при много дебели и / или високо абсорбиращи обекти, до метри през бетон или метал. Фигура 7 показва линеен ускорител, използван за безразрушителен контрол на големи стоманени отливки. Рентгенови лъчи могат да бъдат генерирани от синхротрони, които са специални ускорители на частици, намиращи се в големи съоръжения. Синхротронните СТ устройства се предлагат в почти всички синхротрони съоръжения. Тяхното лъчение има следните относими свойства: монохромна, висока кохерентност, висока колимация (линия на визиране), висока яркост и интензивност, ниско ниво на излъчване и широка настройка на енергията / дължина на вълната (Carmingato и сътр., 2009; Panі и сътр., 2009).

Цифрова ламинаграфия и други техники се използват, защото при СТ обектът трябва да бъде облъчен от всички ъглови посоки, а това не винаги е възможно, например в случай на ограничено достъп до изследвания обект или в случай на големи плоски предмети, поради високи абсорбиране на обекта в поне една посока. За да се преодолее този проблем, могат да се използват различни техники, като например ламинаграфия и томосинтеза (Kastner, 2012). Цифровата ламинаграфия е валидно решение за сканиране на плоски части. При тази техника изображения на равнини над и под равнината на изследвания плосък обект се изчистват от шум от реципрочното движение на рентгеновия източник и детектор, за да се покаже по-ясно конкретен слой. Източник и детекторът могат да бъдат задвижвани в кръгови орбити около една и съща ос, така че само точките в една равнина на обекта, фокална равнина, се проектират на същото място на детектора, докато точки във всички други равнини са замъглени. Резултатът от тестването е изображението на фокусната равнина, което представлява част от обекта, с наслагвани изображения на другите равнини. Това техниката може да се приложи например за

проверка на многослойни печатни платки, заваръчни шевове на големи части и космически компоненти (Gondrom & Schroepfer, 1999; Kurfiss & Streckenbach, 2012). Безжичната ламинаграфия е вариант на цифровата ламинаграфия, където се използват множество детектори, за да се избегне движението на източника и детектора. Фигура 10 показва пример за неподвижна ламинаграфия, прилагана за инспекцията на крила на самолета.



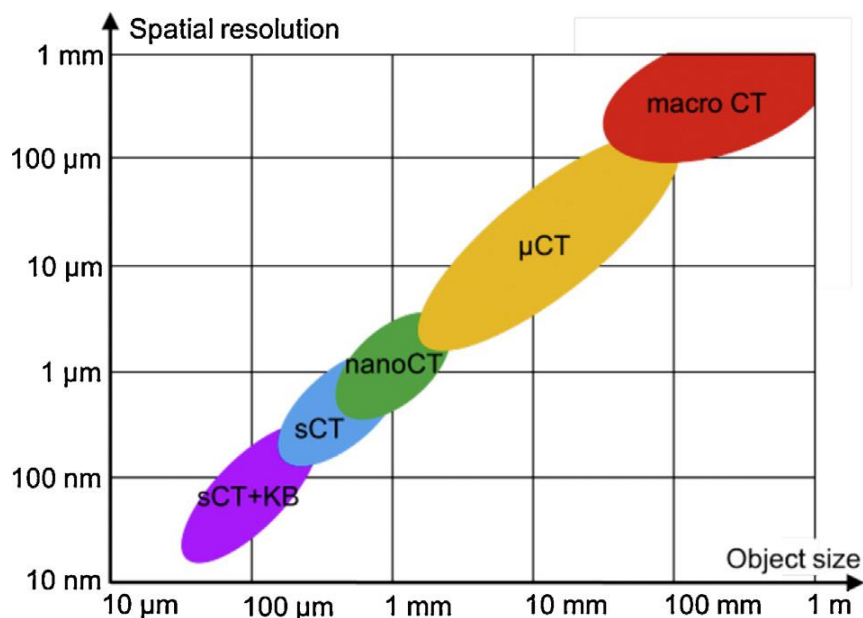
Фиг. 10: Система за ламинаграфия, която инспектира крило на самолет (Digiray Corporation)

2.1.2. Параметри на сканиране

2.1.2.1. Резолюция

Много фактори влияят върху пространствената разделителна способност на реконструкциите, включително: размер на фокусното петно на рентгеновия източник, ефективност на детектора, увеличение, брой на проекциите, алгоритми на реконструкция и обработка на данни. Размерът на фокусното място е особено важно при определянето на качеството на изображението. Системи с размер на фокусното петно по-голям от 0,1 мм обикновено се наричат конвенционални СТ или макро СТ. Системите с микрофокус

(mCT) имат големина на фокуса до един или няколко микрометра. При нано-фокусни системи (nanoCT) може да се достигне до размер под микрометър, който в момента е до 0,4 мм. Синхротронните СТ (sCT) системи може да достигнат до 0,2 мм резолюция, и с помощта на Kirkpatrick-Baez оптика (sCT + KB) в момента може да бъде достигната разделителна способност от 0.04 mm (Requena и сътр., 2009). Фигура 11 показва типични диапазони на пространствената резолюция за разглежданите томографски системи по-горе.



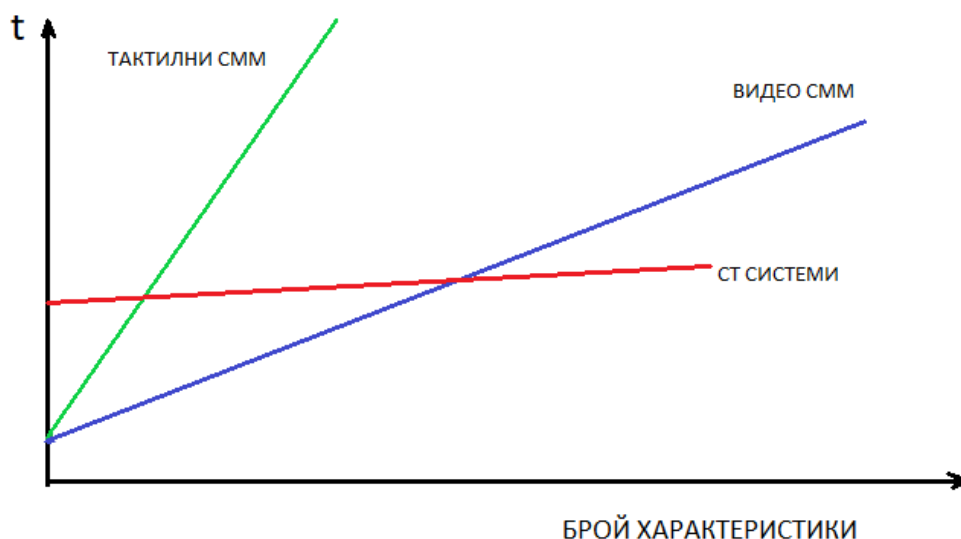
Фиг. 11: Типични пространствени разделителни способности и размери на обекта (диаметър) за макро СТ, микро СТ, нано СТ, синхротронни СТ (sCT) и синхротронни СТ с KB огледала (sCT + KB) (De Chiffre и сътр., 2014)

2.1.2.2. Скорост на сканиране

Противно на координатните измервателни машини, в СТ системите времето за сканиране е независимо от броя на характеристиките на обекта (виж фигура 10). От друга страна, времето за сканиране зависи от редица параметри, включително: времето на експозицията, броя на проекциите и ефективността на обработка на данните (Kruth и сътр., 2011). Типично време за сканиране за промишлени СТ системи с конусен лъч в момента варира от няколко минути до един или няколко часове (Christoph и сътр., 2011).

2.1.2.3. Измервателен диапазон

Съществуват много различни видове СТ системи: от настолни СТ с намален обем на измерване до СТ голям мащаб. Размерите на обекта, който може да бъде сканиран в тези системи, е ограничен от измервания обем между източника и детектор, и зависи и от: приложеното увеличение поради геометрията на конусовата греда, максималната дебелина на проникващия материал и способността на системата СТ за приложение на разширени процедури за сканиране, като например сканиране на регион, представляващ интерес, разширено сканиране на зрителното поле и спираловидно сканиране.



Фиг. 12: Скорост на сканиране спрямо броя на характеристиките, които трябва да бъдат измерени: схематично сравнение на тактилни СММ, видео СММ и СТ системи.

2.1.2.4. Максимална дълбочина на проникване

Максималната дълбочина на материала, при която рентгеновите лъчи може да проникнат, зависи от коефициентът на атенюацията (вълнова абсорбация и разпръскване) на материала и рентгеновата фотона енергия. Типични стойности за обикновените материали са дадени в таблица 5; пълни таблици и графиките са налични в литературата (Chantler, 2000; NIST) Преди да сканирате, обектът трябва да бъде ориентиран така, за да

се намали възможно най - много дебелината на материала. Оптималната ориентация на части също трябва да се сведе до минимум варирането на дълбочината на проникване по време на въртене на обекта, с цел да се избегнете наситеността или погасяването на пикселите в рентгеновите проекции (Weckenmann&Kraemer, 2009).

Интензитет на лъчи	130kV	150kV	190kV	225kV	450kV
Стомана/керамика	5mm	<8mm	<25mm	<40mm	<70mm
Алуминий	<30mm	<50mm	<90mm	<150mm	<250mm
Пластмаса	<90mm	<130mm	<200mm	<250mm	<450mm

Таб. 5: Максимална дълбочина на проникване при традиционни материали
(Christoph&Neumann, 2011)

2.1.2.5. Рентгенова доза

Докато дозата радиация на сканиране е особено важна при клинични и биологични СТ, ефектите от експозицията на рентгенови лъчи върху сканирания обект често са незначителни при индустриалните СТ методи на изследване. Въпреки това, в някои случаи дозата на рентгеновите лъчи трябва да бъде ограничена, за да се избегне разграждането на изследваните материали, например в случай на полимери (Cardoso&Kawano, 1994) и за предотвратяване на специфични ефекти, като например цветна модификации в скъпоценни камъни (Pough&Rogers, 1947).

2.1.2.6. Многофункционални възможности за сканиране

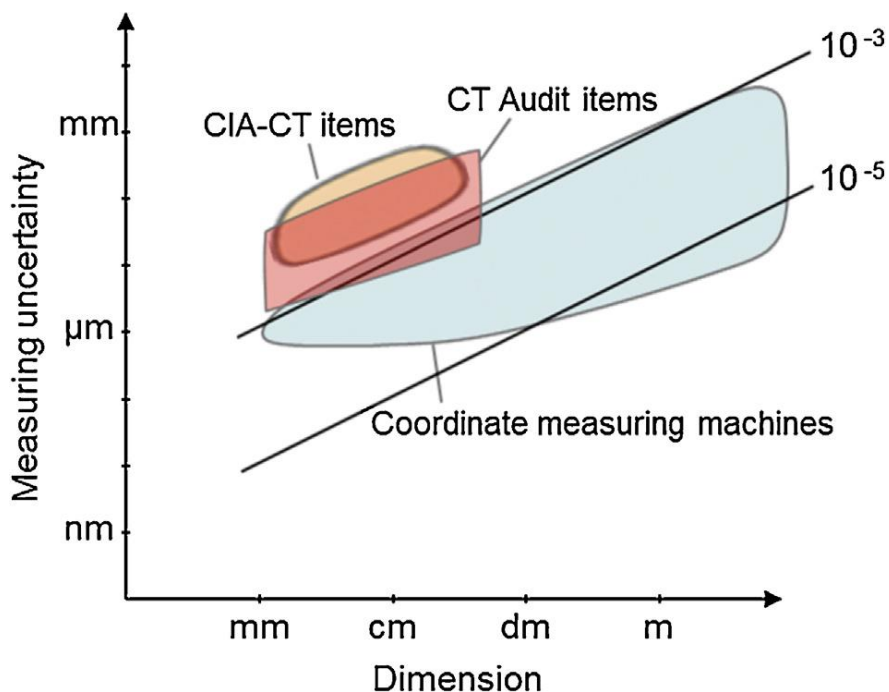
Възможността за анализиране на обекти, съставени от множество материали, е често изискване в някои индустриални приложения. СТ сканирането на такива обекти е свързано с трудности, дължащи се на различно рентгеново отслабване при различни материали и специфични изображения на артефакти (Verburg&Seco, 2012). СТ производителите предлагат различни решения, за да улеснят измерванията на обекти,

съдържащи различни материали, чрез мултиспектрално сканиране, включително: мулти-материални таргети (например различни материали на индексирема глава), СТ с двоен източник и енергийно чувствителни сандвич детектори (Fornaro&Leschka, 2011). Друг проблем, който се нуждае от особено внимание при извършването на СТ измервания на детайли с различни материали е идентифицирането на адекватни прагове за правилно определяне на повърхността. При изграждането на статистически хипотези, резултатите имат статистическа значимост, когато е много малко вероятно да са настъпили при нулева хипотеза. По-точно, нивото на значимост, дефинирано за едно проучване, α , е вероятността изследването да отхвърли нулевата хипотеза, като се има предвид, че е била вярна и p -стойността на резултата, p , е вероятността за получаване на резултат в крайните стойности, когато нулевата хипотеза е била вярна. Резултатът е статистически значим, според стандартите на проучването, когато $p < \alpha$. Сигнификантното ниво за едно изследване се избира преди събирането на данни и обикновено се определя на 5% или много по-ниско, в зависимост от областта на изследване. Нивото на значимост α е прагът за p , под който провеждащият тест приема, че нулевата хипотеза е невярна и нещо друго се случва. Това означава, че α е и вероятността от погрешно отхвърляне на нулевата хипотеза, ако нулевата хипотеза е вярна.

2.1.2.7. Точност

Както и при други системи за измерване (Carmignato и сътр., 2010; Wilhelm и сътр., 2001) неопределеността на измерването на СТ зависи от конкретния обект и специфичните параметри, избрани за процеса на измерване. Факторите, които влияят върху измерването на точността са изброени и обсъдени от Kruth и сътр., 2011. Резултатите от първото международно междулабораторно сравнение на СТ системи, използвани за измерване на размерите, през 2011 г. (Carmignato, 2012) показват, че точността на под-вокселно ниво е възможна за измервания на размери със СТ системи на артефакти. По-специално, сравнението показва, че грешки в измерването от порядъка на 1/10 от размера на воксела са достъпни за измервания на размерите, докато измерванията на формата са по-засегнати от влиянието на шума при СТ данни (Carmignato и сътр., 2012). Фигура 13

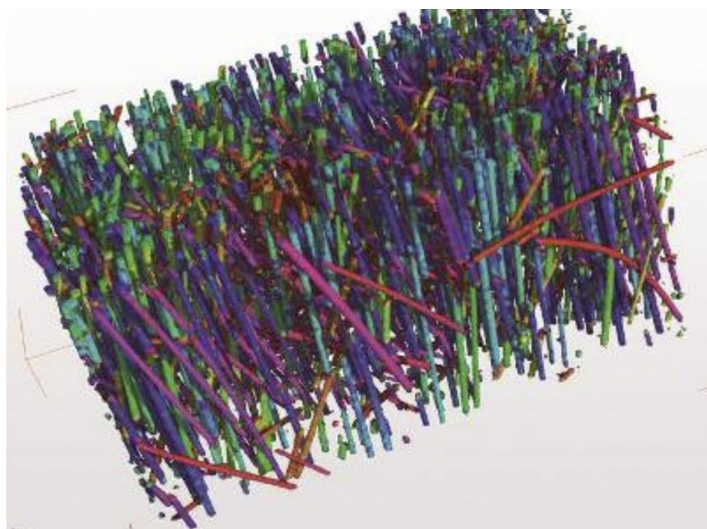
илюстрира разширената несигурност на СТ измерванията оценени от сравнения с референтни измервания получени на CMMs.



Фиг. 13: Примери за измервателна несигурност по отношение на сравняваните елементи спрямо измеренията за СТ, в сравнение с общата способност за измерване на CMM.

2.1.2.8. Софтуерни възможности

Обработката на данни играе важна роля в СТ технологиите, с нарастващите изисквания към високопроизводителните изчисления. В специфични индустриални приложения на СТ, може да се изискват специфични софтуерни възможности, особено за СТ анализ на данни. За тази цел няколко софтуерни решения вече са на разположение на пазара, позволяващи специфичен за задачите анализ на данните при СТ, включително: анализ на влакнести композитни материали (фиг.14), анализ на дебелина на стената, порьозност и анализ на включването, сравнение с номиналната CAD геометрия, координиране на метрологията и др. (Kruth и сътр., 2011). Като общо заключение относно възможностите за сканиране, таблица 6 илюстрира възможността за извършване на измервания с помощта на СТ в сравнение с тактилните и оптичните CMM.



Фиг. 14: Пример за графичен резултат на търговско софтуерно решение за анализ на СТ данни на ориентацията на влакната в съставни материали. Различните цветове съответстват на различни ориентации на влакната (Volume Graphics GmbH).

	Тактилни методи	Оптични методи	Томографски методи
Свобода при формата на обекта	•	•	•
Мекотта на материала		•	•
Микрометрия на обекта		•	Фиг. 9
Бързина на измерването		•	Фиг. 10
Вътрешност на обекта			•

Таб. 6: Сравнение между различни методи за изследване

Важна роля при анализирането на данните и подобряване на неговото качество и достоверност играят алгоритмите, използвани при обработка на получените изображения.

2.2. Алгоритми

Конвенционалните методи за тестване с компютърна томография в началното развитие са неитеративни (ациклични) алгоритми, които имат предимството да са свързани с ниски изчислителни усилия, но те не могат да се адаптират към такива включващи предварителна информация или статистика, която не е с разпределение на Гаус. Повечето от в момента съществуващите итеративни томографски алгоритми се основават на методи, които отнемат много време, защото те се конвергират много бавно, ако въобще това е възможно. Целта е да разработи набор от инструменти за реконструкция на ограничени данни от изследване с компютърна томография. За постигането на тази цел се развиват алгоритми.

Реконструкцията на данни от томографски изследвания включва решаване на обратна задача, като се получава образ, който в някакъв смисъл най-добре съответства на наблюдаваните данни. Проблемите с възстановяването на изображение от наблюдаваните данни, могат да бъдат определени по следния начин: при налични вектори на получени при изследването данни y , се реконструира обекта, представен чрез вектора x , който е произведен от тези данни. Статистическата връзка между x и y може да бъде описана като $L(y, x)$, където $L(.)$ е отрицателна вероятностна функция с натурален (Неперов) логаритъм. Функцията L се определя от физиката на обекта на изследване, геометрията на измервателната система и статистика на шума, който корумпира истинността на данните и възможността за тяхното разчитане. Решението за максимална вероятност за изчисляване на x от y е:

$$\hat{x} = \underset{x}{\operatorname{Argmin}} \{L(y, x)\} \quad (1)$$

Проблемът с това определяне на x е, че повечето обратните задачи са свързани с проблеми, в смисъл, че малки промени в y могат да доведат до големи промени в $\hat{x}$. Това

е особено вярно за реконструкции с ограничени томографски данни, където дори и в случай без шум y може да не съдържа достатъчно информация, за да се определи напълно x ; т.е. проблемът е недостатъчно определен. При тези условия, е възможно добро определяне на x , само ако са налице предварителна информация или наложени ограничения при решаването на проблема с минимизирането, показан в уравнение 1. За съжаление, обичайните неитеративни методи (например, филтрирано обратно проектиране за задача с паралелни лъчи) обикновено не могат да бъдат адаптирани така, че да могат да включват допълнителни ограничения. Всъщност, дори не е възможно да се ограничи броят на променливите в x . Това е важен въпрос, защото физическите размери на тествания обект обикновено са известни на провеждащия тестове, и премахване на променливите в x , които съответстват на региони извън известните пространствени размери на обекта намалява неизвестността и помага да се преодолее проблемът с ограничени данни.

Друг сериозен проблем с не-итеративни методи е, че за такива методи $L(y, x)$ е предсказуемостта на квадратния корен от средноквадратурните грешки (root mean squared error of prediction, RMSEP). Методът на най-малките квадрати е подходящ за обичайното допускане на шум при Гаус, но не е подходящ за ниски енергийните нива или при проблемите с емисионната томография, където е необходимо предположението, че данните са Poisson-разпределени.

При неправилно поставени проблеми $\hat{x}$ обикновено е твърде голям и придружен с много шум. Общ метод за получаване на по-добри оценки е регулизирането или санкционния вероятностен подход, който добавя Евклидовата норма и/или нормите за абсолютна стойност на $L(y, x)$. Регулирането в математика и статистика и по-специално в областта на машинното обучение и обратните задачи, е процес на въвеждане на допълнителна информация, за да се реши неправилно поставен проблем или да се предотврати прекомерното „overfitting“ (повдигане). При т.н. „overfitting“, статистическият модел описва произволна грешка или шум вместо основното съотношение. Повдигането се

получава, когато даден модел е прекалено сложен, например има твърде много параметри спрямо броя на наблюденията.

Тези ограничения санкционират големи i . Често, регуляризирането не е достатъчно, за да се получи висококачествен образ, така че всяка допълнителна предварителна информация за неизвестните параметри трябва да бъде включена. Много свойства (като енергия, абсорбция и отражение) са по същество неотрицателни и добавянето на тези ограничения като параметри често много подобрява качеството на изображението. Освен това, често има физически причини за поставянето на горни граници върху резултатите при оценката. Резултатът е горна и долна граница за всеки компонент на вектора на изображението x . Ако обозначим комплекта от x вектори, които се подчиняват на обвързаните ограничения с S , след това уравнението с модифицираната максимална вероятност е:

$$\hat{x} = \operatorname{Argmin}_{x \in S} \{L(x, y) + \mu \|x\|_1 + \gamma \|x\|_2\} \quad (2)$$

където μ и γ са параметри, които определят санкционирането на размера на x , измерено, съответно, спрямо неговата абсолютна стойностна норма и неговата Евклидова норма.

Вторият проблем е броят на променливите в уравнение 1 или 2. Дискретизираното изображение съдържа определен брой пиксела (voxels), които дават като резултат X вектор със същата дължина. Конвенционалните итеративни нелинейни алгоритми за минимизиране използват Нютон или квази-Нютон техники, които изискват запазването на приближението на обратната функция на матрицата на втората производна на $L(y, x)$ по отношение на x . Получените матрици са твърде големи и изискват голям обем памет.

В случай на проблем, без ограничаващи рестрикции, както например в уравнение 1, методите, когато броят на променливите е твърде голям за конвенционалните квази-Нютон методи, са алгоритъм на конюгиран градиент (conjugate gradient algorithm), който всъщност дава информация за втората производна без директно съхранение, както и методи на Квази-Нютон алгоритми с ограничена памет, които съхраняват нисък ранг сходимост до обратната матрица на втората частна производна. В математиката методът

на конюгиран градиент е алгоритъм за цифровото решение на определени системи от линейни уравнения, а именно тези, чиято матрица е симетрична и положителна. Методът на конюгиран градиент често се прилага като итеративен алгоритъм, приложим към системи, които са твърде големи, за да бъдат управлявани чрез директно внедряване или други директни методи като декомпозиране на Cholesky . Такива големи системи често възникват при цифрово решаване на частични диференциални уравнения или оптимизационни проблеми. Методът на конюгиран градиент може да се използва и за решаване на неограничени проблеми на оптимизацията, като например минимизиране на енергията. Разработен е предимно от Магнус Хестенес и Едуард Стифел. Различните методи на нелинейни конюгирани градиенти търсят минимални нелинейни уравнения.

За дефинирани проблеми както в уравнение 2, конвенционалните оптимизационни техники обикновено позволяват само една променлива за всяка итерация за дефиниране на рестрикция, така че за много големи обратни задачи с рестрикции, тези техники са много бавни, тъй като са свързани с твърде много усилия за намиране на граници. Следователно, алгоритмите на стандартна итеративна томография се основават на алгоритми като тези, свързани с проекцията върху конвексните криви (projections onto convex sets - POCS), включително варианти на алгебричната техника на реконструкция (ART), както и на статистичеки алгоритми като алгоритъма на очакване-максимизиране (EM).

В математиката прогнозите върху изпъкнали множества (POCS), понякога известни като променлив метод на проекция, са метод за намиране на точка в пресечната на две затворени изпъкнали тела. Това е много прост алгоритъм и е бил преоткрит многократно. Най-простият случай, когато телата са афинитетни пространства, е от John von Neumann. Една афинна трансформация, афинна карта или афинитет (от латински, *affinis*, "свързан с") е функция между афинитетни региони, при която се запазват точки, прави линии и равнини, но не непременно ъглите между линиите или разстоянията между точките, въпреки че се запазва съотношенията на разстоянията между точките, разположени по права линия. Случаят, когато комплектите са афинитетни пространства, е специален, тъй

като итерациите не само се сближават до точка в пресечната точка (ако се приеме, че пресечката не е празна), а в действителност до ортогоналната проекция на пресечната точка на първоначалния итерация. За общо затворени изпъкнали комплекти граничната точка не трябва да бъде проекцията. Класическата работа по случая на два затворени изпъкнали комплекта показва, че скоростта на конвергенция на итерациите е линейна. Има разширения, които разглеждат случаите, когато има повече от един комплект, или когато комплектите не са изпъкнали или които дават по-бързи нива на конвергенция. Анализът на POCS и свързаните с него методи се опитват да покажат, че алгоритъмът се сближава (и ако е така, намира скоростта на конвергенция) и дали той се слива с проекцията на първоначалната точка. Тези въпроси са до голяма степен известни за прости случаи, но темата е за активно изследване на разширенията. Съществуват и варианти на алгоритъма, като алгоритъма за проекция на Dykstra.

В статистиката алгоритъмът за очакване - максимизация (EM) е итеративен метод за намиране на максимална вероятност или максимална оценка на параметрите - следващ (MAP) на параметрите в статистическите модели, където моделът зависи от ненаблюдаваните латентни променливи.

Алгебричната техника за реконструкция (ART) е клас от итеративни алгоритми, използвани в компютърната томография. Те реконструират изображение от серия ъглови проекции (синограма). Гордън, Бендер и Херман (1970) показват за първи път използването му в реконструкцията на изображението, докато методът е известен като Kaczmarz метод (виж Herman, 2009) в цифровата линейна алгебра. ART може да се разглежда като итеративно решение на система от линейни уравнения. Стойностите на пикселите се считат за променливи, събрани във вектор x , а процесът на изображението е описан от матрица A . Измерените ъглови проекции се събират във вектор b . При дадена реална или комплексна $m \times n$ матрица A и реален или комплексен вектор b , методът изчислява приближението на решението на линейната система от уравнения, както в следната формула:

$$x^{k+1} = x^k + \delta_k \frac{b_i - \langle a_i, x^k \rangle}{\|a_i\|^2} a_i \quad (3)$$

където $i = k \bmod m + 1$, a_i е i редицата на матрицата A , b_i е i компонента на вектор b , а δ_k е параметър на релаксация.

Горните формули дават проста итерация. Предимството на ART спрямо други методи за възстановяване (като филтрирано обратно проектиране) е, че е относително лесно да се включат предварителните налични данни в процеса на реконструкция. ART попада в категорията на итерационните реконструкции. За повече подробности може да се види методът на Kaczmarz. Итеративната реконструкция се отнася до итеративни алгоритми, използвани за реконструкция на 2D и 3D изображения в някои техники за изображения. Например, при изчислителната томография изображението трябва да бъде възстановено от проекциите на обект. Тук техниките на итеративна реконструкция обикновено са по-добри, но изчислително по-скъпа алтернатива в сравнение с метода на филтрираната обратна проекция (FBP), който директно изчислява изображението в една стъпка на реконструкция (Herman, 2009). В последните проучвания учените са показали, че е възможно бързо пресмятане и масивен паралелизъм за итеративна реконструкция, което прави итеративната реконструкция подходяща за комерсиализация (Wang и сътр., 2016)

Разширение на конюгативния градиентен алгоритъм, който включва ограничения върху променливите е, че включва т.н. "bending linesearch". Докато методът на Newton (виж <http://reference.wolfram.com/language/tutorial/UnconstrainedOptimizationNewtonsMethodRoot.html>) избира стъпка за изчисляване на производна, но валидността на тази стъпка е само доколкото квадратният модел на Нютон за функцията действително отразява функцията, при този метод се прави разширение чрез използване на посоката на избраната стъпка, но при контролиране дължината, чрез решаване на проблема на минимизиране в едно измерение. който позволява да се постигнат множество променливи за всяка итерация за рестрикции. Освен това, както при конюгативния градиентен алгоритъм без рестрикции, тя, в действителност, натрупва информация за втора производна с всяка итерация. Подходът включва деконволюция (метод за изчисляване на

филтърните оператори (прогнозни филтри) за реконструкция на първичната рефлекторна вложка), интерпретация на петна, G 2-D паралелен лъч с ограничен изглед на рентгеновата томография, позволява реконструкции на издътки с конусовидни лъчи с произволни увеличения и ъглите извън равнината, също така е включена Евклидовата и абсолютната стойност като норма за санкциониране, което позволява добри реконструкции от много малко проекции, така че компютърното време не е от голямо значение. Увеличава се гъвкавостта на алгоритъма, за да позволи приложението му при проблеми с не-Гаусова статистика, за решаване на проблеми с други критерии от тези на най-малките квадрати. Това включва "стабилни" критерии, където, над някакъв праг, по-скоро линейен, отколкото квадратен, се използва подходящ критерий. Това прави възстановеното изображение по-малко чувствително към излишните данни в тези на проекцията. Използва се точна информация на втора производна при изчисляване на първоначална оценка на линейни изследвания, т.е. дължината на търсенето по вектора на посоката на търсене при статистика на Poisson.

Текущ анализ на СТ сканиране на материали: процесът е отнемаш време; изисква значителна експертиза по предмета; има само минимална автоматизация. Автоматизирани алгоритми ще помогнат на МСП да разработят по-добри материални композиции и структури и иновативно производство на материали с добавена стойност. Статистически алгоритмични техники са: Cross Hatch Regression, 2 Dimensional Regression, Методология за валидиране на МСП. Алгоритмична техника за машинно обучение включва Deep Learning – Convolutional Neural Networks.

Big data в безразрушителния контрол са свързани с няколко проблема по отношение на резултатите от изследванията. Събират се големи обеми данни (обикновено 2 GB и по-големи в рамките на 4 часа период), като понастоящем процедурата за преглед на данни показва данни на компютърния монитор и експерти по предмета установяват аномалии в данните. Това може да изисква изследване на хиляди изображения или дори региони на обекта, за да се установят всички аномалии. Това поражда нуждата да се разработят методологии за намаляване на количеството данни, което трябва да бъде прегледано от

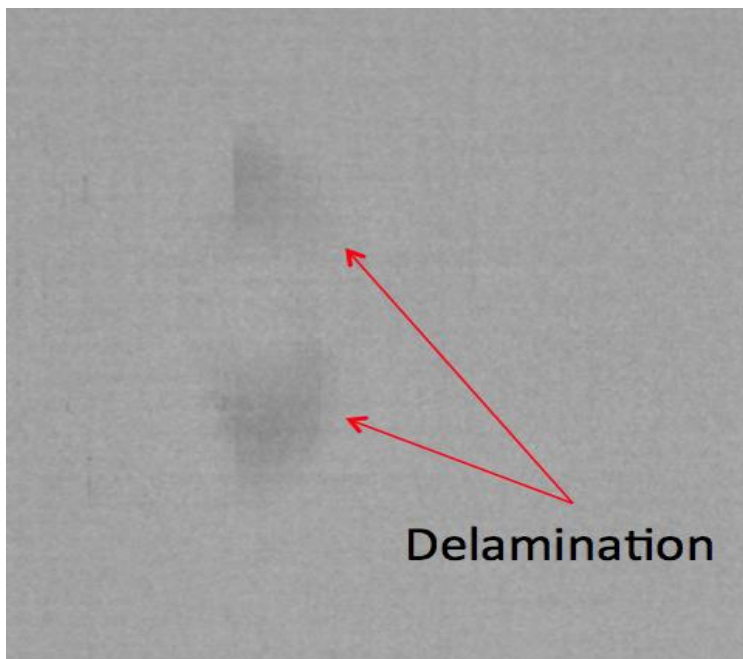
човек; определяне на фините вариации, които трудно могат да се открият от човек поради ниските съотношения сигнал/шум; идентифициране на признаци и свойства на тествания обект, които са по-лесно разпознаваеми в три измерения.

2.3. Компютърни техники за визуализиране

Разработването и тестването на нови композитни материали е важна област на научните изследвания в подкрепа на напредъка например в космическото инженерство. Разбиране на свойствата на тези материалите изисква разработване на методи на тестване на материални проби за идентифициране на недостатъци и изменения на материала. Тези процеси са свързани с инвестиране на време и усилия от страна на обучени човешките експерти, за да анализират резултатите от сканирането с компютърни томографи (СТ). Затова е нужно да се разработи автоматизирана система за идентифициране на аномалии в тези изображения, която да позволи оптимизация на процеса. Това може да се постигне на основата на регресионен алгоритъм за идентифициране на аномалии в изображения в сивата скала, като усилията са насочени главно върху приложението му за анализ на СТ изображения на въглеродно-фазови материали.

СТ изображенията, се запазват с 32-битова стойност на точността на оцветяващи точки, стойности в сивата скала представляващи интензитета на рентгеновите лъчи, които се връщат от скенера. Най - често срещаният тип увреждане на композитите е деламинация, водеща до въздушен джоб, който се появява в изображенията като тъмна зона (което означава по-висока интензивност). Това увреждане е видимо за невъоръжено око, въпреки че не винаги е очевидно и може да изисква регулиране на настройките за контраст на изображението (деламинирането е показано на фигура 15). Тъй като изображенията се отличават с много шум - отклонения, причинени от допълнителни фактори водещи до разсейване на лъчите, фантомни петна и изкривявания на изображенията и границите на петната и светлите зони, деламиниранията са неправилни по размер и с различна стойност на сивото и могат да не са с добре обособени граници. Затова традиционни техники за обработка на изображения, като детекция на ръба (edge detection), "treshholding" и "blob detection" (с два основни класа детектори: (i) диференциални методи, които се основават на деривати на функцията по отношение на

позицията и (ii) локални екстремуми, които се основават на намирането на местните максими и минимуми на функцията) не са ефективни самостоятелно като средство за идентификация на дефекти.



Фиг. 15: Близък изглед на деламинацията, присъстваща в
СТ сканиране с въглеродни влакна.

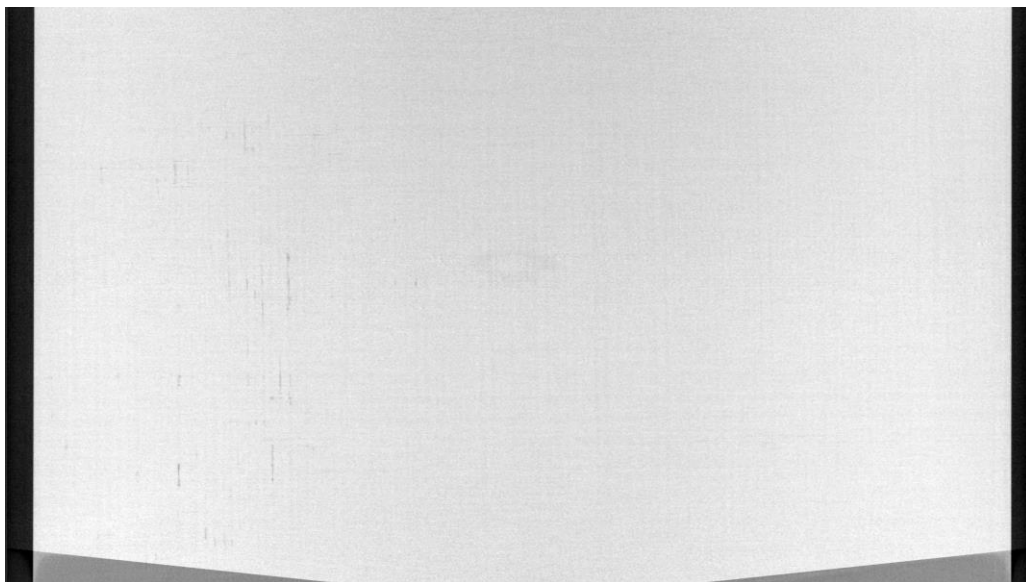
Тъй като характеристиките на разслояване не са добре дефинирани (т.е. те не са винаги със същия размер, форма или стойност на сивото), тази теза вместо това третира тяхното идентифициране като проблем, отнасящ се до откриване на аномалия. Приема се, че композитният материал следва обща тенденция, която може да бъде идентифицирана в изображението и повредените области са части от изображението, които се отклоняват от тази тенденция. Тази теза въвежда нова техника за откриване на аномалии в изображенията в сивата скала, с приложение за откриване на деламинации в СТ сканиране на материали от въглеродни фибри. Използва се регресионен подход за определяне на очакваната обща тенденция.

За идентифициране на очакваната тенденция на материала се използва регресионен подход, а стойностите на отклоненията от нея се идентифицират спрямо тази тенденция.

Техниката се базира върху многократни приложения на регресията на алгоритъм за обработка на изображението.

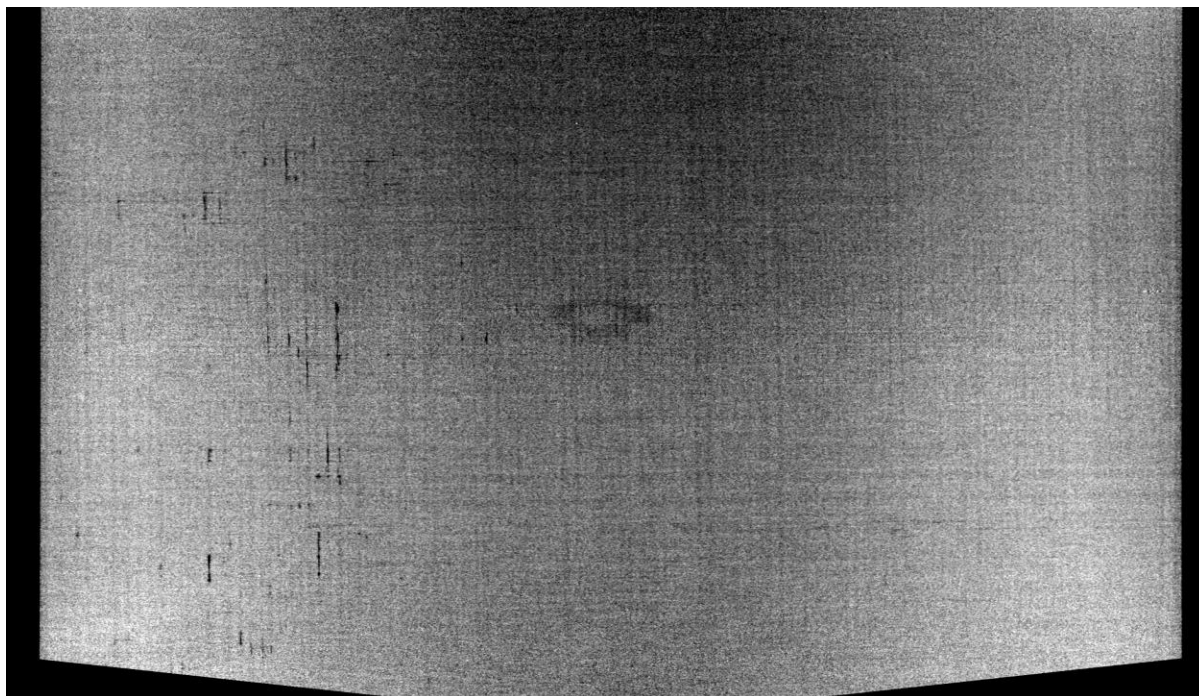
Алгоритъмът е базиран на подход, при който всяко двудимензионално изображение е разделено на поредица от едноизмерни сигнали, всеки от които представлява един ред пиксели. За всеки сигнал е включен модел с множествена линейна регресия, чрез който се установяват извънредни стойности. Техниките за изглаждане и контрол на качеството помагат за по-добра дефиниция на границите на отклонението и премахването на шума, както и множество регресионни проби се комбинират за получаването на крайния резултат. Алгоритъмът е тестван в сравнение с резултати, получени чрез други методи. Експерименталните резултати подкрепят ефективността на техниката, като откриват 92% от аномалии, характеризира формата и размера им със средна прецизност от 78%, покриваемост от 88%, средно квадратично (RMS) отклонение на стойностите от тяхната средна стойност от 11,2 пиксела, и разстояние на Хаусдорф от 50 пиксела.

Въглеродните материали от нишки, от друга страна, имат много по-малко уеднаквена структура, тъй като са композитни. Състоят се от малки нишки от въглерод, които са изтъкани в слоеве. Те се появяват при СТ сканиране като много разнообразна повърхност с множество повтарящи се елементи, като например прави линии, съответстващи на структурните елементи на материала. Често срещана аномалия, която се среща във въглеродното звено, е деламинацията, където слоевете на материала са се отделили един от друг. Това може да се случи или чрез отрязване на слой от барове от ламината, или чрез пукнатина в самата ламинатна матрица. Деламинациите се появяват като малко по-тъмни области, но не винаги лесно се отличават от материала, който ги заобикаля и нямат добре определени граници, както е показано на фигура 16.



Фиг. 16: Сканиран отрязък на карбонен фиброзен материал, ползвайки настройките за контраст по подразбиране, с елиптична деламинация до центъра на изображението, която е едва видима.

Настройването на контраста може да помогне за визуално идентифициране на повредения регион, както е показано на фигура 17. СТ скенер на един обект може да се състои от стотици или дори хиляди изображения, а в много случаи увреждането едва ли е видимо с просто око и може само да се идентифицира чрез продължително настройване на контраста. Сегментирането им ръчно е изключително трудна задача и изисква добре обучено око.



Фиг. 17: Същият разрез, показан в предишната фигура, след ръчното настройване на настройките за контраст, за да се направи деламинацията по-видима.

Опит за идентифицирането и характеризирането на дефекти в металните материали чрез анализ на СТ изображения е направен с подхода на Liao&Li (1998), където за анализиране на изображението се използва крива за всяка линия, основана на наблюдението, че заваръчните шевове имат очакваното нормално разпределение в стойностите в сивата скала за всеки x-сигнал. Wang и Liao (2002) въвеждат система за идентифициране на дефектите при заваряване, като се използва набор от техники за обработка на изображенията в комбинация с подхода на fuzzy k-nearest neighbors на Keller, Grey и Givens и MLP невронно мрежови класификатори. Алтернативен подход, използващ класификатори на невронна мрежа се разглеждат в труда на da Silva и сътр. (2004). Въпреки това, предвид сложността на композитите в сравнение с неръждаемата стомана, тези техники не са били използвани при анализ на въглеродни влакна.

ГЛАВА 3. АЛГОРИТЪМ ЗА ОТКРИВАНЕ НА ДЕФЕКТИ В КОМПОЗИТНИ МАТЕРИАЛИ

Съществуват редица начини за класифициране на проблема с откриване на дефекти посредством изображенията при материални проби. Един от тях е разглеждането на задачата като откриване на аномалия. Откриването на аномалии е добре развита област в много направление в статистиката, обаче, съществува сравнително малко литература по проблема за откриване на аномалии в изображения. Chang и Chiang (2002) обсъждат приложението на детектора на Reed&Yu's RX към хиперспектралните изображения. Islam и сътр. (2009) разглеждат проблема с идентифицирането на плавателни съдове в снимки на океана като задача за откриване на аномалия, чрез въвеждане на детектор въз основа на метода на Mahalanobis distance.

Друг потенциален начин за подход към проблема е чрез сегментиране на изображения или чрез решаване на задачата за разпознаването на обекти. Edge detection и blob detection са добре развити теми в компютърната визия, но не са доказали ефективността си за изображения при нивото на сложност, показана от СТ сканирането на въглеродни влакна. В тази обща област на компютърното визуализиране съществува широка гама литература. Сегментацията е изследвана от началото на 70-те години на миналия век, както и предишни опити за използване на техники като групиране и метода на Markov за случайните области за разделяне на изображения в региони (Szeliski, 2010, стр. 269-274). Докато тези съществуващи техники не са били използвани за откриване на аномални зони в изображенията на композитни материали, свързаната литература за сегментирането на Unnikrishnan, Pantofaru, и Hebert (2007) ще бъде полезно ръководство при оценката на успеха на подхода.

Откриването на обекти е широко използвано при откриване и разпознаване на лица, където клъстеринг, невронни мрежи, поддържащи векторни машини и стимулиране са допринесли за успешни алгоритми (Szeliski, 2010, стр. 660-663). Тези подходи обаче не са толкова ефективни при физико-базирани изображения на материали. Регресионният подход се подпомага от наличната богата литература, свързана с обработка на сигнали. Регресионните техники са използвани преди това в обработката на изображения, в

частност силни регресионни техники като теза на Szeliski (2010, стр. 234) и Meer, Rosenfeld и Kim (1991) сходни с този регресионен подход.

Техники за машинно обучение са приложени към техниките за безразрушителен контрол по метода на Lamb-вълната (Peng и сътр., 2013), както и вибрационен анализ (Feklistova и Hein, 2012), но не са успешни при анализа на СТ сканирания на въглеродни нишки.

3.1. Граници на зони на отклонения в сканирани изображения

Някои изображения, произведени от скенерите за компютърна томография, съдържат много тъмен граничен район. Тази тъмна граница предизвиква проблеми при работата с регресионни линии, тъй като линията ще трябва да се огъне рязко на всеки край, за да вземе предвид и граничните пиксели, вероятно генерирайки отрицателни стойности. Следователно е необходимо премахването на тези граници за ефективно обработване на изображението. Възможно е използването на сравнително прост процес за премахване на границата в това проучване, което може да не е генерално приложим за всички изображения, но който работи добре при тези, представени тук. Изображението е разделено на сигнали, всеки от които представлява линия пиксели в x - или y -посока. За всеки сигнал се изчислява средната стойност на сигнала. Тъй като се очаква граничните пиксели да бъдат значително по-тъмни от останалата част от изображението (в повечето изображения, наблюдавани за това изследване, средната стойност на граничните пиксели е много близка до 0, докато типичната стойност на материала е над 15), се очаква че граничните пиксели ще лежат доста под средната стойност. Освен това, приносът на граничните пиксели към средната стойност ще гарантира, че повечето пиксели в материала ще бъдат над средната такава. Започвайки от единия край на сигнала, всеки пиксел се сравнява със средния. Ако стойността му е под средната, той се премахва от изображението. Движението напред с премахване пикселите продължава до достигане на пиксел, който е с по-висока от средната стойност, в който момент се приема, че е преминато през материала. Същият процес се завършва от другата страна на сигнала.

3.2. Изглаждане на изображението

Изображенията, получени чрез СТ сканиране на композитни материали, често съдържат висока степен на шум. Съседните пиксели могат да имат значителни разлики в стойностите, въпреки че материалът би трябвало да е със сравнително хомогенни характеристики. Изглаждането или замъгляването на изображението намалява тези локални вариации и позволява по - добро разбиране на действителната локализирана тенденция в изображението.

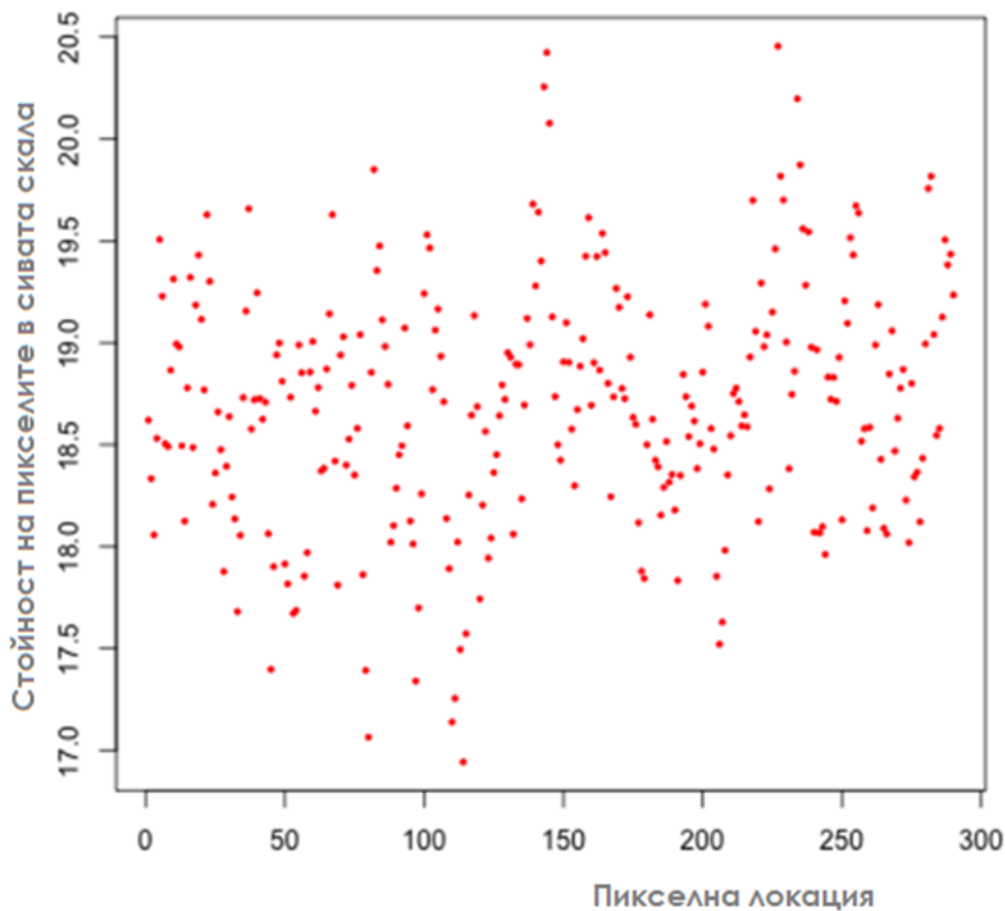
Фигура 18 показва изглед отблизо на деламинация, която показва високото ниво на локална вариация в пикселната стойност. У сигналът през центъра на изображението на Фигура 19, показва, че дори в зоните на деламинация (центриране около регион 100 и регион 200), много пиксели попадат в същия диапазон като околните райони. Изчисляването на регресионен модел за този сигнал ще доведе до това, че само няколко от пикселите в зоната на деламиниране ще бъдат идентифицирани като отклонение. Сигнал в цялата проба в същата приблизителна област, както фигура 19, е показан на фигура 20. Следва да се обърне внимание, че не е лесно да се види къде се намира деламинацията при визуална проверка на сигнала, тъй като само разпръснатите отделни пиксели се появяват като крайни стойности.

Изглаждането включва изчисляване с помощта на статистически техники, обикновено форма на средна стойност в регион с определен размер около всеки пиксел в изображението и замяната на стойностите на всеки пиксел в този район със средната за него.



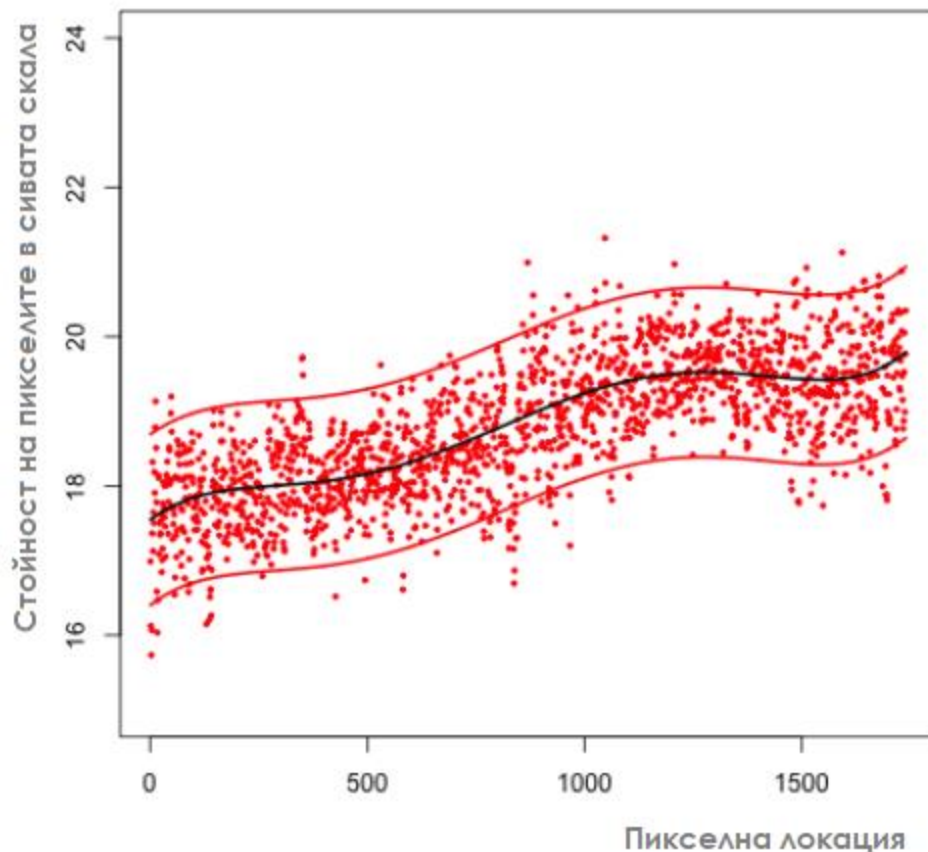
Фиг. 18: Близък поглед на деламинацията, показана на фигура 17, показваща високото ниво на локализирана вариация в пикселната стойност.

Няколко вида линии за изглаждане могат да се използват за размазване на изображения, с различни последващи свойства. Тук се предлага използването на филтър на средната стойност за изображения при БК на въглеродни нишкови материали, а не филтър с определяне стойност на медиана. Докато този филтър понякога е желателен поради неговите свойства на запазване на ръбовете в ограничени случаи (Arias-Castro и Donoho, 2009), създава проблеми за изображенията, където деламинациите са едва видими. Както може да се види на фигура 20, това често е само едно струпване от много тъмни точки, които показват наличието на деламинация, като по-голямата част от точките се отклоняват малко от тези в околния регион. Това ще отстрани влиянието на този малък регион от значително различни точки, оставяйки деламинацията неоткриваема. От друга страна, средният филтър разпространява влиянието на тези точки, така че да създава област с по-ниски от очакваните стойности на пикселите, които можем да идентифицираме.



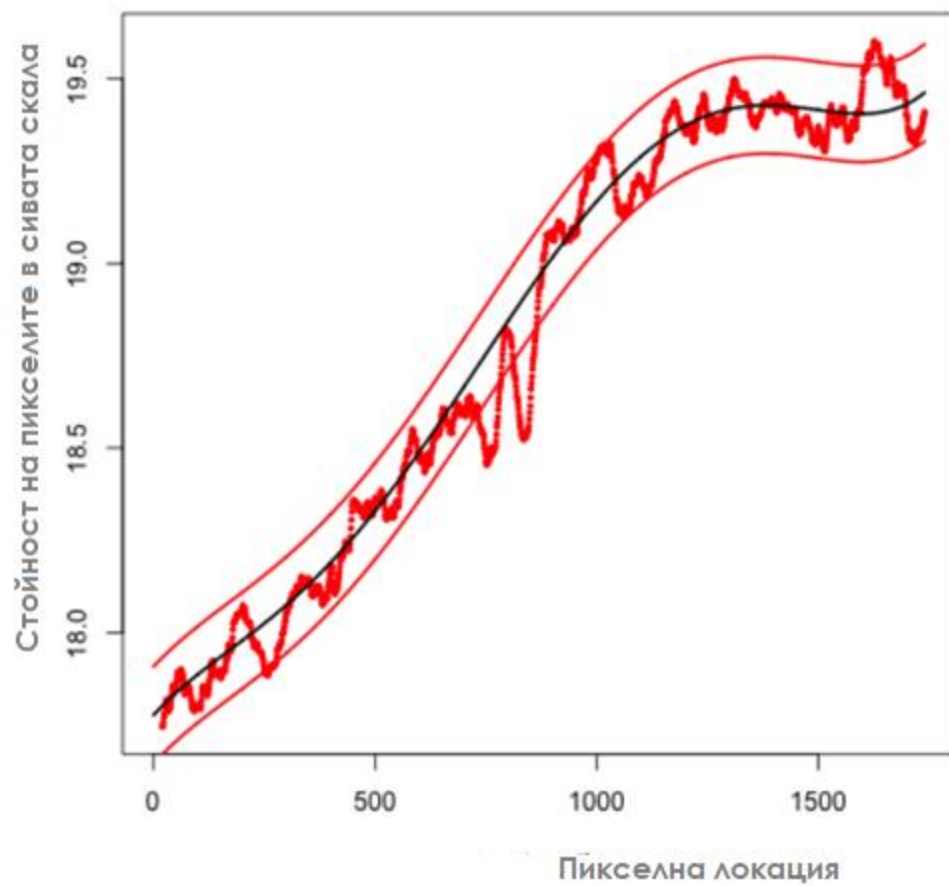
Фиг. 19: Y-сигнал през центъра на изрязаното изображение,
показано в предишната фигура

В идеалния случай бихме искали да изгладим шума на изображението без прекомерно изглаждане, тъй като изглаждането ще намали способността да се различават детайлите на изображението. С цел да се определи оптималния размер на филтъра, вариацията се изчислява за редица региони от различен размер в няколко образца от изображения, където не е имало деламинация. Както е показано на Фигура 22 и Фигура 23, вариацията се стабилизира при приблизителен размер на филтъра от 40 x 40 пиксела. Това показва, че локализираните тенденции отстъпват пред свойствата на задния фон при този размер. Фигура 24 показва същото разслояване, показано на фигура 18 след изглаждане с 41 x 41 среден филтър.

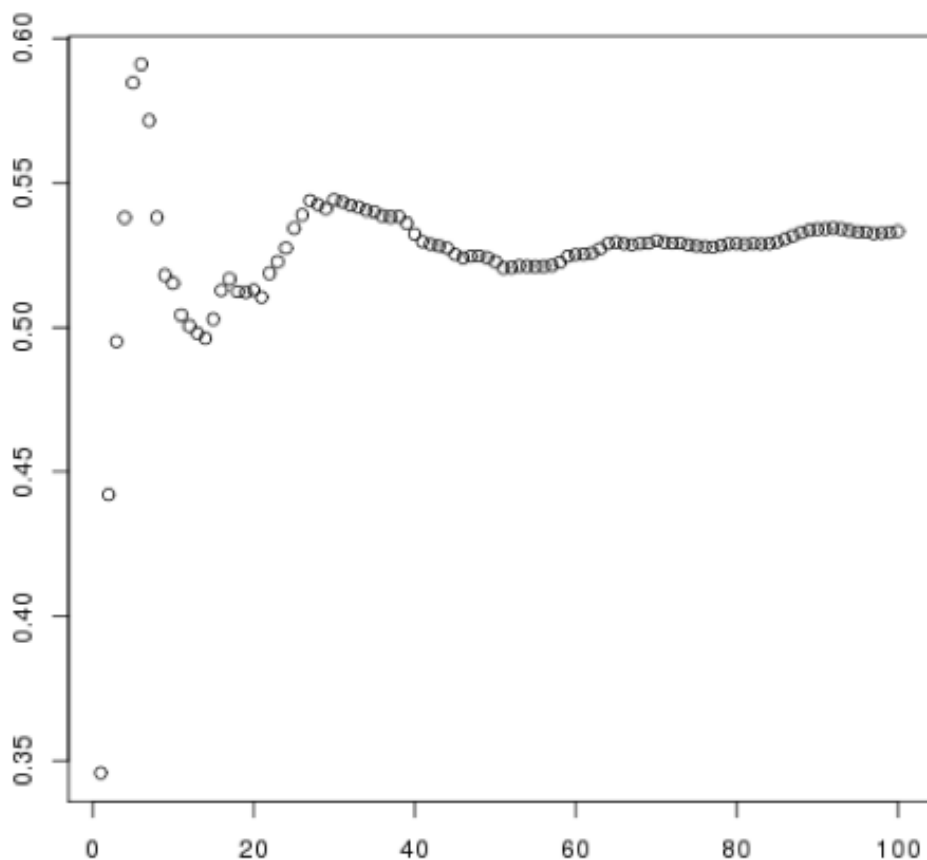


Фиг. 20: Y-сигнал през центъра на цялото изображение, съдържащо отрязъка показан в предишната програма.

Повторното тестване показва, че това е подходящ размер на изображението за тези предвидени за анализ в това проучване, така че за тази цел беше приета средна стойност на филтъра от 41 x 41 пиксела; други изображения от други СТ машини или машини с различни настройки може да изискват различен размер на филтъра. Този метод на анализ на вариацията може да бъде автоматизиран, за да се определи подходящият размер на филтъра, като се даде нов тип проба.



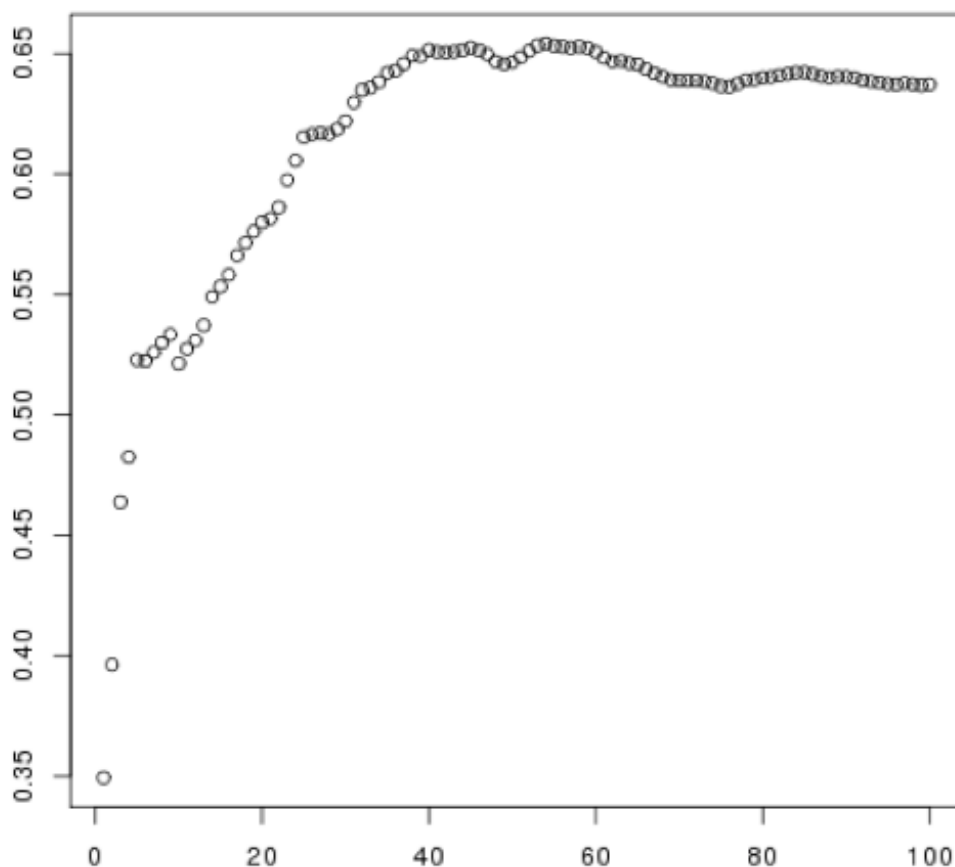
Фиг. 21: Същият сигнал, показан в предишната програма след изглаждане, с две деламинирани площи, лесно видими до локация на пикселите от 800 по оста x.



Фиг. 22: Стандартно отклонение (у-ос) на региони с различни размери (показани на оста x) на неповредена въглеродна проба.

3.3. Регресионен алгоритъм

Регресията на алгоритъма е нов подход към обработката на изображения, в който изображение е разделено на поредица от сигнали, които ще бъдат обработвани отделно. Всеки ред от пикселите в посока x (тоест от ляво на дясно) ще стане индивидуален сигнал, както ще е и всеки ред пиксели в посока y (отгоре надолу). Изображение с разделителна способност от 800 пиксела хоризонтално и 900 пиксела вертикално ще бъде разделено на 800 x-сигнали и 900 y-сигнали.



Фиг. 23: Стандартно отклонение (y-ос) на региони с различни размери (показани на x-оста) на втора неповредена въглеродна проба.

Всяка отделна линия от пиксели се подлага на регресионен модел. Изчислява се прогнозиран интервал и всички пиксели извън този интервал се считат за извънредни за този сигнал. След като всички x и y сигнали са изчислени за изображение, всеки пиксел ще се е появил два пъти, веднъж в един сигнал x и веднъж в y-сигнал. Ако пикселът е бил идентифициран като отклонение и в двата сигнала, ще означава, че е нарушена общата тенденция на изображението в двете посоки и ще се счита за аномалия в изображението като цяло.



Фиг. 24: Същото изображение, както е показано на Фигура 18, след изглаждане с 41 x 41 филтър на средната стойност.

Подходът с описаният регресионен алгоритъм позволява висока степен на чувствителност, тъй като редуцира проблема с идентифицирането на аномалиите до едно измерение. Предвижда се, че аномалиите, които са незначителни в цялостния контекст на образа, ще бъдат съществени и идентифицируеми аномалии в контекста на поне някои отделни сигнали, за да се получат извънредни стойности. Също така се избягва сложността на опита да се моделира цялото изображение едновременно, защото тогава значителното отклонение в стойността и шума в цялото изображение може затруднят откриването на сравнително малки отклонения, представени чрез деламацията. Добавянето на допълнителни посоки на сигнала (като диагонални сигнали) може да добави допълнителна информация за модела, но би довело и до сложност, поради факта, че всеки сигнал би имал различна дължина, усложнявайки задачата за избор на модел. Има възможност за включване на трето измерение чрез z-сигнали.

3.4. Множествена линейна регресия

Традиционната линейна регресия се основава на прилагането на модела на най-малките квадрати. Ако имаме някои данни, които изглежда имат обща линейна тенденция, можем да приближим тези данни с регресионен модел. Това означава, че трябва да се постави линия на модела

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x + \delta k \quad (4)$$

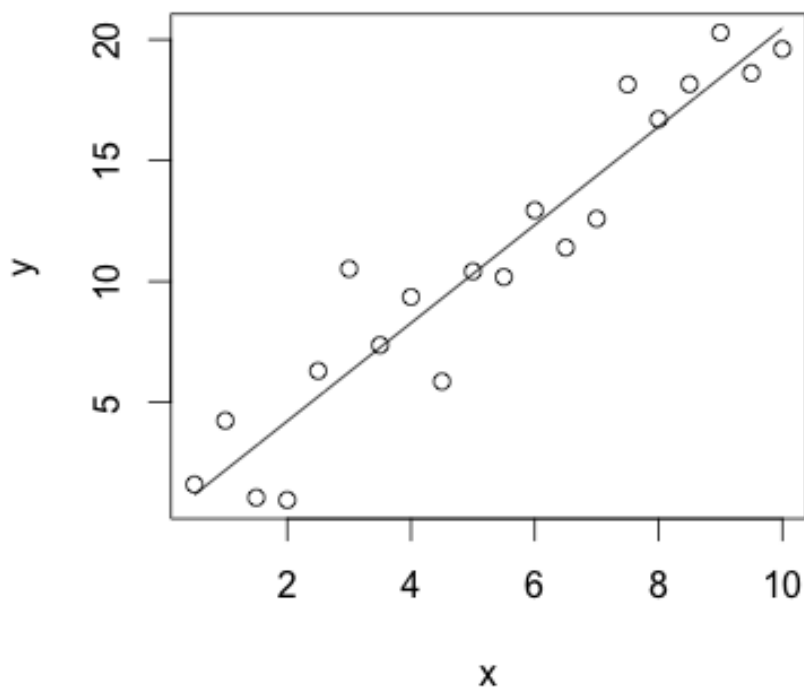
Където α_0 представлява y -пресечната точка, α_1 наклона и δ представлява количество грешка, k е коефициент според вида на изследвания материал. Целта е да изберете наклона и да пресечете, за да сведете до минимум сумата от квадратични грешки на всяка точка от данните. (J. A. Rice, 2007),

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \alpha_0 - \alpha_1 x_i)^2 \quad (5)$$

Функциите за изчисляване на тези стойности се изпълняват в библиотеките за R език за програмиране (J. Albert и M. Rizzo, 2012). Например, във фигура 25 са показани някои фиктивни точки на данни, които за човешкото око изглеждат наредени в една линия (а всъщност са създадени чрез прилагане на функцията на Гаус към точки по линията $y = 2x$). Линеен модел, използващ метода на най - малките квадрати, произвежда графиката, показана във фигурата.

От обикновена права линия това може да бъде разширено до полином t , известен като множествена линейна регресия (J. Albert и M. Rizzo, 2012):

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x^3 + \alpha_4 x^4 \quad (6)$$

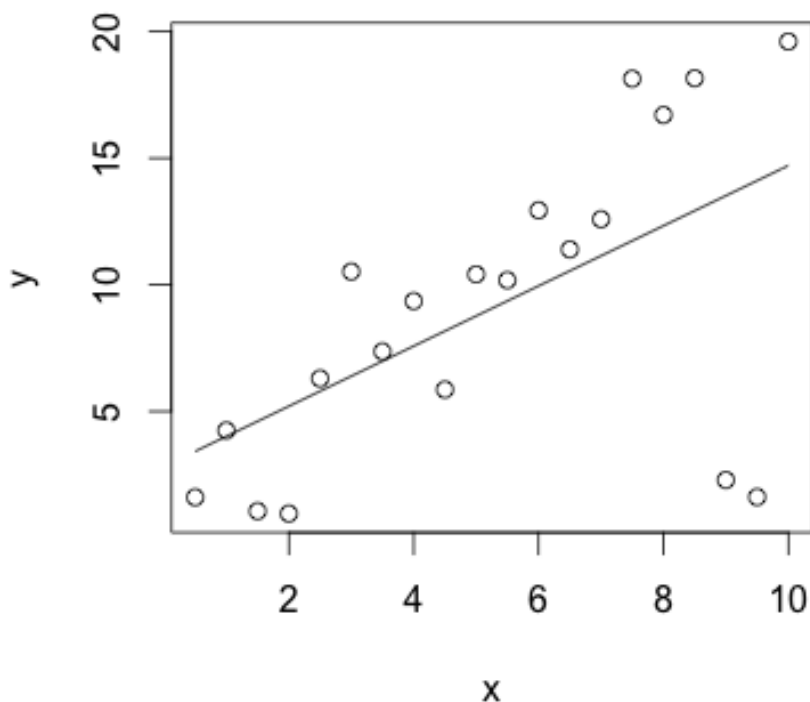


Фиг. 25: Данни за точките, които са били идентифицирани с линеен модел, използващ регресия на най-малките квадрати.

След като е изчислен регресионен модел, е възможно да се създаде прогнозен интервал около този модел, задаване на минимални и максимални стойности, в рамките на които определен процент от данните се очаква да бъде (M. H. DeGroot и M. J. Schervish, 2012, стр. 716). Основният регресионен модел, използван в това проучване, използва интервал на прогнозиране 95%.

Докато традиционната регресия на най-малките квадрати е мощен инструмент, тя е много чувствителна по отношение на крайните стойности. По-специално, тя прави предположението, че шумът в сигнала ще бъде с нормално разпределение (Alma, 2011). Това означава, че точките от данни, които се отклоняват значително от прогнозираната тенденция, могат да доведат до значителни промени в модела, изграден на база на данните (тъй като квадратните грешки, допринесени от тези точки, ще бъдат много

високи). Фигура 26 показва същите данни, както е показано по-горе, с изключение на това, че две точки от данни са преместени далеч от общата тенденция на данните. Това води до значителни промени при регресионната линия, така че тя не е толкова добро приближение за общата тенденция.



Фиг. 26: Данни за данни, които включват два значителни крайни стойности, които са били идентифицирани с линеен модел, използващ регресия на най-малките квадрати.

За да се създаде модел на общата тенденция на фона на сигнала, без голямото влияние на локализираните аномалии, методът на най-малките квадрати не е подходящ. Тъй като деламинациите вероятно ще предизвикат излишъци, които нарушават нормалното разпределение при линейна регресия, а стандартната линейна регресия не е подходящ инструмент.

Нужна е регресионна техника, за да се създаде модел, който не е силно повлиян от отдалечени точки в опашката на разпределението и не разчита на предположението, че шумът ще бъде с нормално разпределение (Alma, 2001). Има различни регресионни

методи, но по същество е нужен повтарящ се процес, при който моделът се прилага, а след това прогнозните променливи се претеглят по стойността на остатъчната грешка, за да се намали влиянието на точките, които допринасят в модела за най-значителните количества грешки. Един от начините за провеждане на това изчисление използва М-коэффициенти, което е по подразбиране метод, приложен в метода `rlm` на програмния език на R (Venables & Ripley, 2002). `Lm` функцията използва метода на най-малки квадрати Ordinary Least Squares (OLS) за намаляване на остатъците. Докато функцията `rlm` използва М - коэффициенти. OLS е много чувствителен към извънредни стойности, докато методът с М - коэффициенти не е такъв. Фигура 24 показва същите данни, както е показано на Фигура 25, този път с линейна регресия, с М-коэффициент. Така тя предлага много по-добра цялостна връзка с общата тенденция на данните.

Статистически оценки с висока прагова точка, основани на тримиране, са оценки устойчиви на определен вид нарушения на условията на избрания статистически модел. Нестрого казано прагова точка на една оценка на параметър е максималното допустимо „замърсяване“ в данните, при което статистическите оценки са робастни. Естествено е да се очаква, че прилагането на стандартни статистически методи, когато условията на модела са нарушени, може да доведе до неточни или погрешни статистически изводи. Като цяло методите на робастната статистика за моделиране и анализ на данни са насочени към построяване на устойчиви оценки на параметрите и свързаните с тях критерии и доверителни интервали не само когато данните се подчиняват на предполагаемото разпределение, но и когато това е изпълнено само частично. Праговата точка е максималната част от наблюдения на извадката, които могат да бъдат заместени с произволни стойности така, че абсолютното отклонение на оценката от оценявания параметър да не може да приема произволно големи стойности.

В дисертацията традиционната М-оценка е с ниска прагова (breakdown) точка по подразбиране, което означава, че очакваният размер на аномалията е малък спрямо общия сигнал.

3.5. Идентификация

Регресионният алгоритъм идентифицира пиксели, които достатъчно отчетливо попадат извън интервала за прогнозиране, генериран около регресионната линия. При много трудно видими разслоявания само няколко пиксела са достатъчно тъмни, за да се квалифицират като дефект. В тези области обаче често има голям брой пиксели, които падат под регресионната линия, много повече отколкото се предполага при случайно разпределение. Тъй като деламинациите изглеждат тъмни зони при изображението и тъмните пиксели имат по-ниска стойност в сивата скала, вероятно клъстерът на тези пиксели под регресионната линия също е част от деламинацията. За да се идентифицират тези области, където голям брой пиксели се отклонява леко от тенденция в същата посока, е създаден процес, заимстван от техниките за статистически контрол на качеството.

Статистическата теория за контрол на качеството използва кумулативна сума за идентифициране на области, които колективно представляват отклонение от тенденцията, дори ако няма отделни точки при данните, които да представляват крайно отклонение. Такава функция може да измери кумулативната сума от остатъчните (резидуални) стойности около сигнала. Ако резидуалните стойности са с разпределението на Гаус, кумулативната сума трябва да остане близо до нулата, но ако сигналът започне да се отклонява за значителен брой точки при данните, кумулативната сума ще нараства, представляваща отклонение от очакваното разпределение (Montgomery, 2009).

Този алгоритъм не използва подхода на кумулативната сума, а по - опростен алгоритъм, много по-интелигентен, вдъхновен от тази линия на мислене. За всеки сигнал, при които се идентифицира излишък или група съседни отрицателни стойности, се изследва също и областта около тези крайни стойности. Алгоритъмът се измества към външните пиксели за проверка и ги добавя като дефекти, ако те лежат под регресионната линия. След като се появи пиксел, който падне върху или над регресионната линия, се приема, че аномалната област е приключила и няма повече пиксели за проверка. По същество това предполага, че разслояването ще се появи като тяло в сигнала, и че ръбът на това тяло ще е над регресионната линия. Това изглежда да е сигурно предположение, особено след като

създаването на тъмните пиксели на деламинацията ще издърпа регресионната линия в областта около нея, а пикселите, съставляващи неповредения материал, ще бъдат над линията.

Показани са резултатите от тест с и без идентификация на Фигура 28 и Фигура 29, съответно. Визуалната сегментация от специалист на същия образ е показана на Фигура 27. С човешката сегментация алгоритъмът идентифицира само 54% от пикселите за деламиниране като аномални без използване на идентифициране, докато при използване на идентификация процентът на откриваемост е 93%. Сравняването на изхода на алгоритъма с резултатите от визуалната проверка от специалист може да служи като основа за груба оценка на изпълнението на алгоритъма. Докато идентификацията с използването на метода понякога ще доведе до по-голяма зона на аномалия, отколкото при проверка от човешки експерт или ще произведе фалшиви позитиви, все пак е по-добре да има прекомерна оценка на щетите, отколкото недооценени или неоткрити щети (Winfree, 2015).

3.6. Метод на агрегиране

Събирането на данни, взети с течение на времето, е някаква форма на произволна вариация. Съществуват методи за намаляване или анулирането на ефекта, дължащ се на случайни вариации. Често използваната техника в промишлеността е "изглаждане". Тази техника, когато се прилага правилно, разкрива по-ясно основната тенденция, сезонните и цикличните компоненти. Има две отделни групи изглаждащи методи: методи за осредняване и експоненциални методи за изглаждане.

Докато техниката на изглаждане, описана по - горе, позволява откриването на незначителни аномалии, това означава също, че аномалиите с добре дефинирани граници и със значително различни стойности на пикселите са замъглени в по-големи области. Когато се комбинира с контрол на качеството, това може да означава, че много малки, но тъмни области могат да произвеждат големи региони, които не представляват истинския размер на аномалията. За противодействие на това се използва подход от три части. На първо място, регресионният алгоритъм се прилага след изглаждане и с

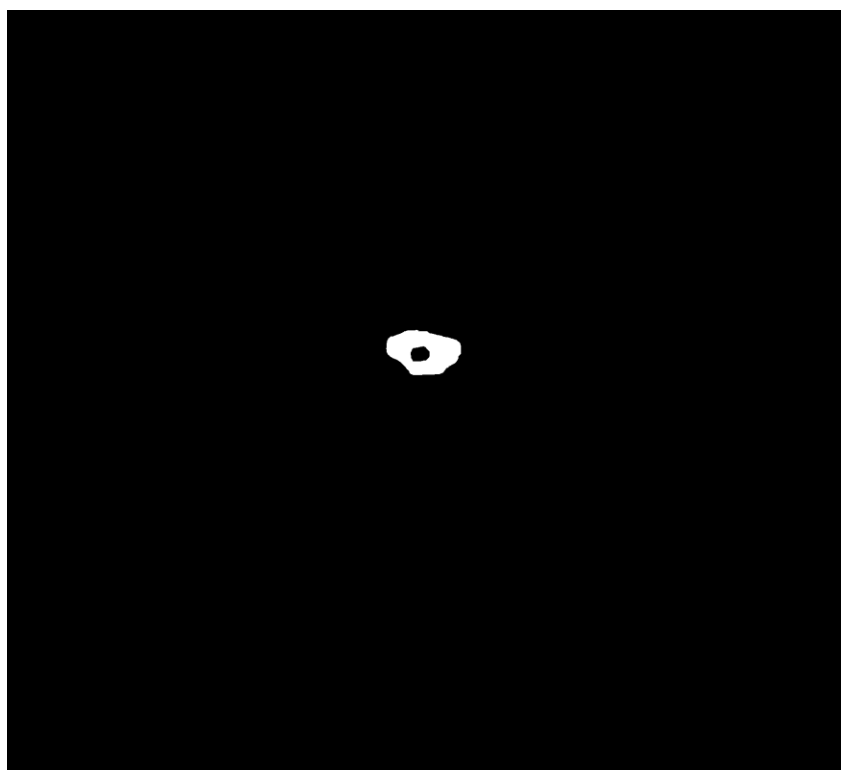
идентифициране на обема на аномалии, с прогнозен интервал, изчислен на 95%. Това идентифицира големи региони, които представляват интерес и могат да съдържат аномалии. Във второто изпълнение регресионният алгоритъм е приложен без изглаждане на изображението или прилагане на идентификация, с прогнозен интервал изчислен на 90%. Това идентифицира всички пиксели, със значително отклонение от общата тенденция, но без въвеждане на причиненото замъгляване чрез изглаждане.

Като последна стъпка, всички пиксели, идентифицирани като аномални във второто изпълнение, се премахват от изображението. Това актуализирано изображение след това се изглажда и се прилага алгоритъм за кръстосана регресия с идентифициране чрез определяне на праг на интервала за прогнозиране от 99%. Обърнете внимание, че този по-висок праг на интервала за прогнозиране е необходим, защото премахването на най-важните отрицателни стойности намалява средната квадратична грешка на модела ($\Delta x_q = \sqrt{[(\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2]/n(n-1)}$). Тестовите показват, че този проблем е довел до определянето на голям брой пиксели като аномални при прагове под 99%. Целта на този трети курс е да се идентифицират области, които не са със значителни, очевидни крайни стойности (тъй като те са били отстранени), но където има тенденция на незначително отклонение от регресионната линия, която може да се очаква при леко видимо разслояване. И трите цикъла използват алгоритъма за кръстосаната регресия за да се идентифицират пикселите, които са отклоняващи се както в x, така и в y-посоките. За да се счете, че даден пиксел е отклонение в резултата, трябва да се появи като отклонение в първия, но и във втория или третия етап. На този етап всички свързани региони на аномалии са идентифицирани и се изчислява сумата на резидуалните остатъци във всеки регион.

Един потенциален недостатък при използването на три етапа на алгоритъма би било увеличеното генериране на фалшиви положителни резултати, защото всеки етап ще произведе някои фалшиви положителни резултати, които могат да се различават при отделните етапи. Този недостатък се ограничава от изискването, че пикселите трябва да се проявят като извънредни в първия етап, за да се считат за аномални, което ограничава

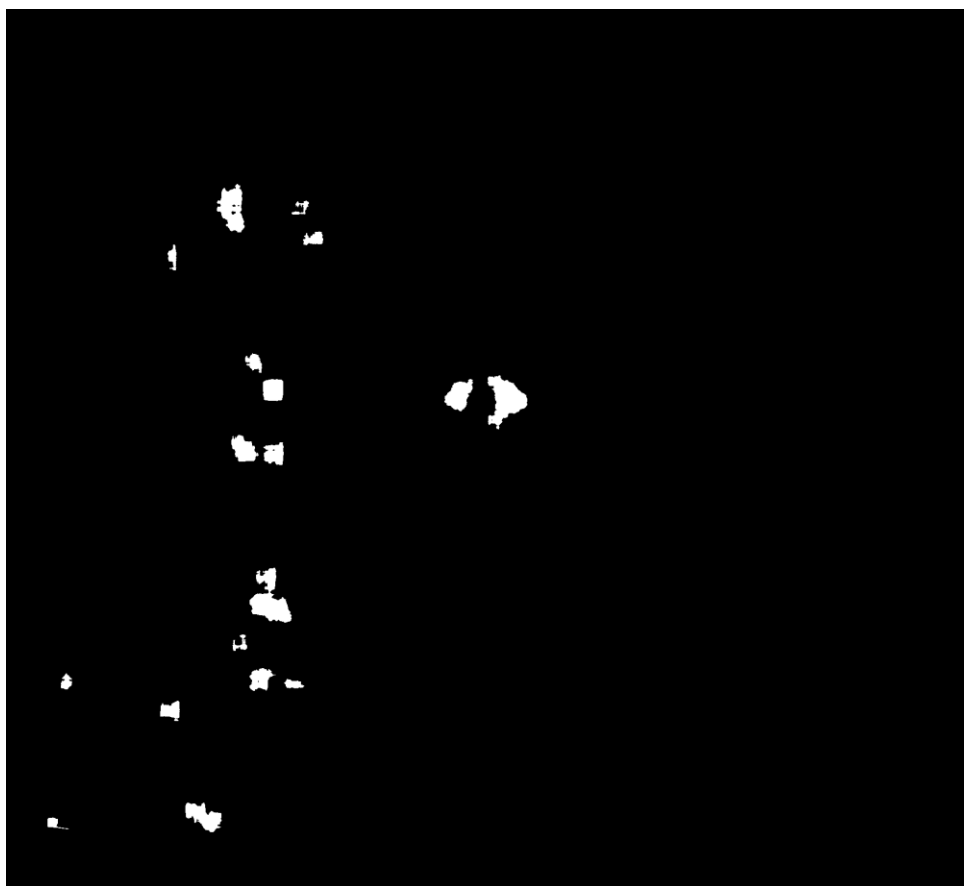
потенциалните фалшиви положителни знаци до пикселите, които са идентифицирани в този етап. Докато вторият и третият етап ще доведат до извънредни пиксели в образа, но по-голямата част от тях ще бъдат елиминирани, тъй като те попадат извън зоните, идентифицирани в първия етап. А фалшив положителен пиксел би трябвало да бъде идентифициран като извънреден два пъти, за да се появи в крайния резултат. На практика, както показват резултатите, това води до по-малко фалшиви положителни резултати, отколкото биха могли да се получат при само един етап.

Пробата, която първоначално е показана на фигура 17, бе повторно изследвана при използване на този подход и резултатите са показани на Фигура 30. Регионите се класират въз основа на сумата от резидуалните остатъци и се прилага минимален праг за филтриране на регионите, които е малко вероятно да бъдат от интерес. Крайният резултат за пробата, показана на фигура 17, след прилагането на критерий за такъв праг е показан на Фигура 31. След това резултатите за всяко изображение се извеждат като двоични (черно-бяло) .png, като в челен цвят е фонът на изображението и в бяло са представени пикселите, идентифицирани като аномални.



Фиг. 27: Ръчно сегментиране на деламинацията на фигура 17.

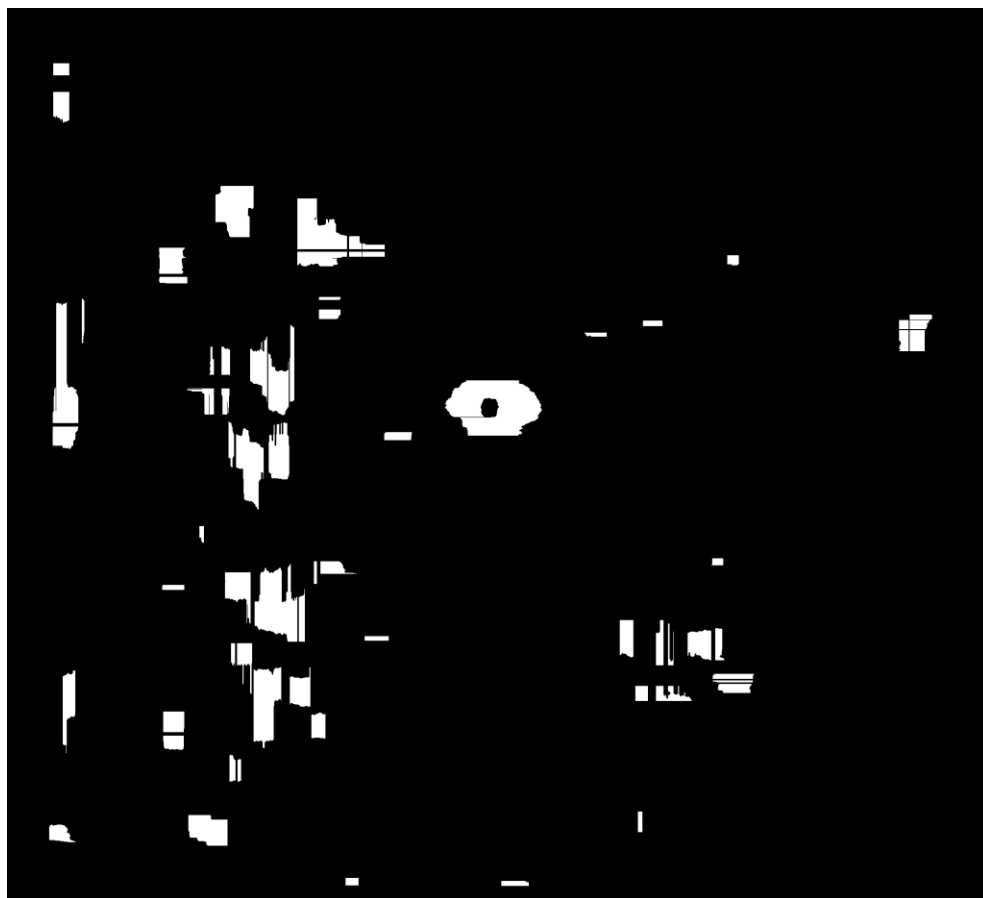
Изпълнението на методите, обсъдени в тезата, беше завършено с помощта на R език за програмиране. R предоставя богат набор от статистически библиотеки, които опростяват кодирането и тестване на техники за прототипиране. Снимките са получени в лаборатория под формата на 32-битови vol / vgi les, формат, в който .vgi файл съдържа информация за метаданни като размери на изображението и .vol файл съдържа действителните триизмерни данни за изображения.



Фиг. 28: Резултати от тегленето на въглеродната проба, показана на Фиг. 17 с изглаждане, но без идентифициране на формата, водещо до влошаване на покриваемостта от 54%.

Кодът използва паралелните и предметни библиотеки. Първоначалният вектор, прочетен от файла се разделя на страници, всяка представляваща една рамка на изображението.

Циклично всяка страница се обработва като отделна нишка за обработка. Изглаждането е завършено с помощта на растерната библиотека. След преобразуване на матрицата, съдържаща страницата към растерния обект, метод се използва за прилагане на филтър на осреднена стойност.

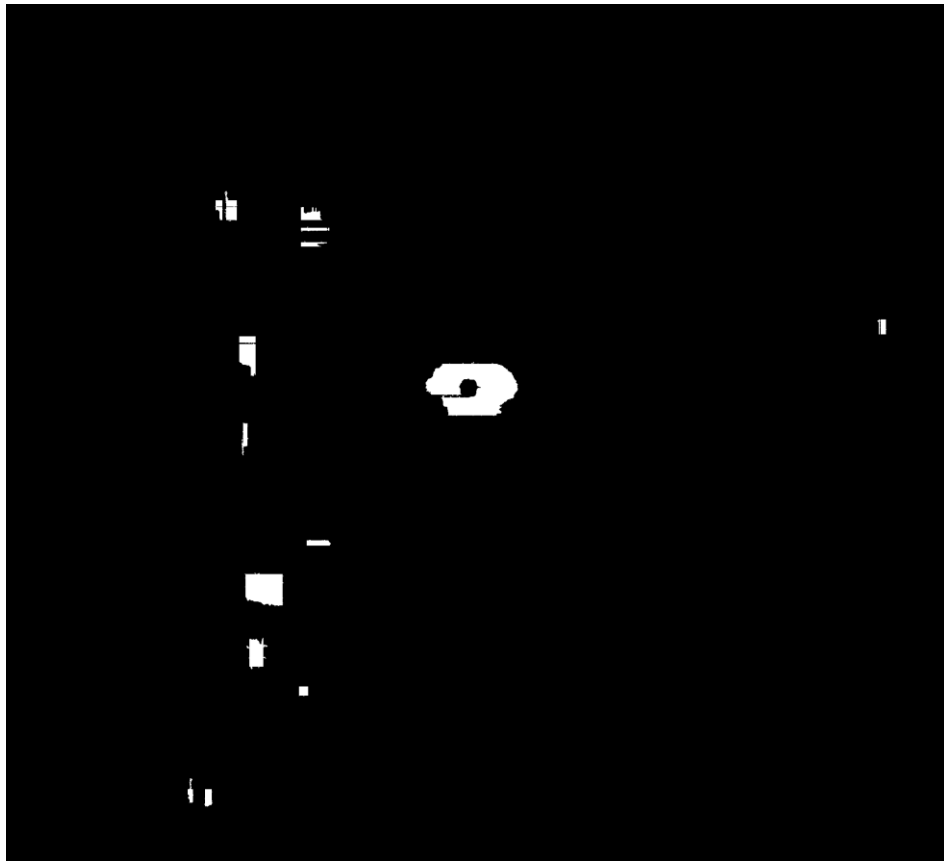


Фиг. 29: Резултатите от извеждането на пробата от въглеродна проба, показана по-горе, с изглаждане и идентификация на формата, което води до резултат с покриваемост от 93%.

Регресионният модел се използва, прилагайки `rlm` метода, наличен в `MASS` пакет. Функцията `predict.rlm` се използва за интервалите на прогнозиране. Свързаното етикетиране на компоненти се извършва с помощта на метода `ConnCompLabel`, в пакета `SDMTools`. Бинарни изображения, представляващи идентифицираните региони след това се запамятват като `.png` използвайки `png` библиотеката.

3.7. Анализ на процеса

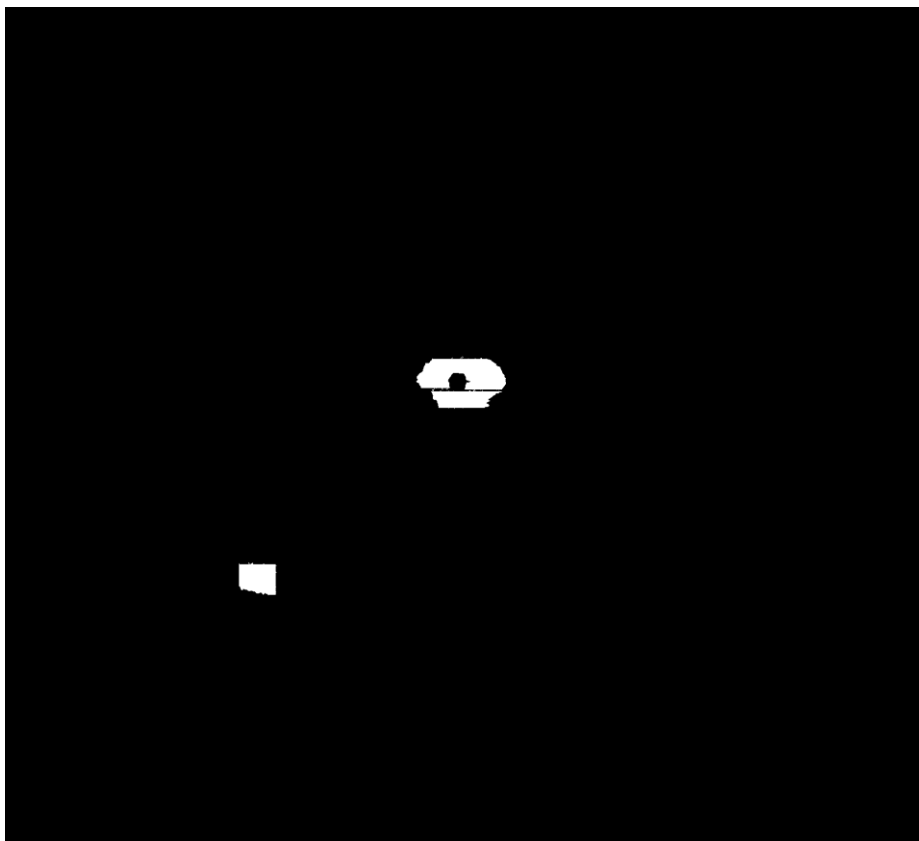
Филтър на осреднена стойност може да бъде приложен, като се използва техниката на интегрални изображения. Интегралните изображения са въведени от Crow (1984) като техника за подобряване на скоростта на рендериране (процес на генериране на изображения от модел) на графични структури при множество скалиране в перспективни проекции. Оттогава тази техника се използва за редица приложения. Най-популярните примери са бързо нормализираната кръстосана корелация, рамката за откриване на обекти на Viola-Jones и трансформацията на ускорената функционалност - Speeded Up Robust Feature (SURF).



Фиг. 30: Изследване на изображението при използване на подхода от три етапа

Едно интегралното изображение се произвежда от входящото изображение, като се изчислява за всяка точка сумата от тази точка заедно с всички точки в правоъгълника, при който тази точка формира долния десен ъгъл, а горният ляв ъгъл на изображението е и

този на правоъгълника. При всяка точка изчисляването на тази сума по този начин включва само добавяне на стойността на самата точка, и стойностите на точката точно над нея, точката директно вляво от нея, и след това изваждайки стойността на точката, която се намира директно над и вляво от нея, тъй като този регион е бил добавен два пъти. За да изчислите средната стойност за даден квадрат в изображението, е необходимо да се извади от стойността на позицията, която формира долния десния ъгъл на квадрата стойността на пиксела, който е директно вляво от долния ляв ъгъл на квадрата, и тази на точката, която е точно над горния десен ъгъл на квадрата, след което се добави отново стойността на точката директно отгоре и вляво от горния ляв ъгъл на квадрата, тъй като този регион е бил изваден два пъти. Тогава се разделя на площта на квадрата, за да се получи средната стойност (Shafait, Keysers, и Breuel, 2008). Това позволява филтърът за осредняване да се изчислява в линейно време. Образуването на интегралното изображение ще изисква три изчисления за всеки пиксел в изображението за време на изпълнение от $\theta(n)$, последвани от изчисление за средната стойност за всяко място пак за сходно време, така че филтърът на алгоритъма като цяло има време на действие $\theta(n)$.



Фиг. 31: Изображението след поставяне на праг
базиращ се на сумата от резидуалните остатъци.

Алгоритъмът за премахване на границите включва анализ на всеки сигнал, а в най-лошия случай, включва проверка на всеки пиксел на всеки сигнал. Тъй като всеки пиксел се показва в двата сигнал x и y , това означава, че всеки пиксел ще бъде проверен спрямо средната стойност максимално два пъти. Реалното изчисление на средната стойност за всеки сигнал включва добавяне на всяка стойност на сигнала, така че това също ще отнеме $2n$ изчисления. Оттук следва, че алгоритмите за премахване на границите протичат за време от $\theta(n)$. Стандартната регресия на най-малките средни квадрати се изпълнява за време от $O(kp^2)$, където k е числото на точките от данни и p е броят на параметрите на модела (Meer, Rosenfeld, Kim, 2001). Тъй като сме задали $p = 5$ за нашия алгоритъм, всеки сигнал по този начин работи в $O(k)$ време за дължината на сигнала. В най-лошия сценарий, изображението ще се състои от един ред от n пиксели, при което се получава регресия по време на работа на $O(n)$. М-оценката може да бъде реализирана като

циклически процес на най-малкия среден квадрат (Bellio и Ventura, 2005), а алгоритъмът, използван в това изследване, определя 40 като максимален брой на повторенията, което означава, че може да се приложи силна регресия с $O(n)$ време за изпълнение.

Алгоритъм за идентификация ще проверява в краен случай всеки пиксел на всеки сигнал, а в най-добрия случай ще провери само един съсед, давайки му време на изпълнение, което е $O(n)$ и $\Omega(1)$.

Алгоритъмът се основава на едноетапно етиктиране на свързаните компоненти (connected-component labeling). Етиктирането на свързани компоненти се използва в компютърното визуализиране за откриване на свързани региони в двоични цифрови изображения, въпреки че могат да се обработват и цветни изображения и данни с по-голяма величина. Когато се интегрира в система за разпознаване на изображения или интерфейс за взаимодействие човек-компютър, свързаното етиктиране на компоненти може да работи с различни информации. Извличането на "blubs" - региони в изображението с определени свойства, обикновено се извършва върху полученото двоично изображение от етап с прилагане на праг. Тези региони могат да бъдат преброени, филтрирани и проследени. Извличането на такива области с определени свойства е свързано, но е различно от откриването на такива.

Алгоритъмът се основава на едноетапно етиктиране на свързаните компоненти. Съществуват едноетапни линейни времеви алгоритми, обаче често реалното им прилагане е свързано с проблеми, свързани с достъп до паметта поради непредсказуемите конфигурации за достъп, които са нужни (Wu, Otoo и Suzuki, 2008). При Suzuki, Horiba, и Sugie (2003), се използва линейен времеви алгоритъм за двустъпков "connected-component labeling", което избягва тези проблеми, така че прилагането на алгоритъма, представен в тази теза, може да се постигне за $O(n)$ време за изпълнение с потенциално много по-добро действително изпълнение. Тъй като всички части на алгоритъма се изпълняват за $O(n)$ или $\theta(n)$ време, крайното време на изпълнение на алгоритъма е $\theta(n)$, където n е броят на пикселите в изображението. За едно изображение с размери M на N в пиксели, времето за изпълнение ще бъде $\theta(M \times N)$.

ГЛАВА 4. ИЗСЛЕДВАНЕ

4.1. Оценка на ефективността на метода

Няколко показателя са полезни при оценката на успеха на подхода. Точност и покриваемост са техники на ниво пиксел, базирани на изчисляването на истински и фалшиви положителни и негативни стойности. Истинска позитива (TP) е пикселът, който е определен от алгоритъма като част от дефекта и действително е така. Фалшива положителна (FP) е пиксел, който в действителност не е част от дефекта, но неправилно е идентифициран като такъв от алгоритъма. Вярна отрицателна (TN) е пиксел, който не е част от зоната на дефекта и е правилно идентифициран като такъв от алгоритъма. Фалшива отрицателна (FN) е пиксел, който е част от зоната на дефекта, но не е правилно идентифициран като такъв от алгоритъма.

Покриваемостта (Campbell, 2010) описва какъв процент от дефекта е правилно идентифициран от алгоритъма и се изчислява като:

$$R = \frac{TP}{TP+FN} \quad (7)$$

Точността се отнася до това, колко са свободни резултатите от шум, като какъв процент от идентифицираните пиксели като част от дефекта, са наистина такива (Szeliski, 2010):

$$P = \frac{TP}{TP+FP} \quad (8)$$

Могат да се калкулират за цялото изображение или само за определен регион от интерес (ROI), определен от алгоритъма.

Друг метод за идентифициране на грешките при измерване е сравняването на средното квадратично отклонение (RMSD) на идентифицираната граница на областта на дефекта с действителната такава:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i^2} \quad (9)$$

където N е общият брой точки по границата на предложената граница на дефекта и δ_i е разстоянието между i точката по границата на предложената зона на дефекта и най-близката точка по границата на действителната зона на дефекта. Вариант на RMSD е разстоянието на Хаусдорф, което не разглежда само разстояние от предложеното зона на дефекта до визуално видимата, но и разстоянието от всеки пиксел на визуално видимата граница на дефекта до най-близкия аномален пиксел и определя възможното най - голямо разстояние между двата региона (Huttenlocher и сътр., 1993).

Валидността на различните показатели се базира отчасти върху очаквания модел на използване за софтуер, разработен с помощта на алгоритъма, представен в тази теза. Полезно е да се разгледа разнообразието от потенциални случаи на употреба и да се представят резултати, които показват как алгоритъмът ще се представи в тези случаи. Един потенциален случай на използване би бил предложената техника да функционира

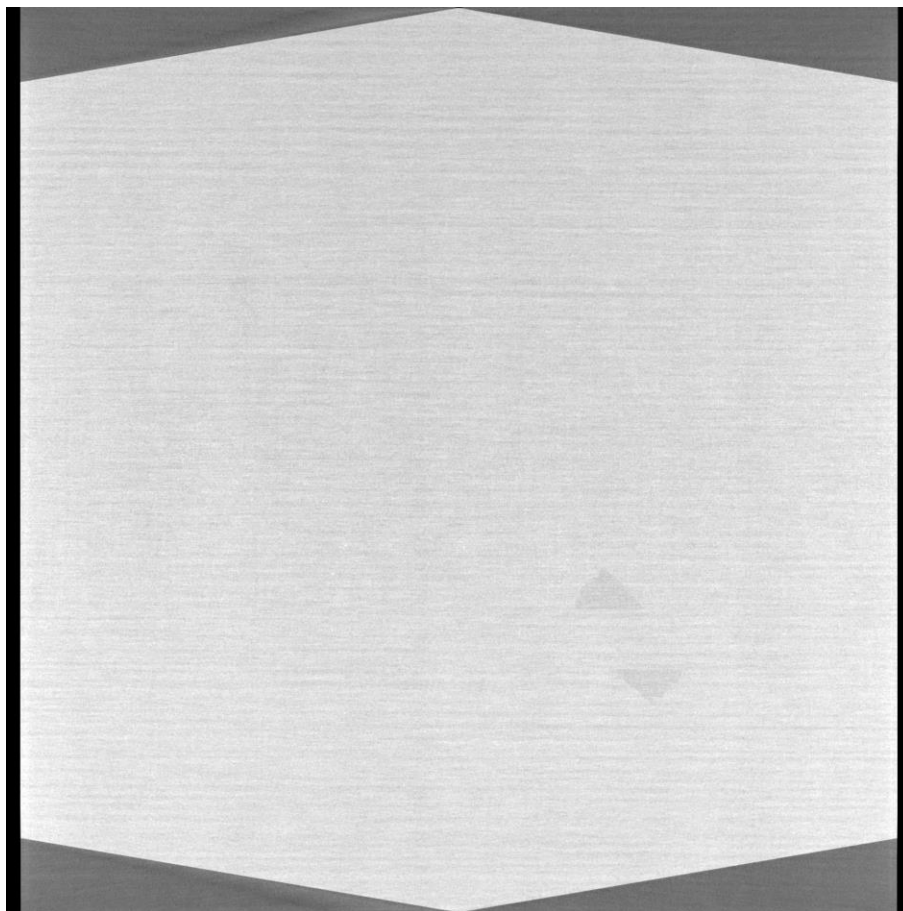
като помощ в процеса на анализа. Това би могло да доведе до полуавтоматичен процес, при който алгоритъмът анализира данните, а след това резултатите се потвърждават от човешкия експерт. Например, може да идентифицират възможни региони на интереси (ROI) и да ги представи на специалиста, подредени по важност с цел проверка. Ако техниката точно класира регионите, на експерт биха могли да бъдат представени региони на потенциални дефекти, с цел да бъдат потвърдени от него. Накрая технологията ще представи ROI с по-малка вероятност да се представят действителните дефекти, специалистът може да реши дали да избере да ги прегледа. Този случай на употреба е позволен за по-голям брой фалшиви положителни съвпадения, стига софтуерът да е в състояние точно да степенува регионите на потенциални дефекти според вероятността да характеризират размера и формата на щетите в регионите, които са определени като валидни. Вторият случай на употреба би бил като напълно автоматизиран процес, където се приема, че всички региони, идентифицирани от софтуера, представляват реални щети. В този случай проблемът при фалшиви положителни данни може да е по-висок.

За да разгледаме тези случаи на използване, ако има фалшиви положителни региони на дефекти, метриките ще се разгледат първо, когато се разглеждат "първичните ROI" за всяко изображение. Това са всички ROI, които споделят поне един пиксел, който се припокрива с визуалната граница на дефект, и се степенуват по важност по - високо от тези региони, които не споделят пиксели с визуална граница. Това означава, че това са региони, които специалистът би разгледал, преди да започне да разглежда грешни положителни ROI. След това ще се разгледат показателите за покриваемост и прецизност, за да се разбере колко точно алгоритъмът се представя цялостно дори когато се взимат под внимание фалшивите положителни резултати.

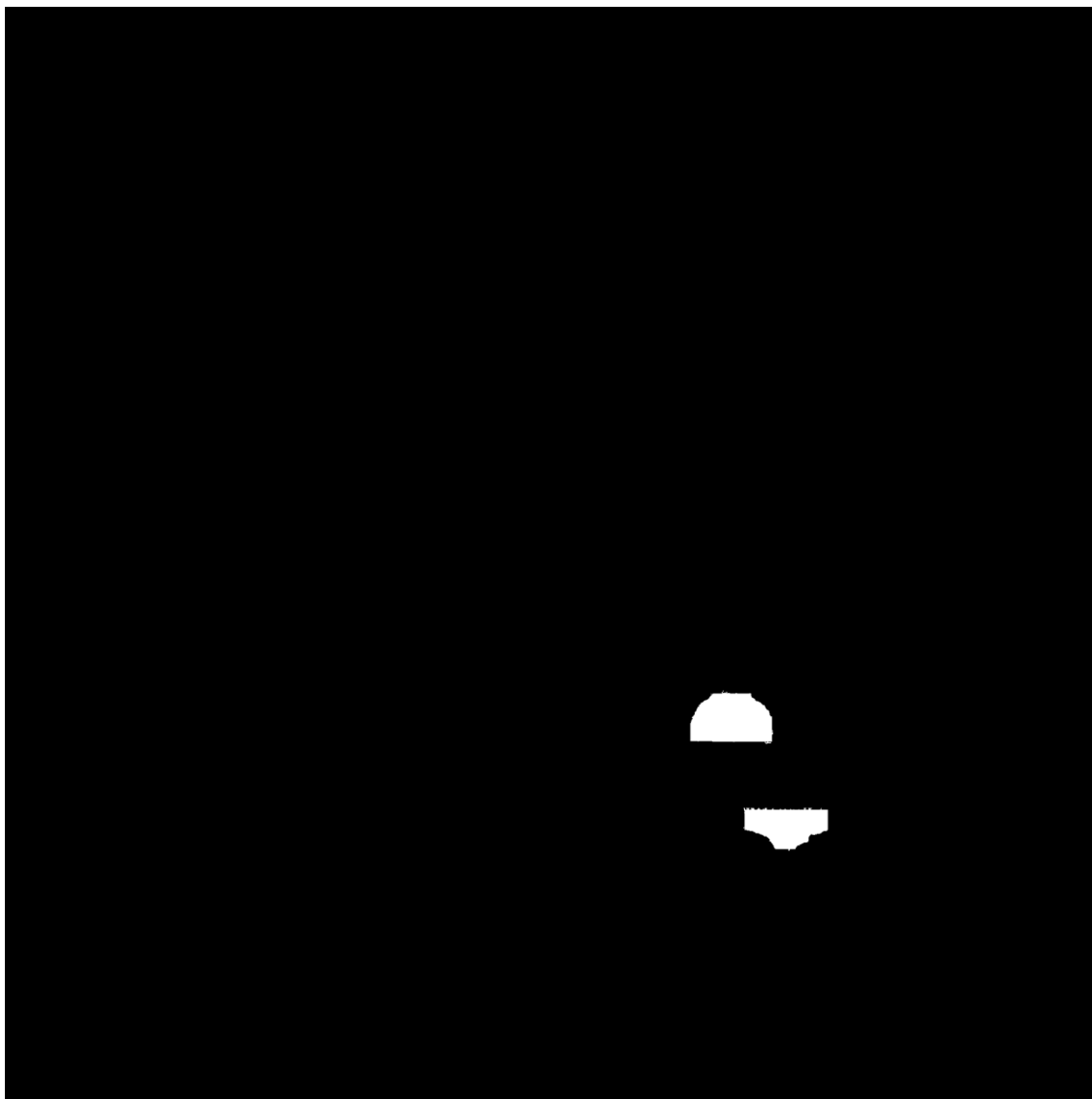
4.2. База за сравнение

За да се осигури надеждна визуална инспекция, която би могла да осигури възможността за сравнение и с това остойностяване на изпълнението на техниката върху образи с различна степен на трудност за откриване на дефекти, има комплект от симулирани изображения. Те са създадени, използвайки фонови изображения от истинска въглеродна проба без никакви повреди, наложена с дефекти, които са били ръчно сегментирани от

четири други реални изображения. За всяко изображение, състоящо се от истинско изображение на въглеродни нишки е избрана една от четирите форми на дефект; в някои случаи размерът е променен, за да бъде по-голям или по-малък. Формата на разслояване, която е избрана, е използвана за създаване на седем изображения. Във всяко изображение изображението на дефекта е наслагано върху реалното фоново изображение, като началната пикселна стойност на формата на разслояване се различава при всяко изображение, вариращо от много тъмно (и лесно се да види срещу фоновото изображение) до много леко (и едва различаващо се от фона). Хистограмният анализ на изображенията показва хистограмата на дефекта, която се приближава до стойностите на хистограмата, представящи фона в по-светлите изображения (Winfrey, 2015). По този начин всяка проба съдържа седем изображения, представящи различни нива от 1 (деламинацията е много лека и едва видима) до 7 (деламинацията е много тъмна и лесно се различава). Тъй като деламинациите са били вмъкнати умишлено, техният точен размер и местоположение са известни. Примерно изображение от този тест, зададено с деламиниране, дадено на второто най-високо от седемте различни нива, е показано на фигура 32. Същото изображение на шестото най-високо ниво е показано на фигура 34, с идентифицираните аномалии на алгоритъма за всяко изображение, показано съответно на фигура 32 и фигура 35. Допълнително тестване е извършено с втори комплект, състоящ се от реални изображения от две проби въглероден материал, които са ръчно сегментирани в двоични стойности от специалист (с всеки пиксел, означен като аномален или доброкачествен). Този набор дава представена представа за това колко добре се изпълнява техниката на действителните данни, но те разчитат на предположението, че ръчното сегментиране е извършено точно.

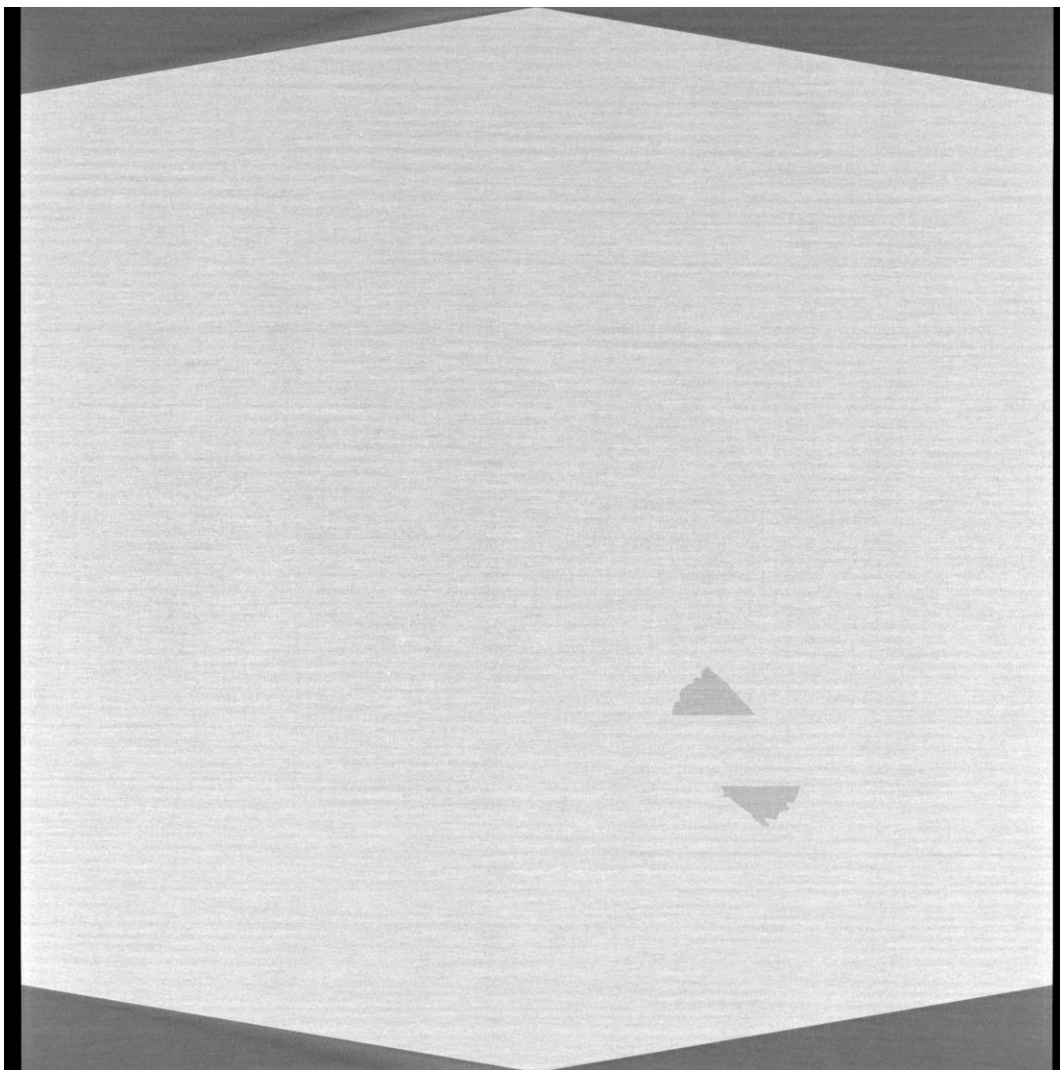


Фиг. 32: Симулирана деламинация, видима в долния десен ъгъл
на второто ниво по трудност

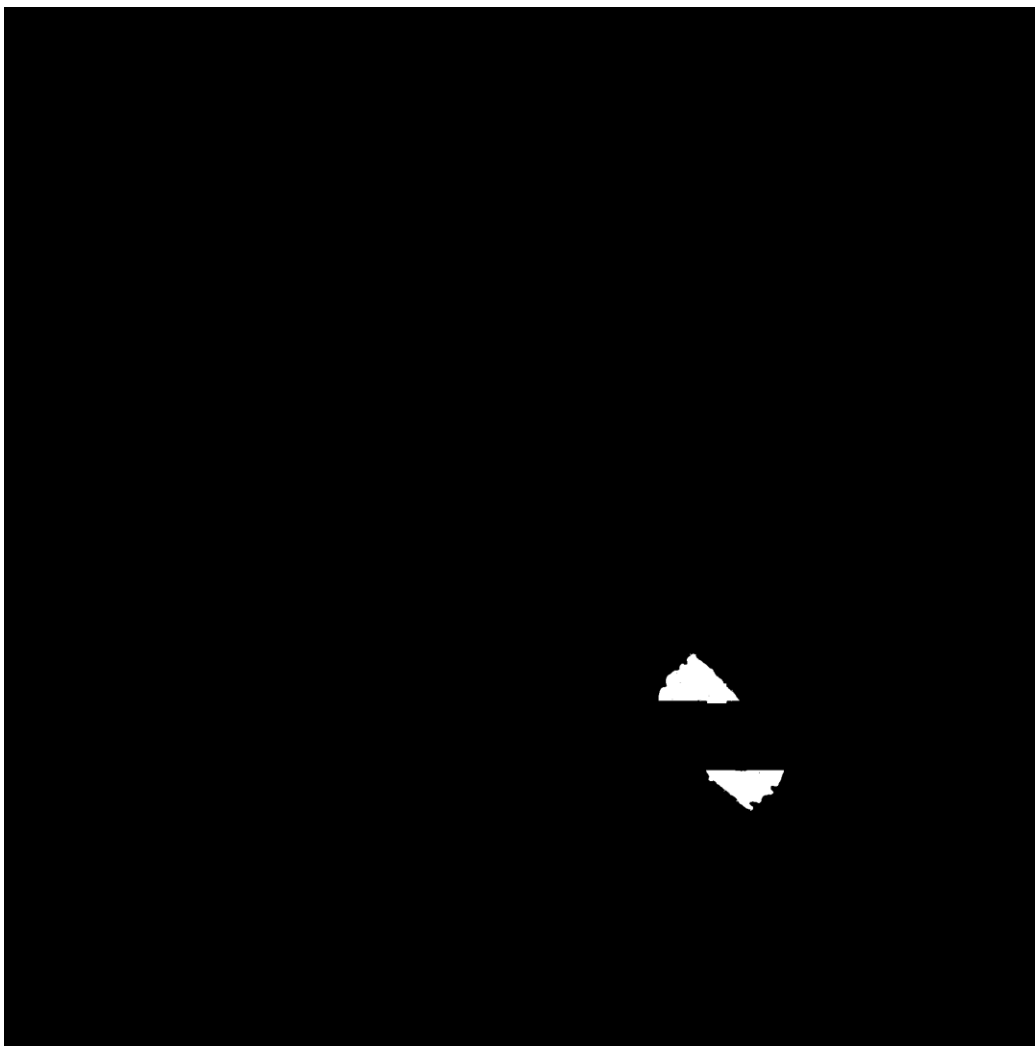


Фиг. 33: Резултати на алгоритъма за дефекта от предишно изображение.

Тъй като разнообразието и субективността на правилно идентифициране на дефекти чрез ръчна техника са една от причините за съществуването на това изследване, не е възможно да се знае със сигурност дали ръчните сегментиране са действително верни. Тези изображения обаче дават обща представа за това доколко алгоритъмът съвпада с човешките оценки на реалните данни.



Фиг. 34: Симулиран дефект, видим в долния десен ъгъл
на второто най - ниско ниво на трудност.



Фиг. 35: Резултат на алгоритъма на дефект от предишното изображение

4.3. Анализ на резултати от изследването

Изпробването на симулираните данни показва обещаващи резултати във всички различни нива. Алгоритъмът успешно установи, че аномалиите са съществували в 92% от случаите, включително 100% от случаите с ниво на трудност 4-7. От интерес е, че алгоритъмът генерира нула фалшиви положителни региони на интерес (ROI) - т.е. всеки идентифициран район на интерес включва или цялата област на действителния дефект или част от него. Алгоритъмът е ефективен по отношение на размера и формата на разграничаването, със средна прецизност от 78%, покриваемост от 88%, RMSD от 11.2

пиксела и разстояние на Хаусдорф от 50 пиксела. Пълните резултати са представени в таблица 7. Тъй като в момента няма автоматизиран алгоритъм за анализ на материали от карбонови нишки, няма основания за директно сравняване. Демонстрира се чрез числата, че алгоритъмът ефективно характеризира цялостната форма и размер на дефектите. Докато деламинациите варират по форма и размер, типичните разслояване от тестовия набор имат ширина от около сто пиксела, така че стойността на RMSD показва, че средно границите на идентифицираната аномалия и действителната варират само с около 10% от ширината.

Метод	1	2	3	4	5	6	7	Средно
Точност	55%	59%	59%	74%	84%	89%	90%	78%
Покриваемост	47%	83%	89%	98%	99%	99%	100%	88%
RMSD	10.2	14.4	13.8	11.5	9.3	8.0	6.9	11.2
Хаусдорф	103.0	48.1	46.6	38.0	34.3	32.7	27.6	50.0
% на открити региони на интерес	63%	89%	91%	100%	100%	100%	100%	92%

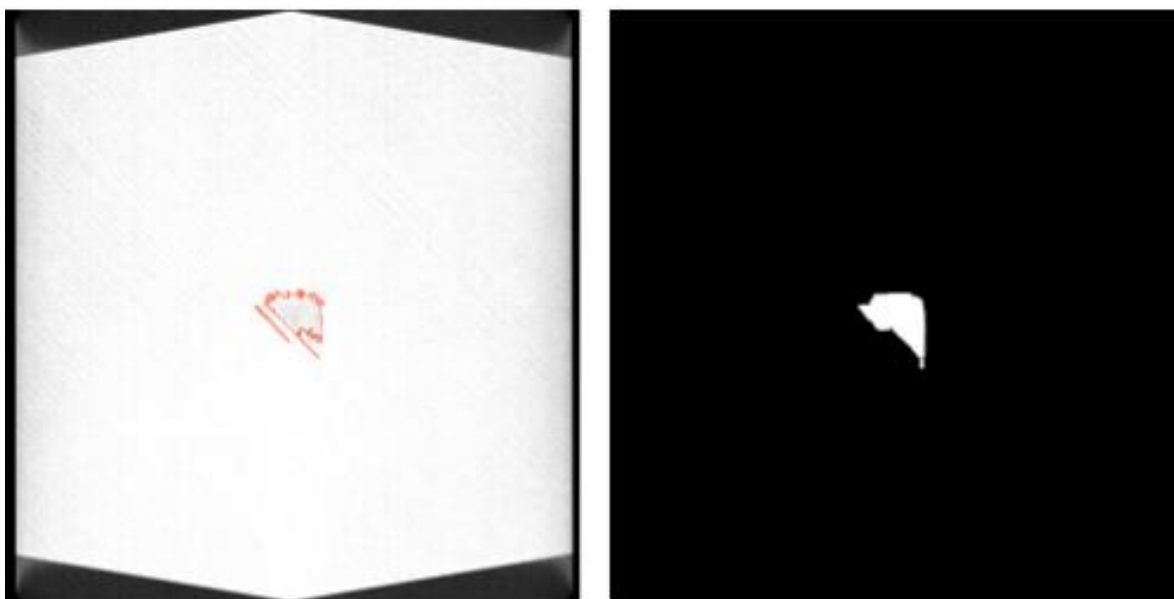
Таб. 7: Резултатите от симулирания реален дефект, като трудността се движи от най - висока (1) до най - минимална (7).

Едно сравнение, което може да бъде направено, е спрямо методите, които са били направени за анализ на дефект на заваряването в неръждаема стомана. Например, при използване на метода на линейно напасване на кривата (Liao и Liq, 1998), е постигната скорост на откриване от 93,3% при 4.2% фалшиви позитиви, стойности, подобни на тези, които са постигнати в това проучване. Тъй като няма фалшиво положителни ROI (фалшиви положителни региони на интерес), алгоритъмът може да се представи добре и в двата описани по-горе случаи. В действителност, чрез снижаване на границите за валидни

резултати, може да е възможно да се постигне дори по-висока покриваемост при първия случай, ако генериране на някои фалшиви положителни ROI е приемливо. По-нататъшна работа за класифициране на регионите на дефекта, би могло да позволят по-голяма чувствителност на алгоритъма, който би могъл да подобри покриваемостта при втория случай на употреба. Изображенията, свързани с най - големи трудности, са тези с много малки или леки разслоявания. 66% от грешните негативи са възникнали при изображения с най-леко разслояване, а останалите при изображения с най-малък размер на разслояването, при които, в най - широката точка, разслояването е само 1,5% от дължината на x-сигнали, минаващи през него. Средните по размер разслоявания в симулирания тест в най-широката си точка, съставляват приблизително 4% до 10% от всеки преминаващ през тях сигнал. Най-голямото разслояване в симулирания набор от тестове съставлява 17% от всеки сигнал, преминаващ в най-широката му точка. Остава да се види дали тези резултати са напълно обобщими с реални изображения.

Ограниченото изпитване показва обещаващи резултати. Примерът, показан на Фигура 36 осигурява сравнение на визуалната идентификация на дефект от специалист в сравнение с резултатите от алгоритъма. Резултатите в таблица 8 дават показателите, сравняващи тези две сегментация; Трябва да се отбележи, че се приема, че човешката оценка е правилна, което може и да не е вярно. Защото два различни специалисти могат да произвеждат значително различни сегментирания за едни и същи изображения. Изчисляване на значими показатели, сравняващи представянето на алгоритъма със средностатистическия експерт би изисквало голям набор от данни, състоящ се от сегментиране на визуалните оценки от множество човешки експерти. Алгоритъмът се изпълнява най-успешно за аномалии с типичен за повечето размер, включително и за най-големите деламинации, присъстващи в симулирания набор от тестове. Въпреки това, при експериментирането с реални данни, алгоритъмът понякога се опитва целесъобразно да се идентифицират деламинациите, които представляват голяма част от общото изображение, като това, показано на Фигура 37. В това изображение, за някои сигнали, минаващи през него, деламинацията съставлява повече от 37% от сигнала. Алгоритъмът се опитва да идентифицират дефекти, отклонения от общата тенденция, и когато дефектът съставлява

такава голяма част от изображението, вече не е аномалия. При тези сигнали регресионната линия ще се огъне и ще включи дефектната зона, тъй като сега тя представлява основна част от тенденцията на изображението. Все пак този случай не е толкова важен, тъй като такъв голям дефект би бил очевиден за анализаторите без да се налага да разчитаме на алгоритъм за анализ – Фигура 38, (Winfree, 2015).

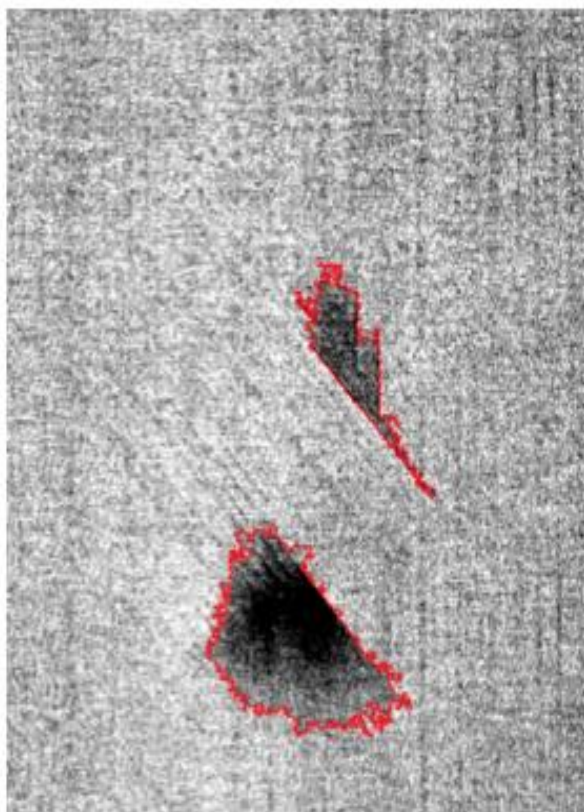


Фиг. 36: Истинско разслояване (вляво) с контур, идентифициран от специалист в червено, заедно с резултата от алгоритъма (вдясно).

Методи	Резултат
Точност	67.8%
Покриваемост	94.8%
RMSA	13.0
Разстояние на Хаудорф	64.9

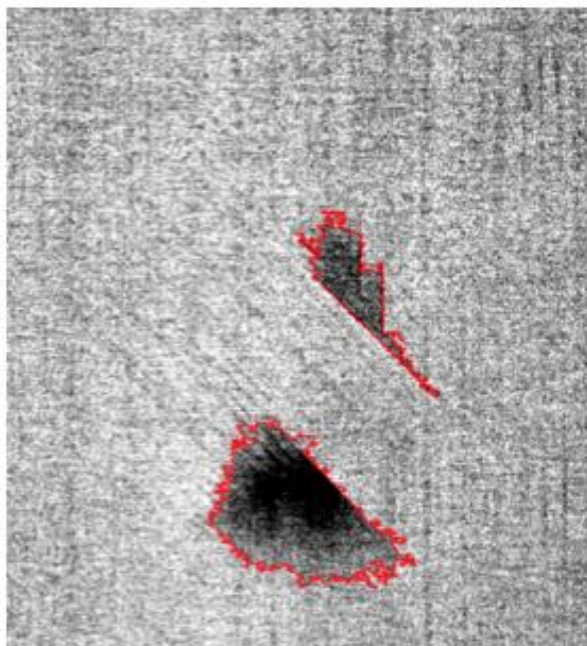
Таб. 8: Методи в сравнение с визуалната инспекция на реалното изображение

показан на Фигура 36 по-горе.



	Точност	Покриваемост
Изображение	88%	34%

Фиг. 37: Голям (реален) дефект и резултати при използване на М-оценка.



	Точност	Покриваемост
Изображение	74%	71%

Фиг. 38: Голям (реален) дефект и резултати при използване на ММ-оценка.

4.4. Експериментални примери

4.4.1. Изследване на метални покрития

4.4.1.1. Видове метални покрития и методи за нанасяне

Металните покрития намират широко приложение в антикорозийната практика. Тези покрития не само защитават от корозия, но и предават на повърхността редица ценни физико-механични свойства като: твърдост, износоустойчивост, електропроводимост, запояемост, добър външен вид и др. В зависимост от полярността на покритието по отношение на защитавания метал, те се групират в две групи – катодни и анодни.

Металните покрития биват основно никелови, хромови, медни. Съществуват покрития с редки метали - сребърни и златни, с други редки метали.

4.4.1.2. Описание на основните методи за нанасяне на покрития

Металните покрития се нанасят посредством следните основни методи: потапяне в разтопен метал, метализация чрез разпрашаване, термодифузионен метод, термомеханичен метод, галваничен метод, химично отлагане.

- потапяне в разтопен метал – нанасяне на цинкови, алуминиеви, калаени и оловни покрития върху стоманени изделия и полуфабрикати (лист, тел, тръби и др.

- метализация чрез разпрашаване (пулверизиране) на разтопен метал върху повърхността с помощта на сгъстен въздух или инертен газ. Разпрашаването се извършва, чрез специални пистолети – метализатори, в които се подава (във вид на тел или прах) нанасяния метал. Например нанасяне на цинк, алуминий, олово, калай, никел, месинг върху метални и неметални повърхности. В зависимост от източника на топлина за топене на метала, метализаторите биват: газови, електрически и плазмени.

- термодифузионен метод – нанасяне на покрития в резултат на дифузия на атомите на нанасяния метал при висока температура, при което се образува слой от сплав. Този метод на практика се реализира, чрез термодифузионни покрития на прахообразни смеси – цинкови, алуминиеви, хромови и силициеви покрития върху стомана.

- термомеханичният метод (плакирането) се прилага за производство на биметални ленти, листи, телове. Покритието се образува при съвместно валцуване, горещо пресоване или награване под налягане на два метала – на основния и на покриващия. Този метод осигурява много добро сцепление между покритието и основата, тъй като се извършва взаимна дифузия на двата метала при едновременното действие на високата температура и налягане.

- галваничен метод – нанасяне на покрития, чрез електролизно отлагане на метални слоеве върху токопроводяща основа. Извършва се в галванични вани за нанасяне на цинкови, кадмиеви, никелови, хромови, калаени и медни покрития.

- химично отлагане – представлява нанасяне на покритие върху метални и неметални материали, чрез химична редукция от разтвори. В състава на разтвора влизат йоните на отлагания метал и редуктор. Редукцията на металните йони се извършва (при определени условия) самопроизволно, при което редуцирания метал се отлага върху предварително подготвената повърхност на изделието. Извършва се за отлагане на редица метали, като никел, кобалт, мед, калай, сребро и др., върху метални или напоследък и пластмасови изделия и детайли за получаване за защитно декоративни и функционални покрития.

Освен тези методи съществуват и други методи за нанасяне на метални покрития като: вакуумно метализиране (отлагане на разтопен метал в условия на дълбок вакуум в специални камери); катодно разпрашаване (в условия на дълбок вакуум и електрично поле); парафазно отлагане (чрез термично разлагане на летливи съединения на отлагания метал); електрофорезно отлагане (чрез електрофореза на неводна сеспензия, съдържаща отлагания метал в прахообразно състояние).

Възможности за изследване износването на тънки покрития

В много случаи на практиката се използват покрития с дебелина от порядъка на $10 \div 20 \mu m$. Линейното износване на такива покрития, свързано с деформирането, приработването и разрушаването им поднася големи метрологични трудности. Например ако трябва да се проследи приработването на едно такова покритие, то по общия закон на трибологията би следвало линейното износване L да се представи аналитично като функция на времето t във вида:

$$\frac{dL}{L} = \eta_1 \frac{dt}{t} + \eta_2 \frac{dt}{t} + \eta_3 \frac{dt}{t} \quad (10)$$

където η_1, η_2, η_3 са парциалните контактни потенциали на износващото се покритие на съответните три епата на износване – приработване, стационарен режим, патология.

Задачата за изследване на износването се усложнява многократно, т.к. и без това тънкото покритие трябва да се разбие на три участъка и за всеки от тези участъци да се построи

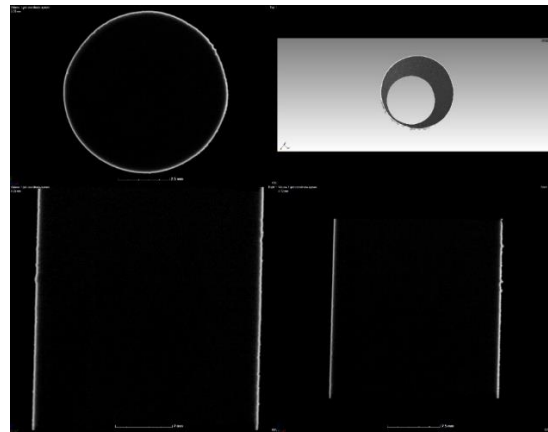
закона за износването. Всички това предполага наличие на методика с изключителна разделителна способност и възпроизводимост.

4.4.1.3. Измерване дебелината и равномерността на покритие с томограф

Измерване дебелината и равномерността на хромово покритие върху алуминиеви образци беше извършено в Лаборатория SMARTLAB на ИИКТ-БАН с Индустриален томограф ХТН 225, по задание на Института по металознание във връзка със съвместни проекти – фиг. 39.



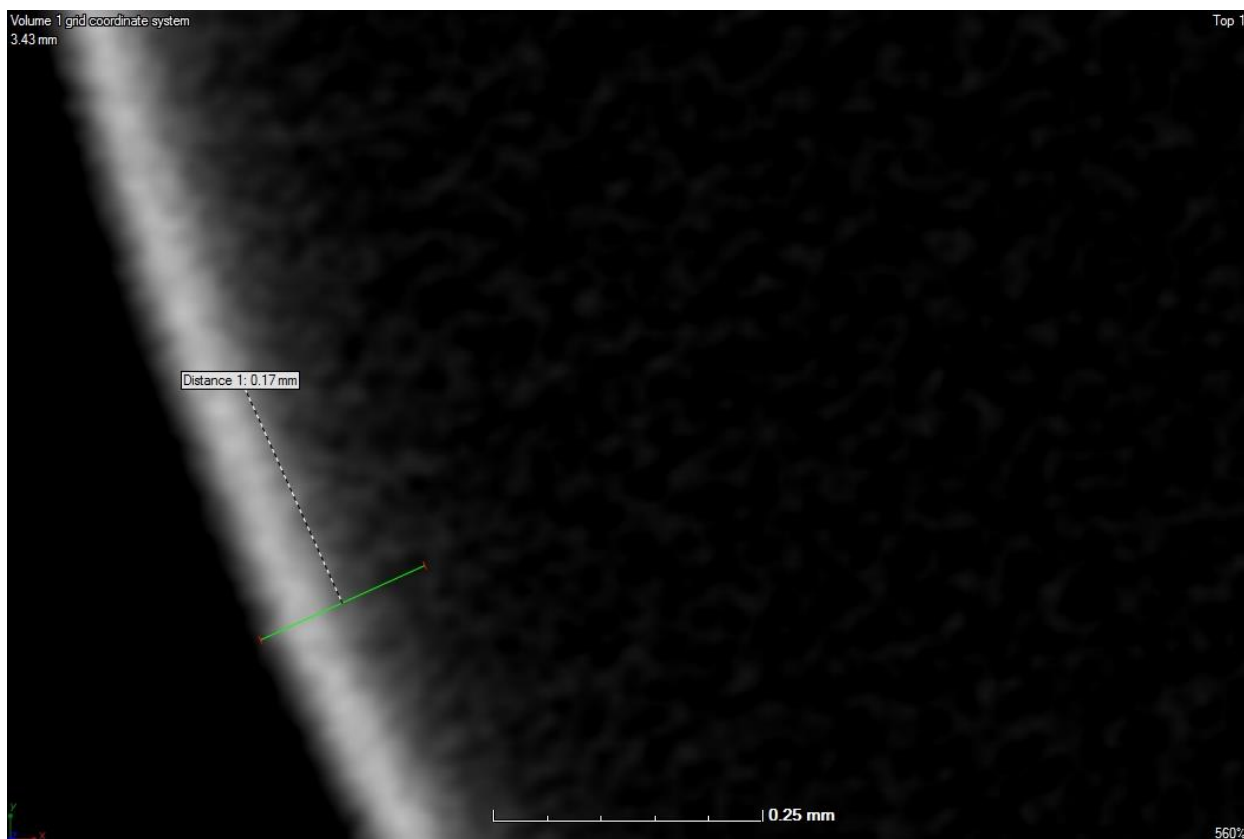
а) Изследван детайл



б) 3Д изглед и три сечения

Фиг. 39: Алуминиев детайл с хромово покритие

На фиг. 40 е показана дебелината на хромовото покритие (17 микрона).



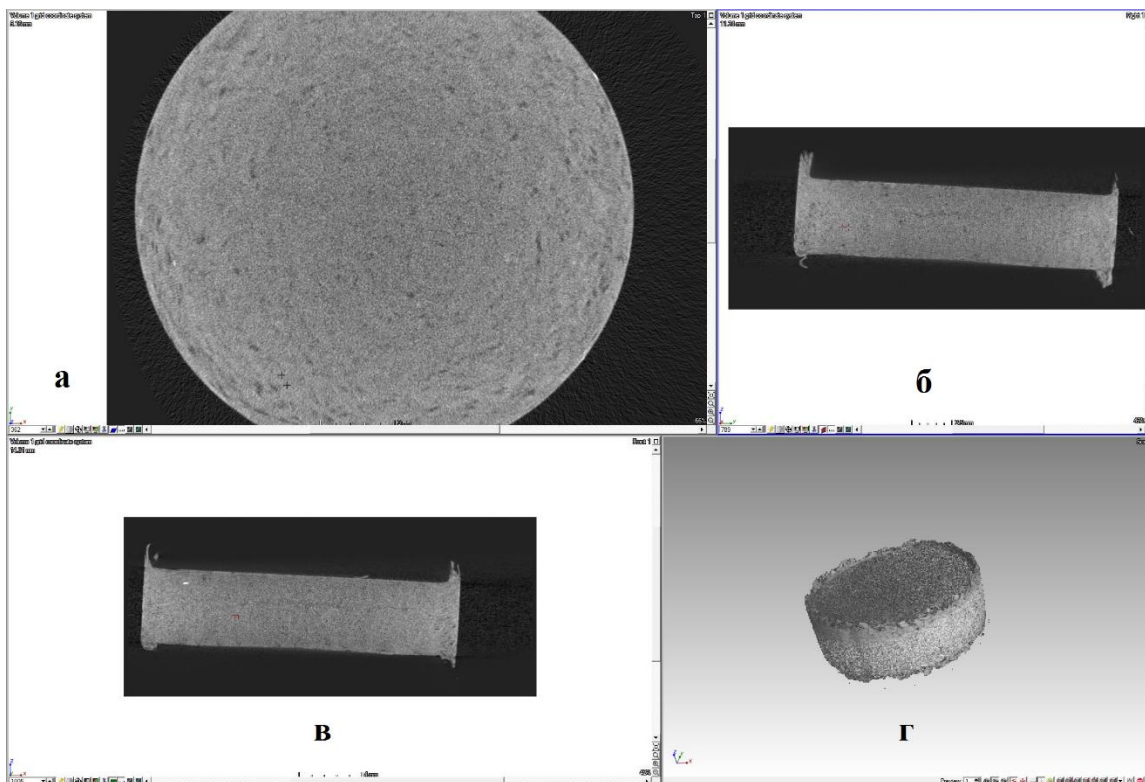
Фиг. 40: Дебелина на хромово покритие

4.4.2. Изследване на плътността на образци при брикетиране на стружки.

Разработен е метод за високоскоростно брикетиране на метални стружки и прахове с използването за задвижване на индустриален ракетен двигател. Изследвани са основно резултати от експерименти за ударно брикетиране на стружки от AL-сплав и сив чугун. Изследването е извършено в Лаборатория SMARTLAB на ИИКТ-БАН с Индустриален томограф ХТН 225, във връзка с проект по 7 РП на ЕС ACOMIN и проекти по линия на НФНИ-МОН.

4.4.2.1. Изследване на брикети от стружки на Al - сплав

Ще отбележим следните особености на получените брикети от стружки на Al – сплав, които може да се наблюдават на Фиг.41:



Фиг. 41: Снимки от Рентгенов Томограф на брикет от Al – сплав: а – напречно сечение в средата на брикета по височина; б, в – взаимноперпендикулярни вертикални сечения, през центъра на брикета; г – 3-D изображение

- Неплътностите (въздушни микропори) са предимно в периферията на брикета. В централната част (около $\frac{1}{2}$ от диаметъра) плътността е много добра – Фиг.39а.

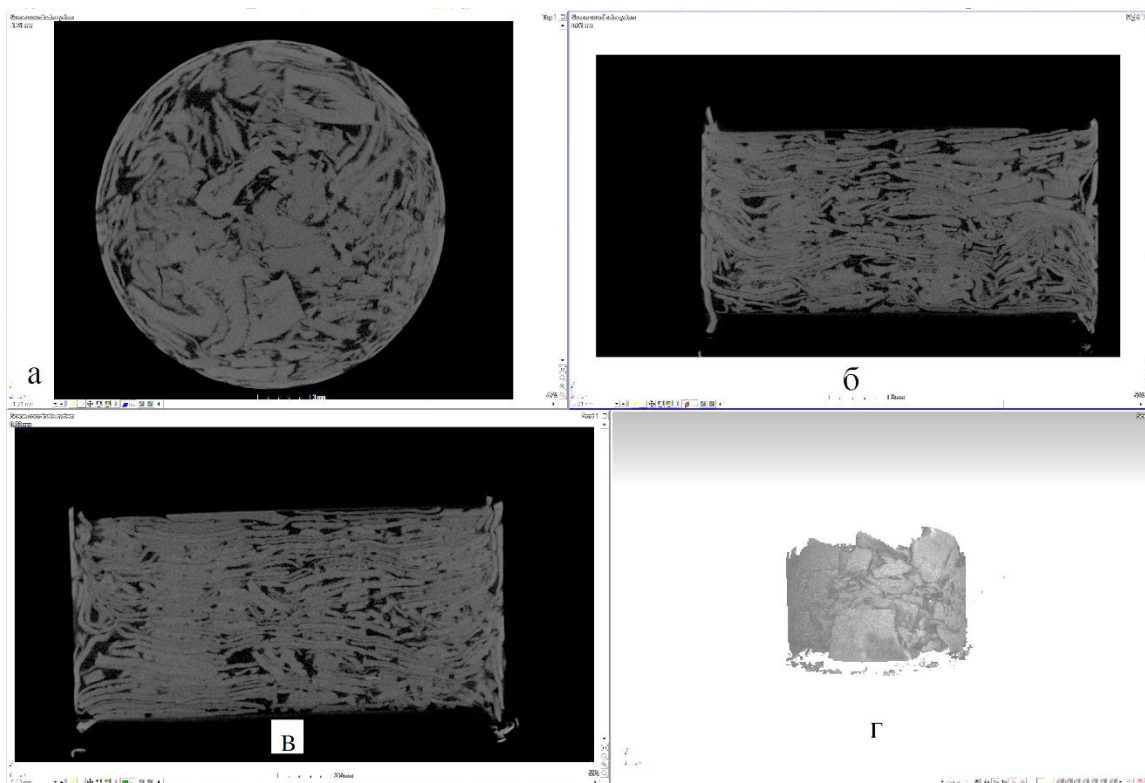
- От Фиг.41б,в се вижда, че най-голям обем от въздушни микропори има във външните области по височина. Това може да се обясни с изтласкването на въздуха от централните части към периферните, където е изхода на въздуха от матрицата (хлабината м/у матрицата и поансона). Поради малкото време на действие на ударната сила, за въздухът достигнал периферните области, няма достатъчно време да излезе извън брикета. Ако действието на ракетния двигател, продължи по-дълго време и тягата му R е достатъчно голяма, за да поддържа необходимото вътрешно налягане в брикета, под действие на което въздухът продължава да се движи до пълното му отстраняване, ще се създадат условия, за получаване на брикет с плътност много близка до плътността на монолитен

метал. Такъв брикет ще може да бъде използван за директно производство на детайли. Този въпрос се изследва по-долу.

- В средата по височина на сеченията показани на Фиг.Фиг.41б,в се вижда тънка начупена линия. Според нас това е признак за разслояване на метала, поради действие на пластични вълни на опън.

Разслояването не е от значение, при използване на брикетите за стопяване в пещ. По-долу ще бъдат представени резултати от експеримент, за премахване на този дефект чрез пластична деформация в случая, когато брикета се използва за получаване на детайли.

4.4.2.2. Изследване на брикети от стружки на сив чугун



Фиг. 42: Снимки от рентгенов томограф на брикет от чугун с маса 6 gr ($E_c =$): а – напречно сечение в средата на брикета по височина; б, в – взаимноперпендикулярни вертикални сечения, през центъра на брикета; г – 3-D изображение на брикет

От Фиг.42а,б,в, се вижда, че между чугунените стружки има големи области с въздух, които са неравномерно разпределени в обема на брикета; 3-D изображението от Фиг.42г показва слабо сцепление между стружките и лошо качество на брикета. Както беше показано по-горе, това се дължи на малката специфична енергия на удара E_s , която е над два пъти по-малка от необходимата енергия за получаване на брикет с максимална плътност.

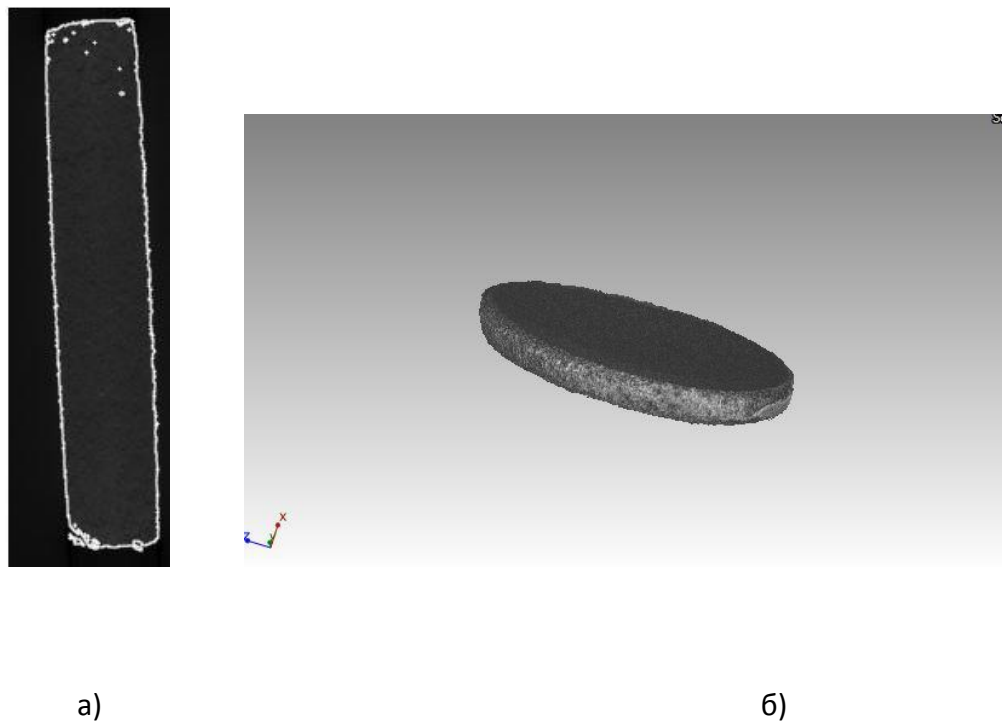
От Фиг. 42 се вижда също, че разположението на стружките в най-външния слой, който контактува с матрицата, е такова, че възпрепятства излизането на въздуха от брикета. Този ефект, според нас се определя от формата на стружките и лесно може да се отстрани, ако стружките са с по-малки размери. Това може да се постигне чрез смилане на стружките преди брикетиране, например в малка топкова мелница или ако се промени режима на рязане на металорежещата машина.

На Фиг. 43 са показани резултати от високоскоростно брикетиране на чугунени стружки.



Фиг. 43: Брикети от чугунени стружки с маса 3.5 gr

За разлика, на Фиг. 44 е показана снимка с рентгенов томограф на брикет от железен прах, деформиран чрез сплескване. Това показва, че при деформиране с натиск на брикети от железен прах, може да се постигнат по-големи степени на деформация, без да се получат дефекти на структурата (по-голяма плътност).



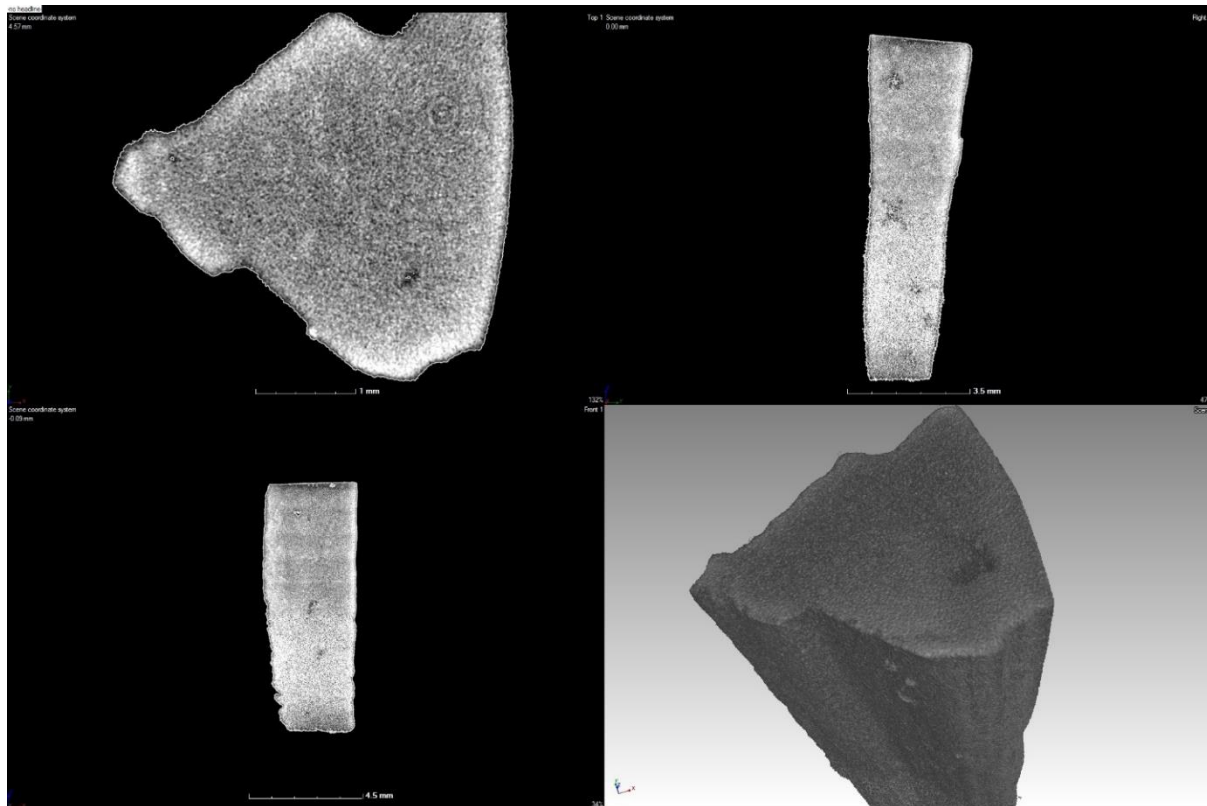
Фиг.44: Снимка с рентгенов томограф на брикет от железен прах, деформиран чрез сплескване: а – напречно сечение по височина през центъра на брикета; б – 3-D изображение

4.4.3. Изследване на плътност и вътрешни дефекти на сплави

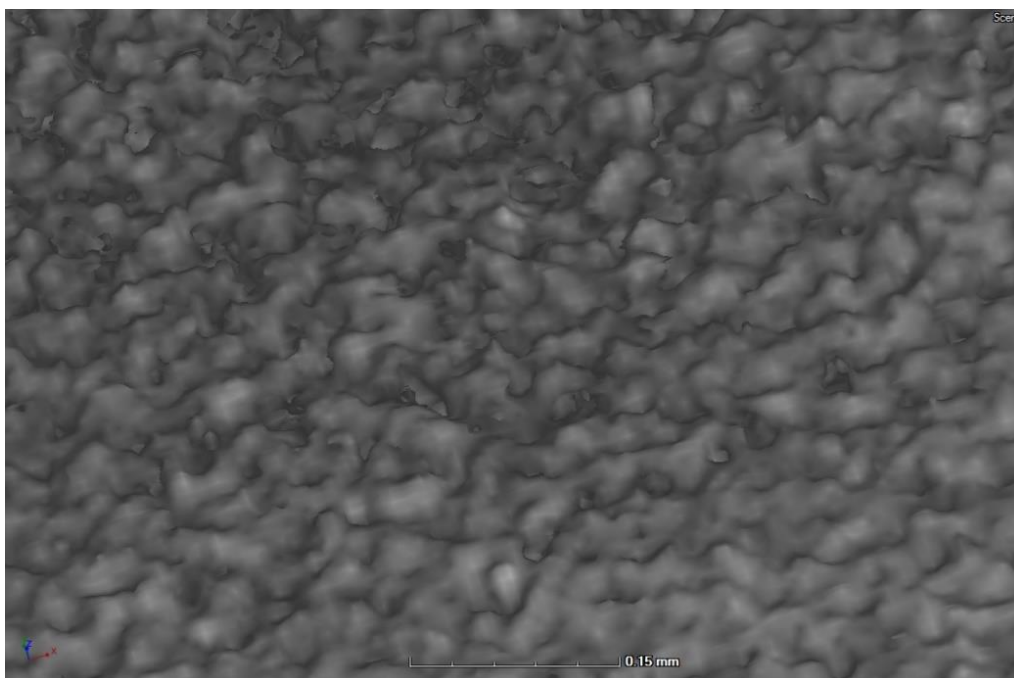
Изследването на вътрешната 3D структура на материали чрез компютърен томограф служи за измерване на плътност, намиране на дефекти, откриването на т.н. „дендрити“ (Фиг. 45) и др.

В природата рядко се срещат единични кристали (монокристали). При натрупване на отделните кристали се образуват кристални агрегати. Незакономерни са тези кристални агрегати, в които кристалите са срастнали един с друг в случайно неориентирано

положение, като например кристалните друзи и кристалните групи. При закономерните агрегати, положението на един индивид е подчинено на положението на другия или другите. Те се наричат кристални срастъци. Различават се паралелни и същински срастъци. Паралелни са тези срастъци, при които индивидите са разположени така, че техните стени и елементи са паралелни помежду си. При паралелното подреждане могат да се образуват: кристален щок, т. н. скептрово развитие, с разнищен край. Дендрити се образуват при бърза кристализация на разтвори и стопилки. Например зимно време на прозорците се образуват дендрити, които представляват перести образувания - субпаралелни срастъци от кристални скелети. Същински срастъци са тези, при които индивидите могат да се оглеждат в мислена огледална равнина, наречена срастъчна равнина. Има срастъци, при които при завъртане на отделните индивиди на 180° около мислената права те се припокриват. Мислената права се нарича срастъчна ос. Срастъчната равнина е винаги паралелна на налична или възможна стена в кристала.



a)



б)

Фиг.45: Дендрити, получени при алуминиеви образци: а–сечения и 3Дизглед, б)-дендрити

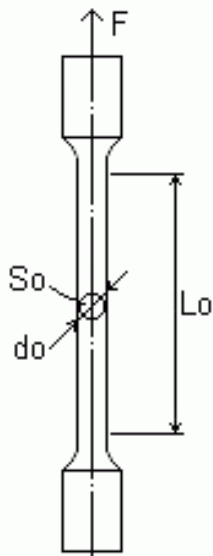
Предстои да бъдат направени още експерименти с различни наночастици, като очакванията са да се получават различни по размери дендрити.

4.4.4. Термографски изследвания за безразрушителен контрол

4.4.4.1. Измерване на отделена топлина при еластична деформация на метали

При еластична деформация на метални образци – Фиг. 46, не се изменя или разрушава вътрешната структура на образца. При прилагане на опън или натиск обаче се отделя топлина, а знанието за нейната стойност понякога е от голямо значение за правилното функциониране на съответното изделие. За отбелязване е, че еластичната (безразрушителна) деформация е много по-голяма при опън – до 20%, отколкото при натиск – 1-2%.

Изпитването на опън се отнася към статичните методи, при които натоварващата сила се увеличава плавно до някаква стойност, когато става за разрушаването като се използва хидравлична или електрическа преса. Пробното тяло (епруветката) има два края за захващане към изпитвателната машина и една работна зона, в която трябва да настъпи разрушаването. Тази зона е с начална (изчислителна) дължина L_0 , mm, начален диаметър d_0 , mm, и начална площ на сечението S_0 , mm² (фиг. 46а). На фиг. 46б се виждат опитни образци изработени от различни материали, както следва от горе на долу – армко желязо, стомана 45, чугун, алуминиева сплав и медна сплав. Различното в това изследване е че освен следене на нормалните параметри за тези изпитания (скорост на деформация, време за деформация, сила при скъсване и размери на пробното тяло след скъсване) ние проследяваме и температурата по дължина на образца в реално време. По този начин ще стане възможно да се определи отделената топлина и да се изчисли каква част от работата при подобен експеримент отива за деформация и каква се превръща в топлина.



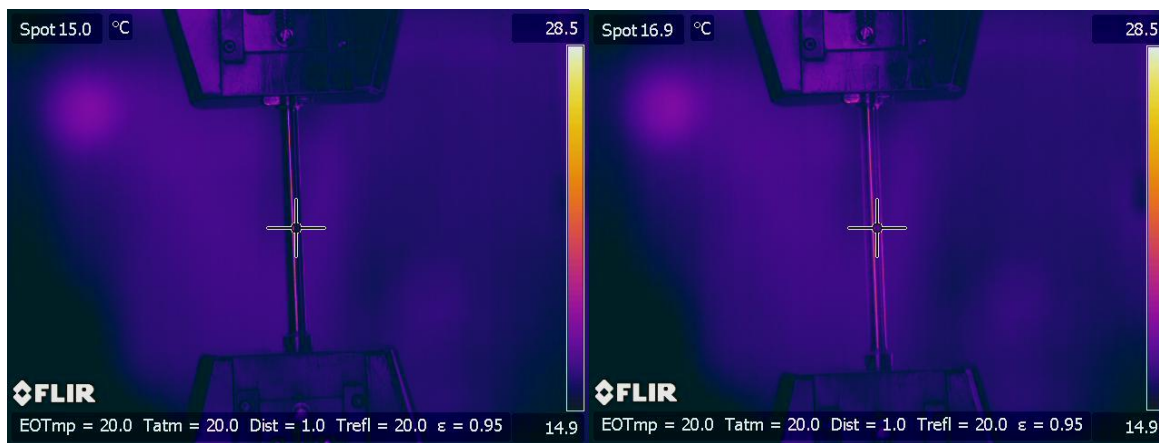
a)



б)

Фиг. 46: Образци за изпитания на опън: а) Общ вид на изпитваните образци, б) Образци изработени от различни материали

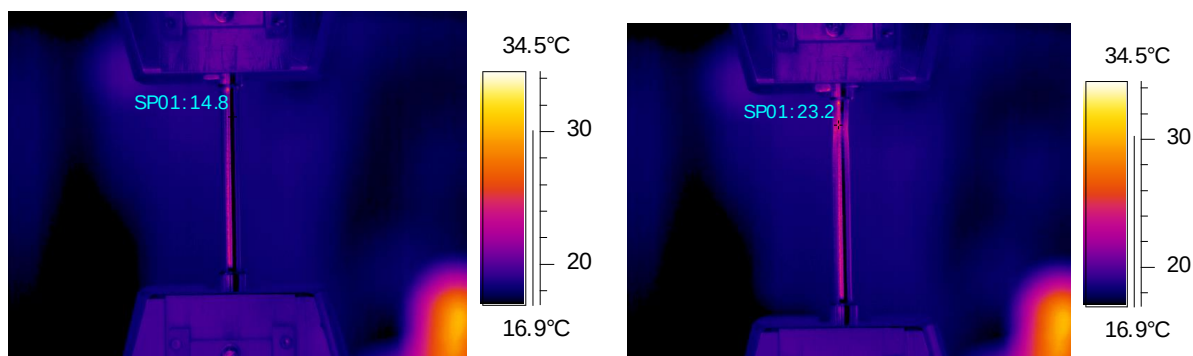
На фиг. 47 – 49 са показани термални картини на изпитваните образци, подложени на опън. Нагряването (1.9°C) на Фиг. 45 започва още в началото на опъна преди съществена деформация (удължаване).



а)

б)

Фиг. 47: Снимки от инфрачервена камера в различни стадии от натоварването на алуминиев образец. а) преди натоварване на опън, б) само при еластично натоварване (преди да настъпи пластична деформация)

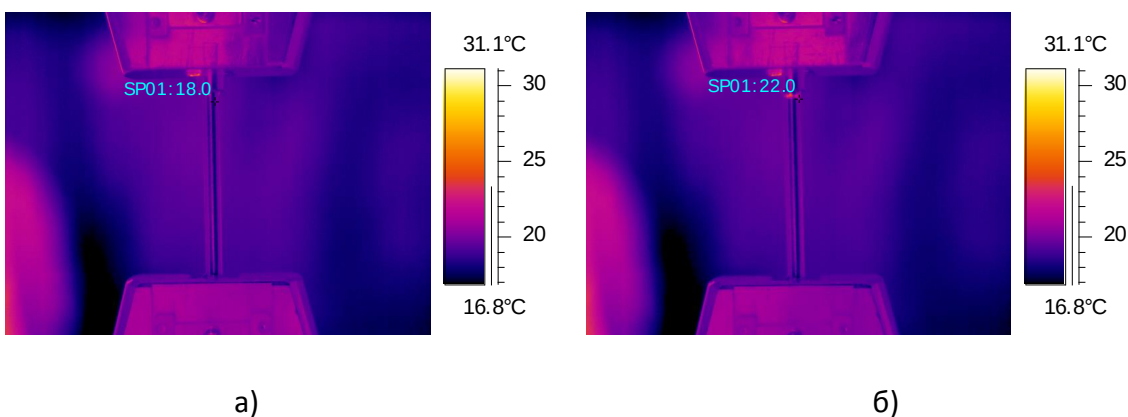


а)

б)

Фиг. 48. Снимки от инфрачервена камера в различни стадии от натоварването на образец от Армо железно а) преди натоварване на опън, б) само при еластично натоварване (преди да настъпи пластична деформация)

Опитите със Стомана 45 показаха аналогични резултати като тези с армко желязо, поради почти същото въглеродно съдържание и пластичност. При опитите с чугун резултатите са доста по-различни поради по-ниската пластичност на чугуна при него относителната деформация е минимална. Загряването на образца е около 4°C., както се вижда от фигура 49.



Фиг. 49: Снимки от инфрачервена камера в различен стадии от натоварването на образец от чугун а) преди натоварване на опън, б) само при еластично натоварване (преди да настъпи пластична деформация)

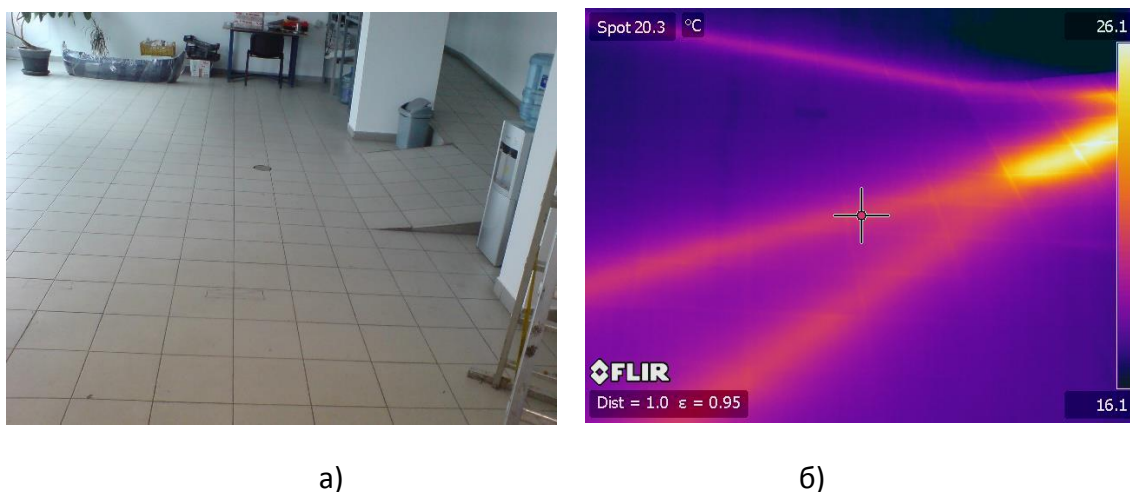
Изводи:

При изпитването на опън на по-пластични материали, деформацията на образца е по-голяма и температурата на загряване по-висока. Топлината, която се отделя не е равномерно разпределяна по дължина на образца, а е съсредоточена в мястото на образуване на шийка (за пластични материали). При непластични материали, загряването е минимално, както и деформацията затова би могло да се приеме, че отделяната топлина се разпределя равномерно по цялата дължина на образца.

4.4.4.2. Безразрушителна диагностика в строителството

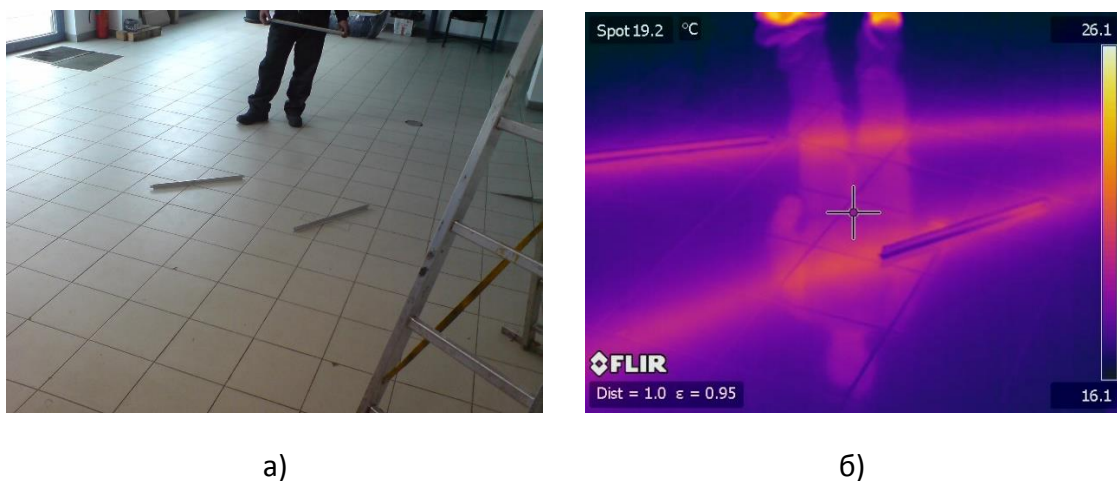
Термографските методи могат да се ползват например за откриване на тръби в подове и стени. Въпреки, че термоизображенията дават информация основно от повърхността на

изследвания обект, при температурна разлика над 2°C могат да се откриват източници на топлина (тръби на парно и топла вода) на дълбочина до 30 см под повърхността (под или стени). При температурна разлика в „-“, могат да се откриват и тръби със студена вода, течове или овлажнявания. На фиг. 50 е показана топологията на тръби под подовата настилка на цех във фирма СПЕСИМА ЕООД - София.



Фиг. 50: Топология на тръби във фирма СПЕСИМА: а) визуален изглед, б) термоизображение

На фиг. 51 е показано маркирането на положението на тръбите (с малки пръчки), с цел при пробиване за ремонт, поставяне на прегради и др. да не се предизвика пробив или авария.



Фиг. 51: Маркиране топологията на тръбите: а) визуален изглед, б) термоизображение

ГЛАВА 5. ДИСКУСИЯ, ПРИНОСИ И БЪДЕЩИ НАСОКИ:

Дискусия:

Тази дисертационна работа представя алгоритъм за подпомагане идентифицирането на региони на дефекти в томографско сканиране, които също могат да бъдат адаптирани към генерални дефекти при изображения в сивата скала. Понастоящем алгоритъмът изглежда достатъчно пригоден за използване от специалистите по въпросите за полуавтоматизиране на анализа на тези изображения, чрез намиране и характеризиране на размера и формата на потенциалните области на дефекти, които могат да бъдат потвърдени или отхвърлени от специалист. Допълнителни предложения за подобрения на алгоритъма, могат да му позволят да функционира напълно автономно и да анализира проби без човешки принос. Алгоритъмът на кръстосаната регресия е принос за анализа на изображението, който позволява прецизност на нивото на сигнала при идентифициране на много леки дефекти. Агрегираният тристепенен подход за кръстосаната регресия осигурява стабилно решение за откриване на дефекти, които могат да открият както много съществени, така и много малки отклонения, без да се губи прецизност.

Резултатите са обещаващи, с успешно идентифициране на съществуването на дефект в 92% от случаите, без да има случаи на фалшиви положителни региони. Средната покриваемост 88%, прецизност от 78%, RMSD от 11.2 и разстояние на Хаусдорф от 50 предполагат, че алгоритъмът може ефективно да идентифицира приблизителния размер, форма и местоположение на дефекти в томографски сканирания на въглеродни материали.

Приноси:

Приносите в дисертационния труд имат научно-приложен и приложен характер и са както следва:

- Направен сравнителен анализ на съществуващи методи за базразрушителен контрол и авторска систематизация на използваните техники,
- Анализирани са томографски методи за сканиране, направена е оценка на итеративни алгоритми за реконструкция на обекти и дефекти,
- Предложен е адаптиран алгоритъм за откриване на дефекти в композитни материали и метод за агрегиране, направен е анализ на процеса,
- Предложен е подход за оценка ефективността на метода и база за сравнение, направен е анализ на резултатите от изследването,
- Анализирани са видове тънки метални покрития, нанесени по различни методи, и е определена дебелината и равномерността им за конкретен потребител,
- Анализирана е плътността на образци при високоскоростно брикетиране на метални стружки и метален прах и е определено разслояването им за конкретен проект,
- Анализирана е вътрешната 3D структура, плътност и вътрешни дефекти на сплави с цел откриване на т.н. „дендрити“ за конкретен проект,
- Направени са термографски изследвания и безразрушителна диагностика в строителството при откриване топологията на тръби в подове и стени за конкретен потребител.

ГЛАВА 6. ПЛАН ЗА КОМЕРСИАЛИЗАЦИЯ НА НАУЧНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Бъдещи насоки:

Следваща стъпка е по-нататъшното тестване на алгоритъма с реални данни в лабораторна обстановка, за да се определи дали той дава резултати, подобни на тези от симулираните изображения, а за да се направи цялостна оценка на това, трябва да се направят визуални тестове от множество експерти, които да предоставят основа за оценка.

Съществуват няколко области на подобрение, които биха могли допълнително да обобщят този алгоритъм за откриване на аномалия, както и да подобрят неговата полезност в областта на NDE. Две подобрения, които биха подобрили способността на алгоритъма да се адаптира към различни типове материали и свойства на изображението, би било да се автоматизира размера на филтъра, както и степента на полином за регресионния модел. Графиките на отклоненията, произведени в глава 3, показващи стабилизирането на стандартното отклонение при увеличаване на размера на прозореца, могат да бъдат автоматизирани в инструмент, който изчислява такива графики за нова проба и локализира точката, в която се осъществява стабилизацията.

Недостатък на 5-степенния полиномен регресионен подход е, че може да се прилага за изображения със свойства, които са значително различни от тези, които са тествани. А потенциално решение на този проблем е да се замени силната множествена линейна регресионна техника с регресионен подход по части, която изчислява редица прави регресионни линии за всеки сигнал (създаване на нова линия всеки път, когато предишната линия вече не е добра, когато се добавят нови точки). Тези линии след това могат да бъдат изследвани, по възможност чрез техниката на клъстеризиране, за да се идентифицират линиите, които са по-стръмни и по-дълги, които могат да представляват

границите на дефекта. Това би отговорило на проблема с полиномната степен, както и вероятно ще помогне за идентифицирането на големи разслоявания.

Ако се поддържа стабилният полиномен подход, превключването на солидния метод на регресия от М-оценка до ММ-оценка може да помогне по-добре да се идентифицират големи райони на дефекти (Bellio и Ventura, 2015) , въпреки че тестовете показват, че това е за сметка на по-бавното време за изпълнение. Пример за резултат, използвайки оценката на ММ, е показан на Фигура 28. Друга изследователска пътека би била да се възползва от триизмерната природа на данните, за да се види дали добавянето на сигнали в третото измерение би могло да предостави допълнително вникване в проблема и дълбочина в z-измерение, за да осигурят полезни резултати. Други аспекти на теорията за статистически контрол на качеството могат да имат и приложения и да позволят откриването на още по-леки разслоявания. Например, разглеждайки мултивариантна експоненциално претеглена осреднена диаграма на пикселната стойност и локална вариацията би могла да даде допълнителна представа за точно откъде започва да се отклоняват сигналите от очакваната стойност. Допълнителните подобрения се отнасят до по-доброто охарактеризиране на дефекти. Веднъж щом дефектите са идентифицирани, по-нататъшни изследвания могат да помогнат да се разбере какъв вид щети представляват. Като се имат предвид достатъчно данни, би могло да бъде разработена невронна мрежа или друг клас могат да бъдат обучени автоматично да идентифицират аномалии от определен тип. Алтернативно, пространствената статистика може да се приложи региони с дефекти, ако се открият различни аномалии с различни характеристики.

Направеният анализ е проблемно ориентиран, като акцентира върху възможностите, методите и средствата за експлоатация и комерсиализация на резултатите от научните изследвания и за повишаване на тяхното търсене от практиката.

Дефиниране, анализ и оценка на основните проблеми

С увеличаващата се глобализацията на световния пазар конкуренцията се увеличава с нарастващият брой фирми, произвеждащи сходни продукти и услуги. Конкурентните

предимства се движат главно в две направления – качество и цена, като съотношението между тях решава дали фирмата ще работи в дългосрочно на пазара и ще успее да запази позициите си, респективно ще успее да завладее нови части.

Фирмите, където производството позволява автоматизация – масово производство, могат да оптимизират разходите си чрез увеличаване на произведената продукция и намаляване на средните разходите на единица продукция. С увеличаване на произведената продукция се увеличават и изискванията за контрол върху качеството, защото грешка в производствения процес може да доведе до брак на цялата произведена партида и да е свързано с високи разходи. Затова е важно да се автоматизира доколкото технологията позволява и процесът на контрол на качеството.

Същата тенденция за автоматизация, но с акцент върху минимизиране на човешки грешки, се наблюдава и при производството на части, към които са поставени много високи изисквания по отношение на тяхната надеждност, която е свързана с минимизиране на дефекти. Такива индустрии са например авиостроенето, където дефект в дадена част може да доведе до необратими последици, водещи до катастрофи и загуба на човешки живот.

В тези производства и в редица други, където се използват материали с висока стойност, освен автоматизацията на контрола като средство за увеличаване на качеството и надеждността на проверката, съществува и второ изискване – проверката на частта да не води до нарушаване на нейната цялост и да позволява по – нататъшната и пазарна реализация. Нарушаване на целостта на частта или повредата на нейните качества би довело до увеличение на разходите и увеличаване на загубите.

Типични области на използване на СТ в промишлеността са в откриването на недостатъци като пукнатини и анализ на частиците в материалите. В метрологията, СТ позволява измерване както на външните, така и на вътрешна геометрия на сложните части. Досега СТ е единствената технология, способна да измерва както вътрешната, така и външната геометрия на компонент, без да е необходимо неговото разрушение или раздробяване.

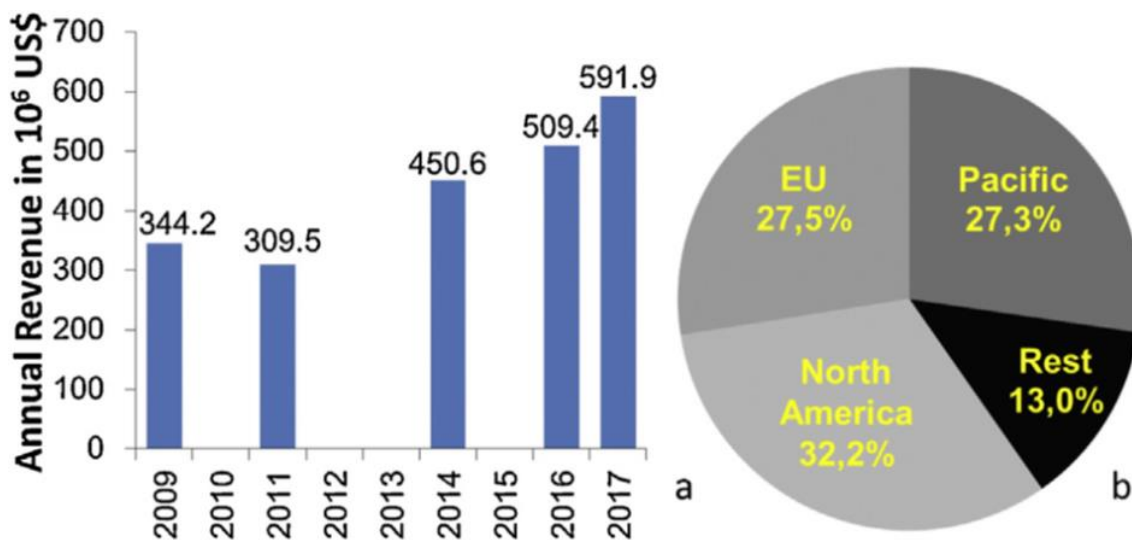
Като такава, това е единствената технология за промишлен контрол на качеството на обработвани детайли, които имат недостъпни вътрешни характеристики (например компоненти, произведен чрез производството на добавки) или мулти-материални компоненти (например двукомпонентни пластмасови части с впръскване или пластмасови части с метални вложки). СТ може да се счита за трето революционно развитие в координатната метрология, следвайки въвеждане на тактилни 3D координатно-измервателни машини (CMM) през седемдесетте години, и тази на оптичните триизмерни скенери през осемдесетте години. Броят на индустриалните приложения на СТ е голям и бързо расте.

Преглед на пазара - Идентифициране и оценка на потенциала за трансфер на нови знания и за експлоатация и комерсиализация на резултати от научните изследвания

Тук ще се даде кратък преглед за състоянието на техниката и предстоящите СТ технологии, обхващащи различни видове СТ системи, възможности за сканиране и технологични предимства. Те намират приложение в производствената индустрия, както и от други индустрии, например електрически и електронни устройства, нехомогенни материали, и от хранителната промишленост.

След разработването на първия СТ (наречен EMI сканиране) за целите на хуманната медицина в началото на седемдесетте години на миналия век от научен клон на британската EMI (британска мултинационална музикална компания), приложението му расте бързо. Технологията се подобрява значително и броят на внедрените системи се увеличи. Приложението в индустрията като метод за безразрушителен контрол (NDT) за проверка на технически обекти за пори и вътрешни дефекти е открито през осемдесетте години, но има малък принос. Недостатък при конвенционалните 2D рентгенови системи е наличието на филм, който е преодолян при високо напредналите цифрови системи с 2D рентгенови панели за откриване и компютърна оценка. Използването при изследване на 2D дефекти (недостатъци), и проверка за пълнота в електронно производство, например при печатни електронни платки (PCBs), както и технология за повърхностен монтаж (SMT), на следващ етап води до значително увеличаване на приложението на СТ системи.

Прилагането на СТ за триизмерни измервания е затруднено поради липса на точност. Проблемът с 3D точността и проследимостта е преодолян чрез прилагане на конвенционална 3D координатна измервателна система за калибриране и проследимост, и нов метод за извършване и оценка на измерванията с добра точност. Първата координатна измервателна машина с устройството за рентгенови лъчи, разработено от Werth Messtechnik, е представена на пазара по време на международния панаир "Контрол" (Щутгарт, Германия) през 2005 г. Бързо и точно (в диапазона от микрони) измервания на целия детайл с няколко стотици отклонения (дори вътре в кухи детайли) сега са възможни. В днешно време прилагането на СТ в промишлеността обхваща контрол на качеството, с основна цел за измерване на размерите и откриване на дефекти. Днес цифровите рентгенови системи са често срещани в медицинските приложения, но индустриалните цифрови рентгенови системи за проверка все още са зараждащ се пазар. Развитието на КТ в медицината може да бъде разглеждано като предшественик на рентгенови системи в индустриалния пазар. Независимо от това, нуждите и изискванията в промишлеността за СТ метрологията са доста различни от тези в медицинските области (главно точност и проследяемост). Фигура 52а показва, че пазарът за промишлени цифрови рентгенови инспекционни системи е оценен от Frost and Sullivan през 2009 г. за 344,2 милиона щатски долара, за 2011 година - 309,5 милиона, за 2014 г. е 450,6 милиона щатски долара, а за 2016 г. е 509,4 милиона щатски долара, а за 2017 г. е 591,9 милиона щатски долара.



Фигура 52. Пазарни данни. а) Тенденция за годишните приходи от индустриални системи за тестване и контрол; б) глобално разпространение на инсталирани СТ системи.

(MarketResearch.com, Фрост & Съливан, NDT.net)

Пазарът на промишлени рентгенови системи за тестване през 2017 г. възлиза на 591.9 млн.долара (Фрост&Съливан). Комбинираният коефициент на годишен ръст (CAGR) от 2009 г. до 2017 г. е около 7%, което е значително по-високо от CAGR като цяло. Глобалното географско разпределение на инсталираните системи през 2017 е показано на фигура 2b. Повечето инсталации са в Северна Америка, Европа и Япония. Бъдещо развитие на пазара ще се наблюдава главно в Индия и Китай, както и в Русия, Бразилия и Южна Африка (държави от BRIC). Тенденциите на пазара за промишлени СТ могат да се видят от две гледни точки: Приложенията в съществуващи клонове се разширяват поради нови изисквания във водещите в технологиите области като космическата, автомобилната и транспортната индустрия. В производството общата производителност и ефикасността на производствените процеси трябва да се подобрят чрез заместване на конвенционалните машините за измерване на координати (СММ) от СТ системи. Ново по-всеобхватни и по-гъвкави решения ще подпомогнат увеличаването на пазара с такива приложения. В електрониката и микроелектрониката се сблъскваме с нови предизвикателства в увеличаването на икономиката и изчерпателността на проверките. Иновационните системи ще могат да проверяват пълнотата на устройства, на схеми и - с подходящи системи - и на всяка точка на запояване, дори на нови устройства със скрити точки на запояване. Значителен брой системите за компютърна томография ще са необходими, за да осигурят търсенето на адаптивни решения. Могат да бъдат идентифицирани нови пазари. Нарастващ нов голям пазар е хранителната промишленост. Интегрирането на СТ в опаковъчните линии може да се провери съдържанието на вакуумно - запечатани опаковки, кутии или консервирани буркани малко преди доставката. Включването на замърсители като стъкло, метал, камък и други могат да бъдат открити. Освен това, в предприятията за месопреработка и преработката на месо, всяко парче месо може да

бъде тествано за съдържанието на скрита мазнина и костите и цената може да бъде изчислена съответно. Има приложение при откриването на експлозиви и други опасни материали, не само при летищата и корабните терминали, но и за железопътни гари, обществени сгради, като съдебни сгради, училища и други привлекателни туристически забележителности, както и фабрики. При нови материали като метална пяна и CFRP (подсилена с въглеродни влакна пластмаса) и други композитни материали, където СТ ще позволи нови технически решения. Процедури за тестване на тези материали като както и за тестване на компонентите трябва да следват технологията, което води до значителен пазарен дял на промишлени СТ системи.

Анализ на възможните начини и средства за трансфер на знания и експлоатация и комерсиализация на интелектуалната собственост, разработване на адекватни решения за постигане на целите.

Томографията е метод за безразрушително тестване, които позволява с помощта на подобрени алгоритми за обработка на резултатите, процесът на откриване на дефекти да се автоматизира до голяма част, позволявайки участието на човешки експерт да се минимизира, което оптимизира разходите и обективизира процеса.

Оптимално решение е когато алгоритмите автоматизират процеса на обработка на резултатите и идентифицират регионите на възможни дефекти и техният тип, като експертът преглежда само крайните заключения.

Проведени са първични разговори с представители на Русенския технически университет Ангел Кънчев за доразвиване на алгоритъма и практическото му използване при тестването на части от автомобилната индустрия. Целта е развиване на индустриалната инфраструктура, защото в района има потенциал за развитие и незаети ниши по отношение на напреднали техники за тестване на продукция в машиностроенето. Близостта на региона с Румънската граница и развити райони в съседната страна в машиностроенето предразполага развитието на междуграничен научен обмен и привличане на потенциално заинтересовани фирми от страната съседка.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Adams, R., Cawley, P., Pye, C., & Stone, B. (1978). A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 20(2), 93-100.
2. Aggelis, D. G., & Paipetis, A. S. (2012). Monitoring of resin curing and hardening by ultrasound. *Construction and Building Materials*, 26(1), 755-760. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.084>
3. Aidi, B., Philen, M. K., & Case, S. W. (2015). Progressive damage assessment of centrally notched composite specimens in fatigue. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 74(0), 47-59. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.03.022>
4. Albert, J. and Rizzo M.. R, *By Example*. New York, NY: Springer, 2012.
5. Alma, O. G., Comparison of robust regression methods in linear regression, in: *Int. J. Contemp. Math. Sciences* 6 (9 2011), pp. 409-421
6. Arias-Castro, E. and Donoho, D. L., Does median filtering truly preserve edges better than linear filltering?, *The Annals of Statistics* 37 (3 2009), pp. 1-36.
7. Arumugam, V., Kumar, C. S., Santulli, C., Sarasini, F., & Stanley, A. J., A Global Method for the Identification of Failure Modes in Fiberglass Using Acoustic Emission, (2011), *Journal of Testing and Evaluation*, 39(5).
8. Ataş, A., & Soutis, C. (2013), Subcritical damage mechanisms of bolted joints in CF
9. Bay, H.; Ess, A. & Tuytelaars, T. et al. (2008), SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)* 110 (3), pp. 346–359.
10. Bayraktar, E., Antolovich, S. D., & Bathias, C., New developments in non-destructive controls of the composite materials and applications in manufacturing engineering. *Journal of Materials Processing Technology*, (2008), 206(1–3), 30-44.
11. Bellio, R. and Ventura, L., *An Introduction to Robust Estimation with R Functions*, accessed: 2015-03-01. 2005, URL: <http://www.dst.unive.it/rsr/BelVenTutorial.pdf>. **BIBLIOGRAPHY 64**
12. Bennett, L. G. I., Lewis, W. J., & Hungler, P. C. (2013). The Development of Neutron Radiography and Tomography on a SLOWPOKE-2 Reactor. *Physics Procedia*, 43, 21-33. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.003>

13. Bennett, K. P., Mangasarian, O. L., Robust linear programming discrimination of two linearly inseparable sets. *Optimization Methods and Software* 1, pp. 23–34, (1992), (Gordon & Breach Science Publishers).
14. Bollmann, V., Jain B. et al., Boundary Learning By Optimization with Topological Constraints, in: 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2010), pp. 2488-2495.
15. Bossi, R. H., & Giurgiutiu, V. (2015). 15 - Nondestructive testing of damage in aerospace composites. In P. E. Irving & C. Soutis (Eds.), *Polymer Composites in the Aerospace Industry* (pp. 413-448): Woodhead Publishing.
16. Bull, D. J., Spearing, S. M., Sinclair, I., & Helfen, L. (2013). Three-dimensional assessment of low velocity impact damage in particle toughened composite laminates using micro-focus X-ray computed tomography and synchrotron radiation laminography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 52(0), 62-69. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.05.003>
17. Burkle, W. S., & Lemle, L. P.(1993).The Effect of Order-of-Film Placement in Composite Film Radiography. *Materials Evaluation*,51(3), 327-29
18. Campbell, F. C., *Structural Composite Materials*. Materials Park, OH: ASM International, 2010.
19. Cantatore, A. and Muller, P., *Introduction to computed tomography.*, Kongens Lyngby, Denmark: DTU Mechanical Engineering, 2011.
20. Cardoso dos Santos LG., Kawano Y., Degradation of Polyacrylonitrile by X-ray Radiation, *Polymer Degradation and Stability*, (1994), 44–1:27–32.
21. Carmignato, S., Dreossi, D., Mancini, L., Marinello, F., Tromba, G., Savio, E., Testing of X-ray Microtomography Systems Using a Traceable Geometrical Standard, *Measurement Science and Technology*, (2009), 20:084021.
22. Carmignato, S., Voltanq A., Savio, E., Metrological Performance of Optical Coordinate Measuring Machines under Industrial Conditions, (2010), *CIRP Annals* 59(1):497–500.
23. Castaings, M., & Hosten, B. (2008). Ultrasonic guided waves for health monitoring of high-pressure composite tanks. *NDT & E International*, 41(8), 648-655. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.03.010>
24. Cawley, P., & Adams, R. D. (1979). The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 14(2), 49-57.
25. Cawley, P., & Adams, R. D. (1978). The predicted and experimental natural modes of free-free CFRP plates. *Journal of Composite Materials*, 12(4), 336-347.
26. Chan, T. and Vese, L., Active contours without edges, in: *IEEE Transactions on Image Processing* 10 (2 2001), pp. 266-277.
27. Chang, C.-I and Chiang, S.S., Anomaly detection and classification for hyperspectral imagery, in: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40 (6 2002), pp. 1314-1325.

28. Chantler, Detailed Tabulation of Atomic Form Factors, Photoelectric Absorption and Scattering Cross Section, and Mass Attenuation Coefficients in the Vicinity of Absorption Edges in the Soft X-Ray Addressing Convergence Issues of Earlier Work, *Journal of Physical and Chemical Reference*, (2000), Data 29(4):597–1048.
29. Christoph, R., Neumann, H-J., *Multisensor Coordinate Metrology*, 2nd ed., (2007), SV Corporate Media, Munich.
30. Christoph R., Neumann HJ., *X-ray Tomography in Industrial Metrology*, Su"ddeutscher Verlag onpact GmbH, Munich, (2011), ISBN: 978-3-86236-020-8.
31. Crow, F. C., Summed-area tables for texture mapping, *Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, (1984), pp. 207–212, ACM. DOI:10.1145/800031.808600.
32. De Chiffre, L., Carmignato, S., , Kruth, J.P., Schmitt, R., Weckenmann, A. , *Industrial applications of computed tomography*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) pp. 655–677
33. DeGroot, M. H. and Schervish, M. J., *Probability and Statistics: Fourth Edition*, Boston, MA: Addison-Wesley, (2012).
34. Ducharne, B., Guyomar, D., Sébald, G., & Zhang, B., Modeling energy losses in power ultrasound transducers. In J. A. Gallego-Juárez & K. F. Graff (Eds.), *Power Ultrasonics* (pp. 241-256). Oxford: Woodhead Publishing, (2015)
35. El-Sabbagh, A., Steuernagel, L., & Ziegmann, G., Characterisation of flax polypropylene composites using ultrasonic longitudinal sound wave technique, *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1164-1172, (2013), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.010>.
36. Feklistova, L. and Hein, H., Delamination identification using machine learning methods and haar wavelets, in: *Computer Assisted Methods in Engineering and Science* 19 (2012), pp. 351-360.
37. Forsyth, D., Yolken, H. T., and Matzkanin, G., A brief introduction to nondestructive testing, in: *AMMTIAC Quarterly* 1.2 (2006), pp. 7-10. BIBLIOGRAPHY 65
38. Fotsing, E. R., Ross, A., & Ruiz, E. (2014). Characterization of surface defects on composite sandwich materials based on deflectrometry. *NDT & E International*, 62, 29-39. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.11.004>
39. Garney, G., *Defects found through non-destructive testing methods of fiber reinforced polymeric composites*. (1438996 M.S.), California State University, Fullerton, Ann Arbor, (2006), <http://search.proquest.com/docview/304910161?accountid=28930> ProQuest Dissertations & Theses Global database.
40. Genovés, V., Gosálbez, J., Miralles, R., Bonilla, M., & Payá, J., Ultrasonic characterization of GRC with high percentage of fly ash substitution, (2015), *Ultrasonics*, 60, 88-95. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2015.02.016>

41. Ghadermazi, K., Khozimeh, M. A., Taheri-Behrooz, F., & Safizadeh, M. S. (2015). Delamination detection in glass–epoxy composites using step-phase thermography (SPT). *Infrared Physics & Technology*, 72, 204-209. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2015.08.006>
42. Gholizadeh, S., A review of non-destructive testing methods of composite materials, *Procedia Structural Integrity* 1 (2016) 050–057, ScienceDirect, 10.1016/j.prostr.2016.02.008
43. Gholizadeh, S., Leman, Z., & Baharudin, B. T. H. T. , A review of the application of acoustic emission technique in engi neering, (2015), *Structural Engineering and Mechanics, An International Journal*, 54(6), 1075-1095.
44. Gyoshev S., Ivanova D., Иновативни методи и средства за високоскостно брикетиране на метален скрап., *International Scientific Conference “High Technologies, Business. Society 2016”*, Borovets, Bulgaria, 14-17 March 2016, стр. 8-11, ISSN 1310-3946
45. Gyoshev S., Ivanova D.. Експериментално изследване на процеса уплътняване на железен прах. Анализ на получените резултати с 3D томограф. *Machines, technologies, materials*, 2017, ISSN:1310-3946, PP 208-211
46. Giurgiutiu, V. (2016). Chapter 5 - Damage and Failure of Aerospace Composites. In V. Giurgiutiu (Ed.), *Structural Health Monitoring of Aerospace Composites* (pp. 125-175). Oxford: Academic Press.
47. Goebbels J, Zscherpel Z, Proc. of Int. Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, (2011) 978-3-940283-34-4.
48. Gondrom, S., Schroepfer, S., Digital Computed Laminography and Tomosynthesis – Functional Principles and Industrial Applications. Proc. of International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology. DGZfP Proceedings BB 67-CD, Berlin, March, 15–17, 1999.
49. Goodman, D.M., Jackson, J.A., Aufderheide, M.B, Johansson, E. M., Image Recovery Techniques for X-Ray computed Tomography in Limited – Data Environments, , Non-destructive evaluation, reprinted from *Engineering Research, Development and Technology* FY97 UCRL 53868, 1998, pp. 1-7
50. Gordon, R., Bender, R., Herman, G., Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and x-ray photography, *Journal of Theoretical Biology*, (1970), 29 (3): 471–81. doi:10.1016/0022-5193(70)90109-8. PMID 5492997.
51. Gostautas, R., Ramirez, G., Peterman, R., & Meggers, D. (2005). Acoustic Emission Monitoring and Analysis of Glass Fiber-Reinforced Composites Bridge Decks. *Journal of Bridge Engineering*, 10(6), 713-721.
52. Grondel, S., Assaad, J., Delebarre, C., & Moulin, E. (2004). Health monitoring of a composite wingbox structure. *Ultrasonics*, 42(1–9), 819-824.
53. Herman, Gabor T., *Fundamentals of computerized tomography : image reconstruction from projections* (2nd ed.), Dordrecht: Springer, (2009), ISBN 978-1-85233-617-2.
54. Hsieh J., *Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances*, 2nd ed. Hoboken, (2009), John Wiley & Sons.

55. Hufenbach, W. B., R. Thieme, M. Tyczynski, T., (2011), Damage monitoring in pressure vessels and pipelines based on wireless sensor networks, *Procedia Engineering*, 10, 340-345. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.058>
56. Hung, Y. Y., Yang, L. X., & Huang, Y. H. (2013). 5 - Non-destructive evaluation (NDE) of composites: digital shearography. In V. M. Karbhari (Ed.), *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites* (pp. 84-115): Woodhead Publishing.
57. Huttenlocher, D. P., Klanderman, G. A. , and Rucklidge, W. J., Comparing images using the Hausdorff distance, in: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 15 (9 1993), pp. 850-863.
58. Ibarra-Castanedo C., Genest M., Piau J.-M., Guibert S., Bendada A., Maldague X.: Active infrared thermography techniques for the nondestructive testing of materials Chapter XIV of the book: "Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization", ed. Chen CH pp. 325-348, 2007.
59. Ivanova Y. D, Bogomil Popov, Dimitar Karastoyanov – Non destructive testing of materials and alloys obtained by high temperature technologies including nano elements, *Automation And Mechatronics'17*, ublished in: *Problems of Engineering Cybernetics and Robotics*, Academy Publishing House Marin Drinov, Sofia, 2017, vol. 68, pp 3-14
60. Islam, M M. et al., Anomaly based vessel detection in visible and infrared images, in: *Proceedings in SPIE: Image Processing: Machine Vision App Jolly**, MR., Prabhakar, A., Sturzu, B. , Hollstein, K., Singh, R., Thomas, S., Foote, P. & A. Shaw Jolly et al., *Review of Non-destructive Testing (NDT) Techniques and their applicability to thick walled composites*, *Procedia CIRP* 38 (2015), pp. 129 – 136liation, 2 7251 (2009).
61. Kalender WA, *Computed Tomography: Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications*, John Wiley & Sons, (2011).
62. Kalinichenko, N. P., Kalinichenko, A. N., Lobanova, I. S., & Borisov, S. S. (2013). Methods for the manufacture of nonmetallic reference specimens for liquid-penetrant inspection. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 49(11), 668-672.
63. Karabutov, A. A., & Podymova, N. B. (2014a). Quantitative analysis of the influence of voids and delaminations on acoustic attenuation in CFRP composites by the laser-ultrasonic spectroscopy method. *Composites Part B: Engineering*, 56(0), 238-244.
64. Karastoyanov, D., Ivanova, D., Stoimenov, N., *Technology for Production of High Temperature Materials and Alloys Including nano Elements*, *International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computer*, CSCC'15; 15.07.2015 – 21.07.2015, Zakynthos, Greece, pp 177-181, ISSN 1790-5117
65. Kastner J., (Ed.), *Proc. of Int. Conf. on Industrial Computed Tomography – iCT 2012*, (2012), ISBN: 978-8440-1281-1.

66. Katunin, A., Danczak, M., & Kostka, P. (2015). Automated identification and classification of internal defects in composite structures using computed tomography and 3D wavelet analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(2), 436-448.
67. Katunin, A., Dragan, K., & Dziendzikowski, M. (2015). Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various nondestructive testing techniques. *Composite structures*, 127(0), 1-9. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.080>
68. Keller, J.M., Grey, M.R., Givens, J.A., A fuzzy K-nearest neighbor algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* (Volume: SMC-15, Issue: 4, July-Aug. 1985), pp. 580-585. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6313426/?reload=true>
69. Kersemans, M., De Baere, I., Degrieck, J., Van Den Abeele, K., Pyl, L., Zastavnik, F., Van Paepegem, W. (2014). Nondestructive damage assessment in fiber reinforced composites with the pulsed ultrasonic polar scan. *Polymer Testing*, 34, 85-96.
70. Koyama, K., Hoshikawa, H., & Kojima, G. (2013). Eddy Current Nondestructive Testing for Carbon Fiber-Reinforced Composites. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 135(4), 041501-041501. doi: 10.1115/1.4023253
71. Kroeger, T. (2014). Thermographic inspection of composites. *Reinforced Plastics*, 58(4), 42-43.
72. Kruth J-P., Bartscher M., Carmignato S., Schmitt R., De Chiffre L., Weckenmann A., Computed Tomography for Dimensional Metrology. *CIRP Annals*, (2011), 60(2):821-842.
73. Kurfiss M., Streckenbach G., 3-Dimensional X-ray Inspection of Very Large Objects – 600 kV Digital Laminography Offers a Solution. 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa.
74. Liao T. W., Y. Li. In: *NDT & E International* 31 (3 1998), pp. 183-192.
75. Lewis, J. P., Fast template matching, *Vision Interface* 95, (1995), pp. 120-123, Canadian Image
76. Lockard, C. D., Anomaly detection in radiographic images of composite materials via crosshatch regression, (2015), (1586713 M.A.), Mills College, Ann Arbor. Retrieved from ProQuest Dissertations & Theses Global database.
77. Loutas, T. H., Panopoulou, A., Roulias, D., & Kostopoulos, V. (2012). Intelligent health monitoring of aerospace composite structures based on dynamic strain measurements. *Expert Systems with Applications*, 39(9), 8412-8422. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.179>
78. Lu, Y., Non-destructive Evaluation on Concrete Materials and Structures using Cement-based Piezoelectric Sensor. (3457480 Ph.D.), Hong Kong University of Science and Technology (Hong Kong), Ann Arbor, (2010), <http://search.proquest.com/docview/880396184?accountid=28930> ProQuest Dissertations & Theses Global database.

79. Maass, N., Stephan, J., Computed Tomography on Large Objects – Theoretical and Practical Solutions with Extended Field of View and ROICT, Conference Industrial Applications of CT Scanning at DTU, (2012), Lyngby, Denmark.
80. Maierhofer, C., Myrach, P., Reischel, M., Steinfurth, H., Röllig, M., & Kunert, M. (2014). Characterizing damage in CFRP structures using flash thermography in reflection and transmission configurations. *Composites Part B: Engineering*, 57(0), 35-46.
81. Mangasarian, O. L., Setiono, R. and Wolberg W.H. (1990), Pattern recognition via linear programming: Theory and application to medical diagnosis. In *Large-scale Numerical Optimization* eds Thomas F. Coleman and Yuying Li, SIAM Publications, Philadelphia, pp 22–30.
82. Mayer, R. M., & Council, D. (1993). *Design with Reinforced Plastics: A Guide for Engineers and Designers*: Springer Netherlands.
83. McDonald, S., Robot ISAAC will help NASA Langley speed toward innovation, accessed: 2015-03-25, <http://www.nasa.gov/larc/robot-isaac-will-help-nasa-langley-speed-toward-innovation>.
84. Mckuur, G. (2006). *Defect and Fracture Detection Using Acoustic Emission Monitoring*: University of Cape Town.
85. Meer P., Rosenfeld, D., and Kim, D. Y., Robust regression methods for computer vision: A review, in: *International journal of computer vision* 6 (1 1991), pp. 59-70.
86. Meo, M., Zumpano, G., Piggott, M., & Marengo, G. (2005). Impact identification on a sandwich plate from wave propagation responses. *Composite structures*, 71(3–4), 302-306. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.09.028>
87. Meola, C., & Carlomagno, G. M. (2014). Infrared thermography to evaluate impact damage in glass/epoxy with manufacturing defects. *International Journal of Impact Engineering*, 67(0), 1-11. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.12.010>
88. Meyendorf, N.G.H., P.B. Nagy, and S. Rokhlin (2013), *Nondestructive Materials Characterization: With Applications to Aerospace Materials*: Springer Berlin Heidelberg.
89. Montgomery, D. C., *Introduction to Statistical Quality Control*: 6th Edition, Hoboken, NJ: Wiley, 2009, pp. 401-402.
90. Mulaveesalaa, R., & Tuli, S., *Applications of Frequency Modulated Thermal Wave Imaging For Non-destructive Characterization*, Kollam, Kerala, (2008).
91. Narita, F., Shindo, Y., Takeda, T., Kuronuma, Y., & Sanada, K. (2014). Loading Rate-Dependent Fracture Properties and Electrical ResistanceBased Crack Growth Monitoring of Polycarbonate Reinforced with Carbon Nanotubes Under Tension. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(1).
92. Natterer, F. , *The mathematics of computerized tomography*. Stuttgart: B.G. Teubner, (1986). , ISBN 0-471-90959-9.

93. Newswire, P. (2013, 2013 Feb 07). Global Non-Destructive Testing (NDT) Equipment Market - By Technology (Ultrasonic, Eddy Current, Electromagnetic, Radiography, Thermography), Verticals (Manufacturing, Petrochemical, Aerospace, Automotive, Power Generation) & Geography (2013 - 2018), PR Newswire.
94. Oguma, I., Goto, R., & Sugiura, T. (2012). Ultrasonic inspection of an internal flaw in a ferromagnetic specimen using angle beam EMATs. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88(7B), 78-81.
95. Peng, T. et al., A novel Bayesian imaging method for probabilistic delamination detection of composite materials, in: *Smart Materials and Structures* 22 (2013), pp. 1-9. BIBLIOGRAPHY 66
96. Polimeno, U., & Meo, M. (2009). Detecting barely visible impact damage detection on aircraft composites structures. *Composite structures*, 91(4), 398-402. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.04.014>
97. Pough F., Rogers T., Experiments in X-ray Irradiation of Gem Stones. *American Mineralogist*, (1947), 32:31L 43.
98. Ray, B. C. (2006). Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 298(1), 111-117. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2005.12.023>
99. Rice, J. A., *Mathematical Statistics and Data Analysis*. Redmond, CA: Thomson Higher Education, 2007.
100. Rique, A. M., Machado, A. C., Oliveira, D. F., Lopes, R. T., & Lima, I. (2015). X-ray imaging inspection of fiberglass reinforced by epoxy composite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 349(0), 184-191. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03.003>
101. Rizos, D. D., Fassois, S. D., Marioli-Riga, Z. P., & Karanika, A. N. (2008). Vibration-based skin damage statistical detection and restoration assessment in a stiffened aircraft panel. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(2), 315-337. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.07.012>
102. Rojek, M., Stabik, J., & Wróbel, G. (2005). Ultrasonic methods in diagnostics of epoxy-glass composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 121-126.
103. Růžek, R., Lohonka, R., & Jironč, J. (2006). Ultrasonic C-Scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification. *NDT & E International*, 39(2), 132-142. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.07.01>
104. Sarasini, F., & Santulli, C. (2014). 10 - Non-destructive testing (NDT) of natural fibre composites: acoustic emission technique. In A. Hodzic & R. Shanks (Eds.), *Natural Fibre Composites* (pp. 273-302): Woodhead Publishing.
105. Schneider, H., (1984), The nondestructive testing of tubes and pipes for nuclear application. *Nuclear Engineering and Design*, 81(1), 69-76.

- 106.Schroeder, J. A., Ahmed, T., Chaudhry, B., & Shepard, S., Non-destructive testing of structural composites and adhesively bonded composite joints: pulsed thermography, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(11), 1511-1517, (2002).
- 107.Scott, I. G., & Scala, C. M. (1982). A review of non-destructive testing of composite materials. *NDT International*, 15(2), 75-86.
- 108.Shafait, F., Keyzers, D. and Breuel, T., Ecient implementation of local adaptive thresholding techniques using integral images, in: *Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging* 6815 (2008).
- 109.Short, G., Guild, F., & Pavier, M. (2002). Delaminations in flat and curved composite laminates subjected to compressive load. *Composite structures*, 58(2), 249-258.
- 110.R. R. da Silva et al., Pattern recognition of weld defects detected by radiographic test, in: *NDT & E International* 37 (6 2004), pp. 461-470.
- 111.Srajbr C., Dillenz A.: Active thermography – NDT method for structural adhesive and mechanical joints. *Automotive Circle International*, (2012).
112. Staszewski, W. J., Mahzan, S., & Traynor, R. (2009). Health monitoring of aerospace composite structures – Active and passive approach. *Composites Science and Technology*, 69(11–12), 1678-1685. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.034>
113. Stonawski, O., & Engineering, S. I. U. a. C. M. (2008). Non-destructive Evaluation of Carbon/carbon Brakes Using Air-coupled Ultrasonic Inspection Systems: Southern Illinois University at Carbondale.
114. Šturm, R., Grimberg, R., Savin, A., & Grum, J. (2015). Destructive and nondestructive evaluations of the effect of moisture absorption on the mechanical properties of polyester-based composites. *Composites Part B: Engineering*, 71, 10-16.
- 115.Su, Z., Zhou, C., Hong, M., Cheng, L., Wang, Q., & Qing, X. (2014). Acousto-ultrasonics-based fatigue damage characterization: Linear versus nonlinear signal features. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 45(1), 225-239.
- 116.Sun W., Brown SB., Leach RK., (2012), An Overview of Industrial X-ray Computed Tomography, NPL Report ENG 32,ISSN 1754-2987.
- 117.Suzuki, K., Horiba, I. and Sugie, N., Linear-time connected-component labeling based on sequential local operations, in: *Computer Vision and Image Understanding* 89 (1 2003), pp. 1-23.
- 118.Szeliski. R., *Computer Vision: Algorithms and Applications*, New York, NY: Springer, 2010.
- 119.Unnikrishnan, R., Pantofaru, C. and M. Hebert, Toward objective evaluation of image segmentation algorithms, in: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 29 (6 2007), pp. 828-944.
- 120.Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., & López, I. (2013). Automatic detection of impact damage in carbon fiber composites using active thermography. *Infrared Physics & Technology*, 58(0), 36-46.

121. Vavilov, V. P., Plesovskikh, A. V., Chulkov, A. O., & Nesteruk, D. A. (2015). A complex approach to the development of the method and equipment for thermal nondestructive testing of CFRP cylindrical parts. *Composites Part B: Engineering*, 68, 375-384.
122. Venables, W. N. and Ripley, B. D., *Modern Applied Statistics with S*. Fourth edition, Springer, (2002).
123. Venkataraman, B., (2001), NDT as a Support for Materials Processing and Manufacturing, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (Second Edition) (pp. 5959-5963), Oxford: Elsevier.
124. Verburg, J.M., Seco, J., CT Metal Artifact Reduction Method Correcting for Beam Hardening and Missing Projections, *Physics in Medicine and Biology*, (2012), 57:2803.
125. Viola, P. & Jones, Michael J. (2004), "Robust Real-Time Face Detection", *International Journal of Computer Vision* 57 (2): 137–154
126. Wang, G. and Liao, T. W., Automatic identification of different types of welding defects in radiographic images, in: *NDT & E International* 35.8 (2002), pp. 519-528. BIBLIOGRAPHY 67.
127. Wang, X. J. and Chung, D. D. L., Sensing delamination in a carbon fiber polymer-matrix composite during fatigue by electrical resistance measurement, in: *Polymer Composites* 18.6 (1997), pp. 692-700.
128. Wang, X.; Sabne, A.; Kisner, Sh.; Raghunathan, A.; Bouman, C.; Midkiff, S. (2016). "High Performance Model Based Image Reconstruction". *Proceedings of the 21st ACM SIGPLAN Symposium on Principles and Practice of Parallel Programming*. PPoPP '16. New York, NY, USA: ACM: 2:1–2:12. ISBN 9781450340922. doi:10.1145/2851141.2851163.
129. Warnemuende, K., *Amplitude modulated acousto-ultrasonic non-destructive testing: Damage evaluation in concrete*. (3243085 Ph.D.), Wayne State University, Ann Arbor, (2006), <http://search.proquest.com/docview/304968621?accountid=28930> ProQuest Dissertations & Theses Global database.
130. Weckenmann A., Kraemer P., *Assessment of Measurement Uncertainty Caused in the Preparation of Measurements Using Computed Tomography*. IMEKO XIX World Congress Fundamental and Applied Metrology, (2009), Lisbon, Portugal, 978-963-88410-0-11888–1892, http://www.imeko2009.it.pt/Papers/FP_145.pdf. as of 05.10.2009.
131. Wilhelm, R.G., Hocken, R., Schwenke, H., *Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement*, (2001), *CIRP Annals* 50–2:553–563.
132. Wu, K., Otoo, E. and Suzuki, K., *Optimizing two-pass connected-component labeling algorithms*, in: *Pattern Analysis*
133. Xu, B., & Li, H. Y. (2012). *Advanced composite materials and manufacturing engineering : selected, peer reviewed papers from the 2012 international conference on advanced composite materials and manufacturing engineering (CMME2012) October 13-14, 2012, Beijing, China*. Durnten-Zurich, Switzerland ; Enfield, NH: Trans Tech Publications.

134. Yang, S.-H., Kim, K.-B., Oh, H. G., & Kang, J.-S. (2013). Non-contact detection of impact damage in CFRP composites using millimeter-wave reflection and considering carbon fiber direction. *NDT & E International*, 57(0), 45-51.
135. Yekani Fard, M. S., Seid Mohammadali. Raji, Brian B., Chattopadhyay, Aditi. (2014). Damage characterization of surface and sub-surface defects in stitch-bonded biaxial carbon/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 56, 821-829.
136. Zhang, P., Wittmann, F. H., Zhao, T. J., Lehmann, E. H., Tian, L., & Vontobel, P (2010). Observation and quantification of water penetration into Strain Hardening Cement-based Composites (SHCC) with multiple cracks by means of neutron radiography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 620(2-3), 414-420.
137. Й.Иванова, Д.Пашкулева, Т.Парталин (2014). Безразрушително следене на процеса на деформиране на нисковъглеродни стомани при опън. "NDT days 2014"/"Дни на безразрушителния контрол 2014", бр. 1 (150), ISSN 1310-3946.
138. <http://automation-bg.org/science/publications.html>

Други:

139. Bruker SkyScan (2013) Micro-CT Attachment for SEM http://www.skyscan.be/products/SEM_microCT.htm
140. Carl Zeiss IMT <http://www.zeiss.de/imt>.
141. Digiray Corporation <http://www.digiray.com/hangar/index.html>
142. Federal Aviation Administration, in: *Advanced Composite Materials*. U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration - Flight Standards Service, 2012. Chap. Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe.
143. Frost & Sullivan, in: <https://ww2.frost.com/frost-perspectives/growth-opportunities-industrial-ct-systems-market/>
144. Frost & Sullivan <http://www.frost.com/srch/catalog-search.do?queryText=computed+tomography>. Accessed 18.12.13.
145. Goodwin Steel Castings foundry <http://www.goodwinsteelcastings.com/en/facilities/foundry>.
146. ImageJ User Guide - Tools. Accessed: 2015-04-06. 2012. URL: <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/146-19.html>
147. MarketResearch.com-<http://www.marketresearch.com/search/results.asp?categoryid=0&qtype=2&title=&publisher=Global+Industry+Analysts&query=computed+tomography&lprice=&uprice=&datepub=®ionid=&submit2=Search>. Accessed 18.12.13.
148. NIST: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>

149.NDT.net

<http://www.ndt.net/exhibit/list.php3?globalSearch=1&searchmode=AND&Find=computed+tomography+market>. Accessed 18.12.13.

150.SPS Inspection Systems: <http://www.shawinspectionssystems.com/products/comet/x-ray%20tubes.htm>

151.Wolfram:<http://reference.wolfram.com/language/tutorial/UnconstrainedOptimizationNewtonsMethodRoot.html>

Декларация за оригиналност на резултатите

Декларирам, че дисертацията съдържа оригинални резултати, получени, при проведени от мен, научни изследвания с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител.

Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са коректно и подробно цитирани в библиографията.

Настоящият дисертационен труд не е прилаган за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис:.....

/Десислава Иванова/

СПИСЪК С ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА

1. D. Karastoyanov, **D. Ivanova** и N. Stoimenov., *Technology for Production of High Temperature Materials and Alloys Including nano Elements, International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computer, CSCC'15; 15.07.2015 – 21.07.2015, Zakynthos, Greece, pp 177-181, ISSN 1790-5117*
2. Gyoshev S., **Ivanova D.**, *Иновативни методи и средства за високоскоростно брикетуране на метален скрап., International Scientific Conference "High Technologies, Business. Society 2016", Borovets, Bulgaria, 14-17 March 2016, стр. 8-11, ISSN 1310-3946*
3. **Иванова Д.**, *Тенденции в роботизираното производство., XXV МНТК – АДП 2016, 23 -26 юни 2016 г. Созопол, България, стр. 53-60 , ISSN 1310 -3946*
4. **Ivanova D**, Bogomil Popov, Dimitar Karastoyanov – *Non destructive testing of materials and alloys obtained by high temperature technologies including nano elements, Automation And Mechatronics'17, ublished in: Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, Academy Publishing House Marin Drinov, Sofia, 2017, vol. 68, pp 3-14*
5. Gyoshev S., **Ivanova D.** *Експериментално изследване на процеса уплътняване на железен прах. Анализ на получените резултати с 3D томограф. Machines, technologies, materials, 2017, ISSN:1310-3946,PP 208-211*
6. **Ivanova D.**, Gyoshev S.. *Research of the generated heat during the treatment of metal samples. International Conference "Automatics and Informatics'2017" Sofia, Bulgaria, 4 - 6 October 2017, ISSN:1313-1850, PP 101-104*
7. **Ivanova D.** *Tomographic Methods fo Non-Destructive Testing of Material properties, Poblems of Engineering Cybernetics and Robotics vol.69, ISSN 0204-9848, PP 91-100*