

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

MODERNÍ TRENDY A POSTUPY V PROZAŘOVACÍCH METODÁCH V DEFECTOSKOPII

MODERN TRENDS IN RADIOGRAPHIC PROCEDURES AND METHODS IN DEFECTOSCOPY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VENDULA KRATOCHVÍLOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MARTIN JULIŠ, PH.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vendula Kratochvílová

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Moderní trendy a postupy v prozařovacích metodách v defektoskopii

v anglickém jazyce:

Modern trends in radiographic procedures and methods in defectoscopy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce bude zaměřena na literární řešení moderních postupů a trendů v prozařovacích metodách v defektoskopii.

Cíle bakalářské práce:

Vypracovat literární řešení shrnující aktuální stav, současné trendy a moderní postupy prozařovacích metod nedestruktivního zkoušení materiálů.



Seznam odborné literatury:

[1] B.Kopec: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, CERM, Brno 2009, ISBN 978-80-7204-591-4

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Juliš, Ph.D.

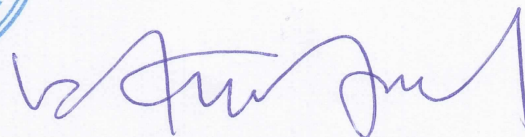
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 8.3.2012





prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt:

Předložená bakalářská práce se zabývá moderními trendy a postupy v prozařovacích metodách v defektoskopii, které se používají nebo se začínají používat v technické praxi.

Nejprve jsou uvedeny principy konvenční (analogové) radiografie, která spočívá ve vytváření viditelného obrazu prozařovaného objektu na radiografický film.

Další část je věnována digitální radiografii a radioskopii. Jde o digitalizaci stávajících rentgenových snímků na filmech, použití paměťových fólií, polovodičových detektorů a počítačovou tomografií.

Klíčová slova:

defektoskopie, nedestruktivní zkoušení, prozařování, rentgen, digitální radiografie, radioskopie, paměťové fólie, polovodičové desky, počítačová tomografie

Abstract:

Presented thesis deals with modern trends and techniques in radiographic methods of crack detection which are recently used in engineering practice. In the first part, conventional (analogue) radiography principles based on creating a visible image of tested object to radiographic film are discussed.

The next part is aimed to the digital radiography and radioscopy. To digitize existing X-ray film images, application of storage phosphor plates (CR), flat panels (DR) and computed tomography (CT).

Keywords:

defectoscopy, nondestructive testing, radiography, x-ray, digital radiography, radioscopy, computed radiography, direct radiography, computed tomography

Bibliografická citace:

KRATOCHVÍLOVÁ, V. *Moderní trendy a postupy v prozařovacích metodách v defektoskopii*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Juliš, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci „Moderní trendy a postupy v prozařovacích metodách v defektoskopii“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Martina Juliše, Ph.D. a s použitím níže uvedené literatury.

V Brně dne 25. května 2012

.....
Vendula Kratochvílová

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Martinu Julišovi, Ph.D. za vstřícný přístup, cenné rady a připomínky, které mi velmi pomohly při vypracovávání práce. Dále bych ráda poděkovala NDT specialiste Ing. Dagmar Kratochvílové za rady z oblasti technické praxe.

Obsah

Úvod.....	1
2. Základní fyzikální principy.....	2
2.1. Druhy záření	2
2.2. Vznik rentgenového záření	2
2.3. Vznik gama záření	3
2.4. Porovnání rentgenového a gama záření	5
3. Konvenční (analogová) radiografie.....	6
3.1. Typy filmů pro radiografii.....	6
3.2. Zpracování filmu (vyvolání)	7
3.2.1. Temná komora.....	7
3.2.2. Vyvolávání	8
3.2.3. Vady snímků (filmu)	9
3.3. Zjistitelnost vad na radiogramu	10
3.3.1. Negatoskopy.....	12
4. RTG přístroje	13
4.1. Nejběžnější typy rentgenových přístrojů.....	13
5. Digitální radiografie.....	15
5.1. Digitalizace stávajících rentgenových snímků na filmech	15
5.2. Paměťové fosforové fólie (CR).....	16
5.2.1. Struktura paměťové fólie.....	16
5.2.2. Princip prozařování na fólie.....	17
5.2.3. Principy scannerů	18
5.2.4. Detekce vad pomocí paměťové fólie	21
5.3. Polovodičové detektory (DR)	22
5.3.1. Princip funkce detektorů	22
6. Digitální radioskopie	25
6.1. Počítačová tomografie	25
7. Závěr	27
Seznam použité literatury.....	28

Úvod

Jak již název napovídá, obor nedestruktivního testování (NDT) se zabývá zkoušením různých součástí, aniž bychom je museli za tímto účelem poškodit nebo jiným způsobem narušit. Tento obor se stále velmi rozvíjí a je v technické praxi nepostradatelný. Kromě metody prozařovací patří k základním defektoskopickým metodám dále například zkoušení materiálů ultrazvukem, kapilární metody, metoda vířivých proudů, metoda akustické emise a další. Každá z výše uvedených metod je používána pro různé součásti s charakteristickým typem vad a nedá se říci, že by existovala nějaká univerzální metoda vhodná pro spolehlivou detekci všech druhů defektů. V praxi se tedy vždy vhodně kombinují minimálně dvě z těchto NDT metod.

Prozařování se používá například pro kontrolu odlitků, svarů, elektronických součástek, pneumatik (např. obr.1.1), ale i v netradičních oborech jako je potravinářský průmysl (kontrola přítomnosti kostí v rybích filetech nebo pecek v kompotech), umění, archeologie, geologie, nanotechnologie a další. [1]



Obr. 1.1 – rentgenový snímek pneumatiky [1]

Rentgenové záření objevil W. C. Röntgen v roce 1895 a v roce 1901 za tento objev dostal Nobelovu cenu. Při pokusech s katodovým zářením zjistil, že nový typ záření, který pojmenoval paprsky X, prochází materiály, které jiný typ záření nepropouští. Například průchodem paprsků X lidskou tkání dojde k zobrazení lidské kosti. Dále zjistil, že intenzita světla na stínítku je úměrná tloušťce prozařovaného materiálu. Tyto objevy se téměř okamžitě začaly využívat v praxi. [2,3]

Přestože je prozařování nejstarší NDT metodou, je v praxi nenahraditelné a stále se rozvíjí. V mé bakalářské práci se budu zabývat především průmyslovým využitím prozařovacích metod se zaměřením na moderní principy a postupy používané v nedestruktivním zkoušení materiálů a součástí v současnosti. Pokusím se zmapovat jak současné způsoby snímkování na filmy, tak i možnosti nepřímé i přímé digitalizace rentgenových záznamů.

2. Základní fyzikální principy

2.1. Druhy záření

Obecně je pojem záření definován jako šíření energie prostorem. Záření rentgenové i gama je elektromagnetické záření, což znamená, že se jejich energie šíří prostorem jako vlnění [4,31].

Většina elektromagnetického záření má tyto vlastnosti:

- šíří se přímočaře, rychlostí světla (tj. asi $3 \cdot 10^7$ m/s)
- způsobuje zčernání fotografické emulze
- nedá se vychýlit magnetickým polem

Rentgenové záření (záření X) je krátkovlnné fotonové záření, které vzniká v elektronovém obalu atomu. Dělí se na „brzdné“ záření, vznikající zpomalováním nabitých částic ve hmotě a „charakteristické“ záření, vznikající při přechodu elektronů z vyšší energetické hladiny do nižší. RTG záření dokáže pronikat pevnými látkami [4].

Gama záření je krátkovlnné fotonové záření, vznikající většinou při přechodu atomového jádra z vyššího energetického stavu do nižšího (radioaktivní přeměna v izotopech) [4].

Schopnost vln pronikat hmotou je závislá na jejich energii (vlnové délce). Například viditelné světlo, které má vlnovou délku 400 – 750 nm, je látkou pohlceno nebo odraženo, UV záření o vlnové délce 1 – 400 nm může pronikat třeba lidskou kůží a nakonec rentgenové záření má vlnové délky 1 pm – 10 nm může pronikat pevnými látkami [4,31].

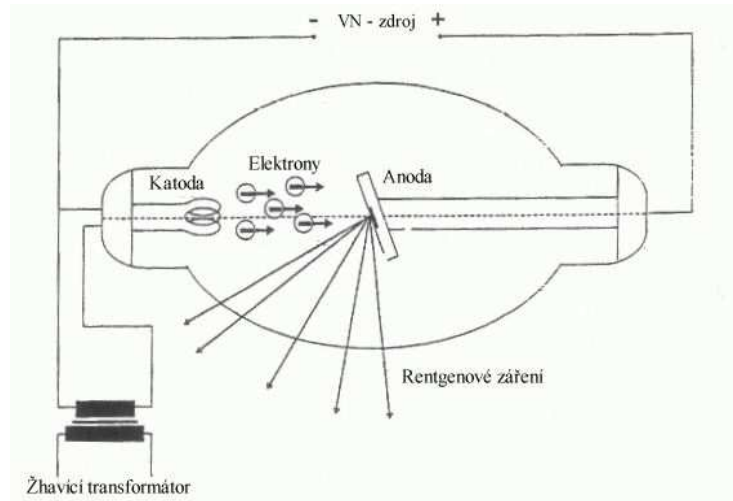
2.2. Vznik rentgenového záření

Ke vzniku rentgenového záření je zapotřebí [4]:

- zdroje elektronů
- zařízení pro urychlení elektronů
- terčik pro zabrzdění urychlených elektronů (ohnisko).

Rentgenové záření vzniká, když urychlený elektron část své energie ztratí mezi atomy nebo elektronovým obalem atomů. Tato část energie je při tom vyzářena jako X – záření a je tím větší, čím je větší rychlost elektronů [4].

Přirozenými zdroji RTG záření jsou hlavně hvězdy, uměle jej lze získat pomocí rentgenek neboli Coolidgových trubic. Jsou to skleněné vakuované trubice obsahující wolframovou anodu a žhavenou katodu. Na elektrody je přiváděno vysoké napětí (řádově desítky až stovky kV). Vysoká teplota katody umožňuje termoemisi elektronů, které jsou přiváděným napětím vysoce urychlovány a dopadají na anodu. Tam prudce ztrácejí svou kinetickou energii, která se mění z 0,1 % v energii emitovaných fotonů rentgenového záření a z 99,9 % v teplo. Anoda musí být proto intenzivně chlazena vodou nebo rotací, při které se neustále mění místo dopadu elektronového svazku. Charakteristický zvuk provázející rentgenové vyšetření je způsobován právě rotující anodou. Takto vzniká brzdné záření, které má spojitě energetické spektrum [2].



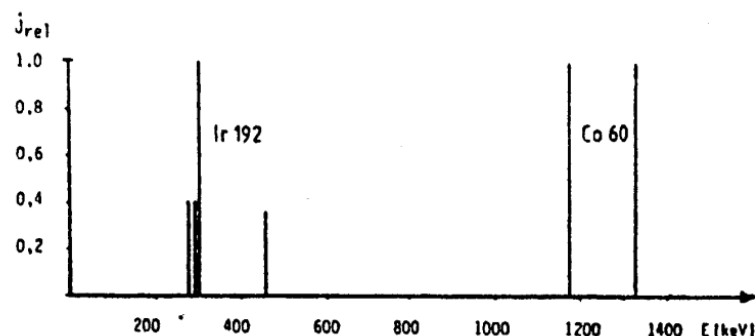
Obr. 2.1 – Schéma vzniku rentgenového záření [2]

Charakteristické záření vzniká, když dopadající elektrony vyrazí některý elektron z energetických hladin (slupek atomu) K nebo L, čímž vznikne neobsazené místo, které je okamžitě obsazeno jiným elektronem z vyšších vrstev. Při těchto přeskokách je uvolňováno značné množství energie ve formě fotonů rentgenového záření s energií rovné energetickému rozdílu mezi elektronovými hladinami. Toto záření má proto čárové energetické spektrum, které je závislé na materiálu anody [1].

Intenzita rentgenového záření závisí na počtu elektronů dopadajících na anodu. Lze ji měnit nastavením velikosti elektrického proudu protékajícího rentgenkou [1].

2.3. Vznik gama záření

Na rozdíl od RTG záření, které vzniká výměnným procesem mezi urychlenými elektrony a atomy terčiku, vzniká záření gama jako několik ostře definovaných jaderných procesů. Spektrum gama záření se proto skládá z několika ostrých čar [4].



Obr. 2.2 – Čárové spektrum Ir 192 a Co 60 [4]

Energie záření gama je větší než energie RTG-záření a má proto jiné radiografické účinky. Je nicméně možné říci, že RTG záření a gama záření se rozlišuje pouze svým vznikem. V defektoskopii používáme pro vznik záření gama jako zářiče zejména radioizotopy Ir192 a Co60. Lze si představit, že Ir192 z hlediska

účinků odpovídá max. energii X-záření 600 kV a Co60 energii X-záření cca 2500 kV [4].

Tab. 2.1 – Ekvivalentní energie některých zářičů:

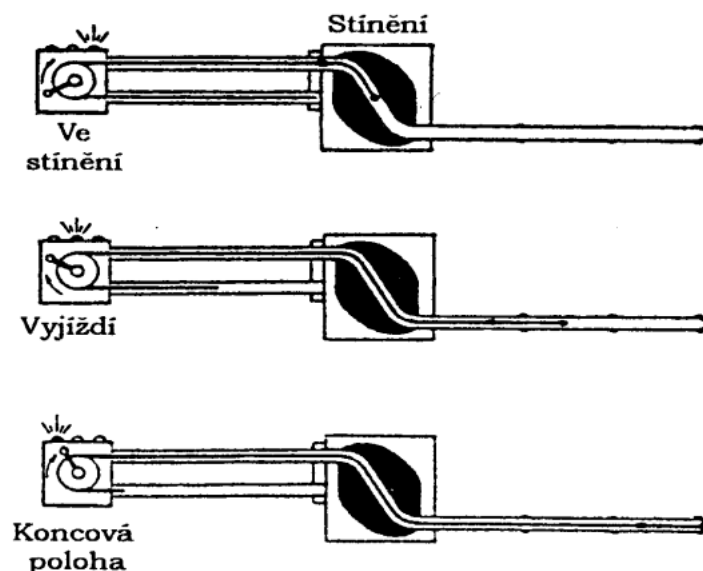
Gamazářič	Ekvivalentní energie [keV]
Tm 170	asi 180
Yb 169	asi 250
Ir 192	500 až 600
Co 60	2000 až 2500
Sn 75	asi 600

Vlastnosti radioizotopu závisí na 3 faktorech:

- na druhu radioaktivního izotopu
- na jeho aktivitě
- na jeho poločasu rozpadu

Aktivita radioizotopu se vyjadřuje počtem rozpadů jeho atomů za sekundu. V prozařování přichází v úvahu z hlediska doby expozice izotopy mezi 37 a 3700 miliardami rozpadů za sekundu. V současnosti se používá jednotka Bequerel – Bq (dříve se používal 1 Curie – Ci), což představuje 1 rozpad za sekundu (37 GBq = 37 miliard rozpadů za sekundu).

Protože průběh radioaktivních přeměn nelze nijak zastavit, či jejich intenzitu jakkoliv měnit, jsou radioizotopy uchovávány v bezpečnostních stínících krytech. Příklad konstrukce stínícího krytu radioizotopu je na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 – Příklad radioizotopového stínícího krytu

2.4. Porovnání rentgenového a gama záření

Při rozhodování o použití rentgenového nebo gama záření pro NDT zkoušení je potřeba vzít do úvahy výhody a nevýhody radioizotopových zářičů a rentgenových zařízení.

Výhody gama zářičů [4]:

- nižší pořizovací cena
- lepší možnost prozařování dutých výrobků
- nepotřebují zdroj elektrické energie

Nevýhody gama zářičů [4]:

- nemožnost přerušit záření (radionuklid je aktivní i při svém uložení v krytu)
- žádná možnost změny energie záření (nelze nastavit pronikavost záření)
- menší kontrast radiogramů (důsledek čárového, a tím pádem nespojitého spektra záření)

RTG záření se preferuje především díky jeho spojitému spektru, které způsobuje větší kontrast radiogramů, vady jsou pak lépe čitelné. Další výhodou rentgenového záření je jeho větší bezpečnost, protože se dá přerušit odpojením od zdroje elektrické energie. Gama záření naopak nepotřebuje elektrickou energii, takže je vhodnější pro případy, kde potřebujeme lepší mobilitu a pro použití mimo laboratoř, kdy nemáme přístup ke zdroji elektrické energie.

3. Konvenční (analogová) radiografie

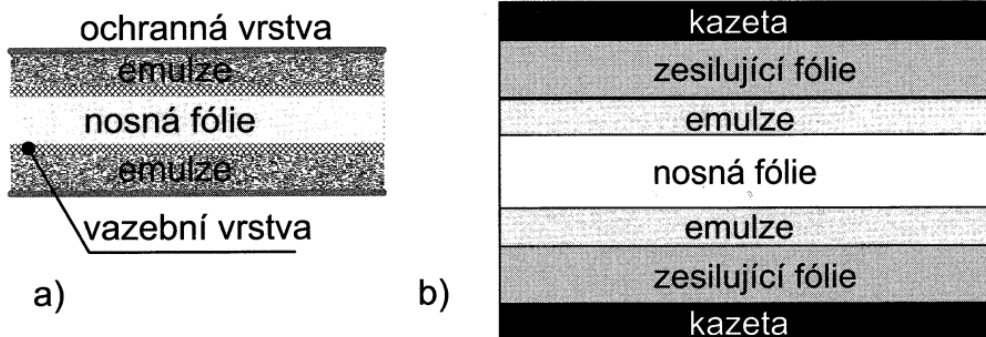
Radiografie je metodika vytvoření viditelného obrazu prozařovaného objektu na radiografický film. Dle možností musí být film umístěn těsně u prozařovaného objektu. Účinkem rentgenového záření vznikne v citlivé vrstvě filmu (emulzi) latentní (neviditelný) obraz. Po fotochemickém zpracování filmu (vyvolání, ustálení, praní, sušení a vytvrzení) získáme viditelný negativní obraz (radiogram), který lze prohlížet a analyzovat prosvětlením naexponovaného filmu v negatoskopu [5,29].

Pro získání požadované kvality obrazu je nutno stanovit výpočtem či pomocí grafů správnou expoziční dobu ozáření filmu. Expoziční doba je závislá na parametrech rentgenky, prozařované tloušťce daného materiálu a vlastnostech radiografického filmu [5].

3.1. Typy filmů pro radiografii

Průmyslový radiologický film se skládá z 3 základních vrstev:

- nosná podložka - PE folie, dříve se používal celuloid; má tloušťku asi 0,1 mm
- oboustranná emulsní vrstva - želatina se zrny AgBr; má tloušťku asi 0,01 mm
- ochranná vrstva - má tloušťku asi 0,001 mm [4]



Obr. 3.1 – Radiologický film: a) provedení bez zesilující fólie, b) provedení s fluorescenční nebo kovovou zesilující fólií [5]

Pro zvýšení účinku záření na emulzi se používají zesilující kovové nebo fluorescenční fólie. U kovových fólií je princip zesílení založen na fotoelektrickém jevu (uvolnění elektronů) vznikajícím dopadem záření na povrch kovu. Fluorescenční fólie obsahuje vrstvu luminoforu, která transformuje rentgenové záření na viditelné světlo. Uvolněné elektrony nebo vzniklé viditelné světlo pak druhotně exponují radiografický film [5,29].

Filmy se dále rozdělují podle zrnitosti, která má vliv na citlivost snímku. Označování filmů není v současné době sjednocené, takže každý výrobce označuje citlivost jinak [2]. Například firma AGFA nabízí filmy s označením STRUICURIX D2 – STRUICURIX D8, kde D2 je nejméně citlivý, ale má nejmenší zrno a D8 je

3. Konvenční (analogová) radiografie

nejcitlivější, nebo TESTIX C4 – TESTIX C7 [6]. Firma FOMA BOHEMIA spol. s r.o. zase INDUX R2 – INDUX R8, kde R2 má nízkou citlivost, vysoký kontrast a mimořádně nízkou zrnitost a R8 má vysokou citlivost vysoký kontrast a středně velké zrno [7].

Filmy se dodávají v různých typech balení (obr. 3.2), které každá firma nazývá jinak. Přesto se dá říct, že existují 3 základní typy balení [6-9]:

- Komorové balení – film je nutno pro práci uložit do světlopropustné kazety v temné komoře. Tento typ balení je finančně výhodný.
- Denní balení – vakuové jednolistové balení. Toto balení je praktické, protože obal nepropouští světlo, vzduch ani vlhkost.
- Svitkové balení – balení do denního světla. Film je navinut na papírovém jádru a uložen v transportní krabici.



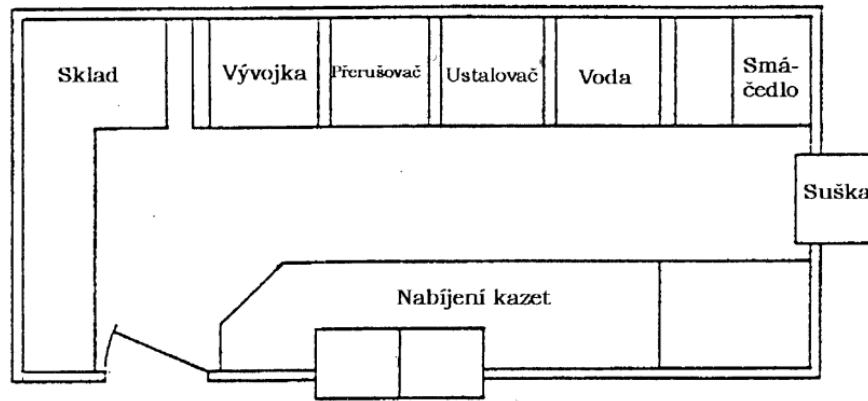
Obr. 3.2 – Ukázka balení filmů od firmy Agfa [6]

3.2. Zpracování filmu (vyvolání)

3.2.1. Temná komora

Filmy se musí zpracovávat (zakládat i vyvolávat) v místnosti, kde je neaktinické osvětlení. Pro zajištění tohoto typu osvětlení se používají různé filtry, jejichž světelné spektrum nepůsobí na rentgenový film. V praxi se osvědčilo rubínové světlo.

Správné osvětlení se testuje pomocí proužku filmu, který se z části překryje černým papírem a ponechá se určitou dobu pod lampou. Po vyvolání by neměl být znát rozdíl mezi osvětlenou a zakrytou částí filmu [4]. Každá temná komora má vždy dvě základní části – suchou a mokrou.



Obr. 3.3 – Provedení temné komory [4]

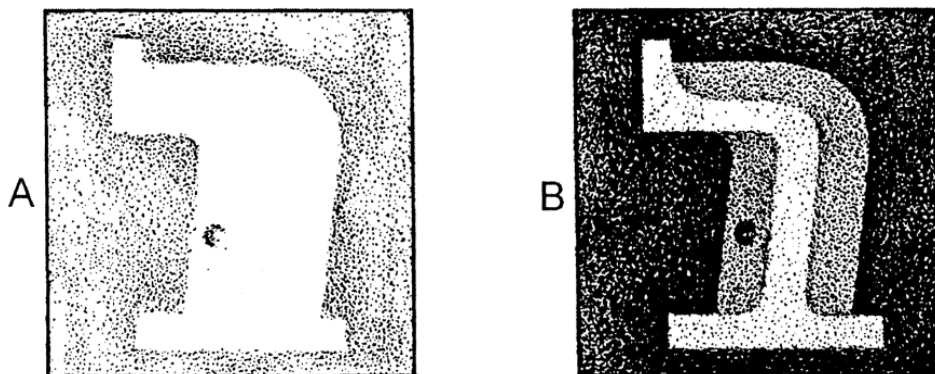
3.2.2. Vyvolávání

Jak již bylo výše řečeno, po expozici filmu se v jeho světlocitlivé vrstvě vytvoří tzv. latentní obraz, který není ale pouhým okem viditelný. Jeho zviditelnění se zajišťuje dalším procesem zpracování, které může být provedeno ručně, nebo ve vyvolávacím automatu [9].

Při procesu vyvolání se ionizované krystaly AgBr promění v kovové stříbro, které je černé a tudíž nepropouští světlo. Při vyvolání zčerná vždy celé zrna a hodnota zčernání filmu pak záleží na počtu osvětlených a vyvolaných zrn [4].

Tento proces se skládá ze 4 základních částí [4,9]:

- **Vyvolání** – Probíhá pomocí vývojky, která je kombinací více chemikálií. Její dvě základní části jsou akcelerační a redukční prostředek. Akcelerační odstraní ochrannou vrstvu, pronikne želatinou a tvoří zásaditý roztok. Redukční prostředek redukuje AgBr na Ag. Přednostně se redukuje ozářená zrna a až potom zrna neozářená, proto se musí dávat pozor, aby film ve vývojce nezůstal moc dlouho. Čas a teplota vývojky jsou nejdůležitějšími parametry vyvolávacího procesu. Platí, že čím je vyšší teplota vývojky, tím větší je zčernání filmu. Dále se musí dávat pozor na to, zda není vývojka tzv. vyčerpaná. Vliv čerstvé a vyčerpané vývojky je uveden na obrázku 3.4.



Obr. 3.4 – Vyvolaný radiogram: A – vyčerpaná vývojka; B – čerstvá vývojka

- **Přerušení** – Po vyjmutí filmu z vývojky zůstává malé množství alkalií ve filmu. Přerušovací lázeň má za úkol zastavit účinek vyvolávacích látek neutralizací a odstranit alkálie před ustalováním a chránit ustalovač.
- **Ustálení** – Pomocí ustalovače se fixuje obraz v želatině filmu. Dochází k zprůhlednění, pomocí rozpuštění neosvětlených zrn AgBr, a k vytvrzení filmu, kterým se ze zabrání poškrábání filmu při dalších operacích. Čas ustálení je asi dvojnásobek doby zprůhlednění.
- **Praní** – provádí se v tekoucí době. Dále následuje oplach pro odstranění skvrn od nečisté (tvrdé) vody a sušení filmu.

Stabilita zpracovaných radiogramů závisí na jejich dokonalém ustálení a vyprání filmu. Při dodržení předepsaných podmínek zpracování je zaručena minimální doba skladovatelnosti 10 let. U důkladně zpracovaných snímků je teoretická životnost až 500 let [9].

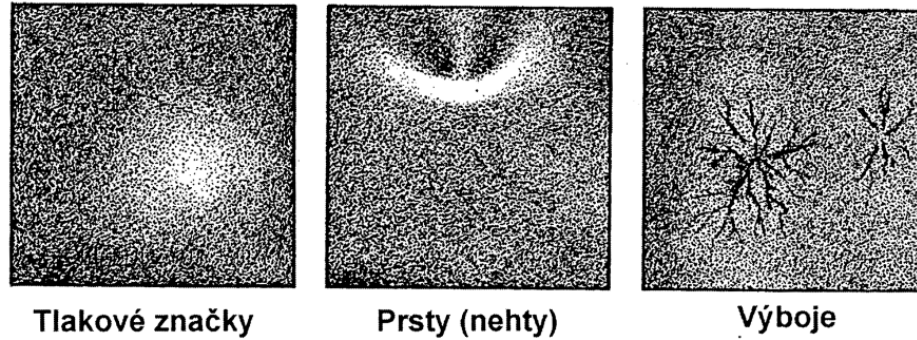
Při větším množství radiogramů se používá automatické vyvolávání filmu. Jeho předností je to, že výsledky vyvolání jsou při porovnání s ručním zpracováním rovnoměrnější. Film prochází řadou válečků koncentrovanými lázněmi a vychází z vyvolávacího automatu již usušený [4].



Obr. 3.5 – Vyvolávací automat NDT U [7]

3.2.3. Vady snímků (filmu)

Vady vznikají neopatrností a nedodržením podmínek při zpracování filmu. Jde o nehomogenity v obrazu radiogramu, které pak mohou být mylně vyhodnoceny jako vady materiálu. Nejčastěji jde o prachové částice, nečistoty způsobené nepořádkem v temné komoře a nevyhovující ochranou lázní. S filmy je potřeba zacházet velmi opatrně, hlavně při vyjímání z krabic, nabíjení a vybíjení filmů do kazet. Každý ohyb filmu může způsobit vadu snímku [4].

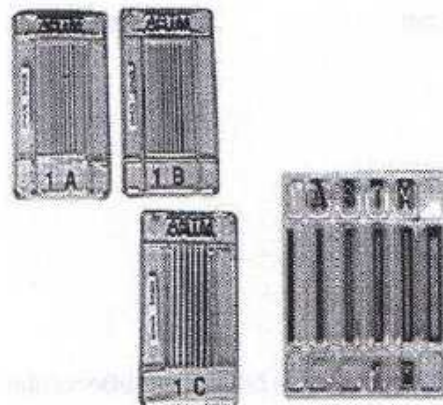


Obr. 3.6 – Typické vady negativního procesu

3.3. Zjistitelnost vad na radiogramu

V metodě prozařovací pojem vada zahrnuje všechny necelistvosti nacházející se v kontrolované oblasti výrobku a to jak uvnitř materiálu, tak i na povrchu. Tyto defekty se klasifikují podle své charakteristiky (zobrazení na radiogramu) jako vady prostorové (póry, struska, bubliny, řediny, atd.) nebo jako vady plošné (trhliny, studené spoje, zavaleniny, atd.) [4,10].

Kromě vad jsou na radiogramu vždy zobrazené i kontrolní měřky, které se přikládají na prozařovaný povrch a slouží jako pomůcka ke stanovení kvality daného radiogramu. Měřky, mohou být stupňové, otvorové, drážkové nebo drátkové. Například u drátkových měrek (obr. 3.7) určuje jakost radiogramu nejmenší průměr ještě viditelného drátku nebo procento viditelného drátku vůči tloušťce prozařovaného materiálu. Speciální měrkou je pak defektometr, který je vyroben ze stejného materiálu, jako měřený objekt a má vyfrézované drážky o stejné šířce, ale různé hloubce. Podle zčernání obrazu defektometru na radiogramu lze odhadnout hloubku vady [5,10].



Obr. 3.7 – Drátkové měřky [8]

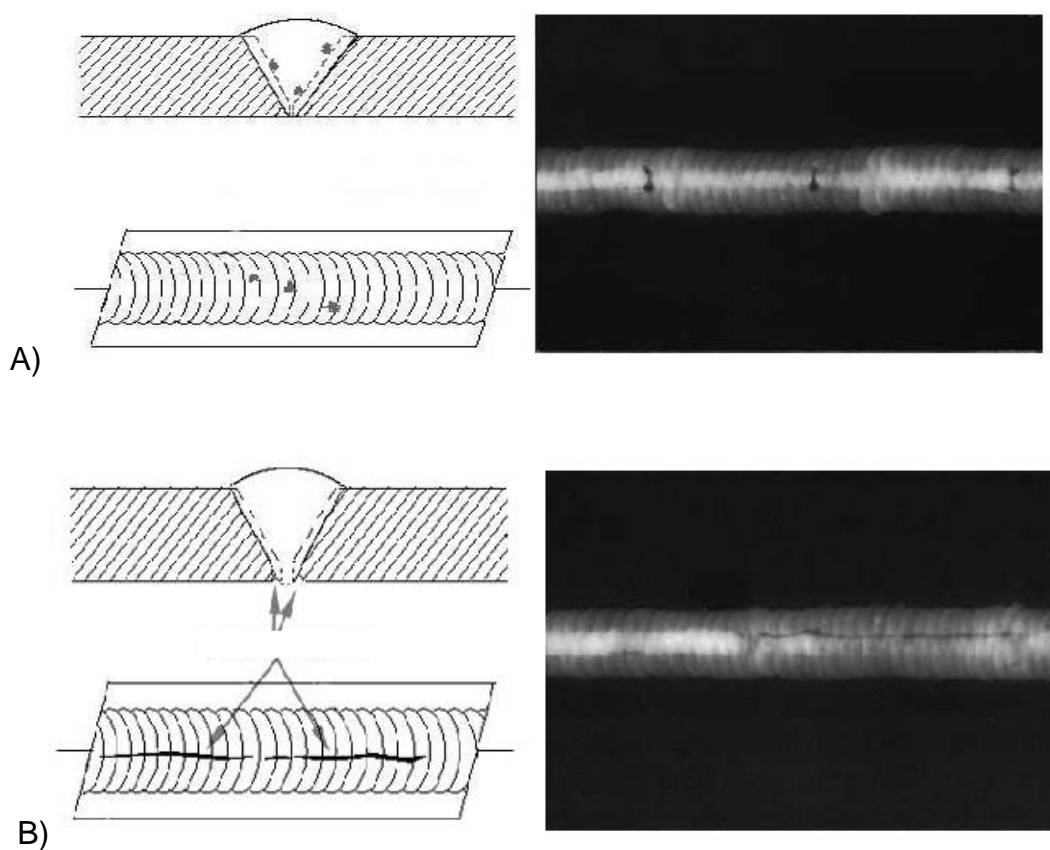
Na radiogramu je vada zviditelněna jako dvourozměrný útvar, odlišující se optickou hustotou (zčernáním) od základního zčernání radiogramu.

Zjistitelnost vady má 3 základní kritéria [10]:

- Kontrast mezi zviditelněnou vadou a jejím okolím – měl by být co největší.
- Neostrost mezi rozhraním vady a jejím okolí – měla by být co nejmenší.
- Zrnitost radiogramu – čím je menší, tím lépe.

Vyhodnocení vady má také 3 základní faktory, které jsou subjektivní [10]:

- Funkce a vlastnosti oka – schopnost lidského oka rozlišit odděleně dva detaily může být různá.
- Pozorovací podmínky – jde v podstatě o míru jasů v negatoskopu.
- Psychofyzikální faktory hodnocení – především faktor únavy, kterému je hodnotitel vystaven monotématičností a sériovostí práce.

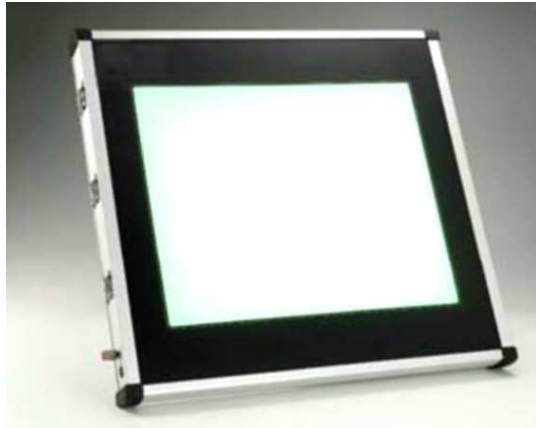


Obr. 3.9 – Příklad zobrazení vad na radiogramu: A – struskové vměšky; B – trhlina ve svaru [7]

3.3.1. Negatoskopy

Jak již bylo řečeno dříve, negatoskop je zařízení, které slouží k prohlížení radiografických filmů.

Na současném trhu existuje celá řada typů, které se mezi sebou liší především velikostí svítící plochy a možností prohlížet různě velké snímky. Dalšími kritérii, která se hodnotí, jsou energetická náročnost a jas daného negatoskopu. Nejnovější modely se vyznačují především nízkou energetickou spotřebou a nízkým vyzařováním tepla.



Obr. 3.10 – Negatoskop typu Cool&Lite 1417 [11]

4. RTG přístroje

Všeobecně se dá říci, že parametry, které se u rentgenů sledují, jsou především maximální proud (většinou bývá nastavitelný), typ použité lampy (většinou se používá keramická, která má lepší odvod tepla), maximální prozářitelná tloušťka materiálu (udává se za konkrétních podmínek), expoziční čas (samozřejmě se vyžaduje co nejmenší), vzdálenost ohniska od čela lampy (čím je menší, tím lépe), spolehlivost (porucha rentgenu, která způsobí přerušení kontroly, může být velmi drahá) a v neposlední řadě cena [12].

RTG přístrojů existuje celá řada. Volba použitého přístroje proto závisí na konkrétní kontrolované situaci a požadavcích zákazníka.

4.1. Nejběžnější typy rentgenových přístrojů

- **Přenosné (mobilní) rentgeny** – skládají se z rentgenové jednotky, kde je keramická rentgenová lampa, vysokonapěťový zdroj pracující v oblasti desítek kHz, usměrňovač a chladicí systém (chlazení je většinou vzduchem, ale může být i vodou), a z ovládacího kufru, kde je řídicí elektronika. Napájení bývá většinou 230V. Kromě tradičních požadavků se u přenosných rentgenů klade důraz především na nízkou hmotnost a malé rozměry při zachování bezpečnostních předpisů (schválení PBT). Dále by měl mít robustní (stabilní) konstrukci, mělo by se s ním snadno manipulovat a měl by být odolný proti povětrnostním vlivům (především proti dešti) [8, 12].



Obr. 4.1 – Přenosné rentgeny SMART 160 – 300 od firmy YXLON [6]

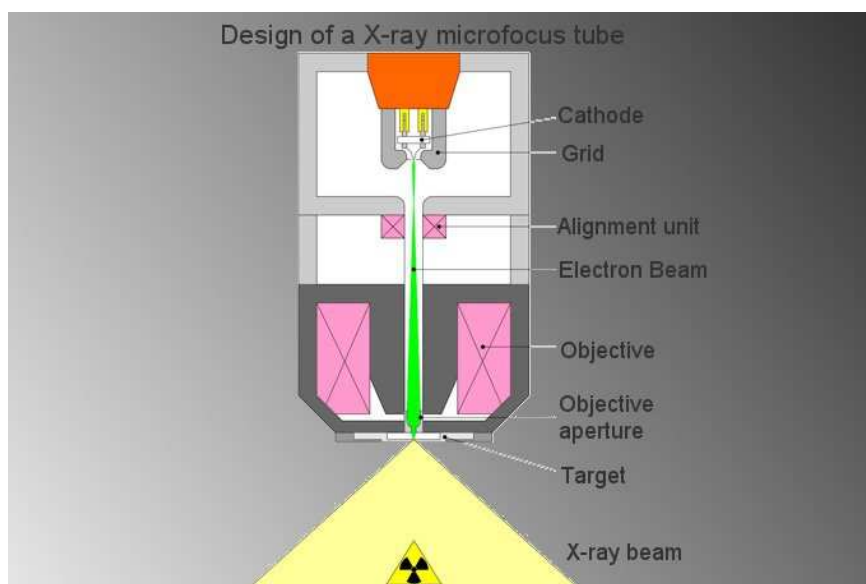
- **Panoramatické rentgeny** – v průmyslu se používají pro rentgenování ze středu trubek, kotlů, tanků, aj. Tyto přístroje využívají vyzařovacího úhlu 360 stupňů pro panoramatickou expozici [6].
- **Stacionární rentgeny** – skládají se z rentgenové jednotky, kde je keramická rentgenová lampa, vysokonapěťového kabelu, vysokonapěťového zdroje s usměrňovači pracujícího v oblasti desítek

kHz, skříně s ovládací elektronikou a z ovládacího panelu. Napájení bývá 230 V nebo 3x 400V [8].



Obr. 4.2 - Stacionární rentgen typu MG 452 od firmy YXLON [6]

- **Mikrorentgeny** – jak již název napovídá, mikrorentgeny slouží k rentgenování malých součástí, především při kontrole elektrotechniky. Pracují se zvětšením až 1:10000 a mají velikost ohniska 3 – 0,3 μm . U těchto přístrojů je unikátní především konstrukce lamp. Ty jsou konstruovány buď jako klasické, tzn. rentgenové záření je emitováno terčíkem anody klasicky při odrazu, nebo tzv. transmisní, kde je konstrukce taková, aby terčík anody byl co nejbližší krytu vlastní lampy [8,13].



Obr. 4.3 – Konstrukce mikrorentgenové lampy: Cathode – katoda; Grid – mřížka; Alignment unit – ladící jednotka; Electron Beam – paprsek elektronů; Objective – objektiv; Objective Aperture – otvor objektivu; Target – terčík; X-ray beam – paprsek rentgenového záření [1]

5. Digitální radiografie

V současnosti např. ve zdravotnictví již digitální radiografie téměř vytlačila rentgenové filmy a začíná se výrazně upřednostňovat i v průmyslu [2]. Tento trend nastal zejména z toho důvodu, že čas potřebný pro vyvolání filmu a získání obrazu přítomných defektů klasickým postupem je ve srovnání s digitální cestou mnohem delší a také dražší. Dalším důvodem je postupné zhoršování kvality uložených filmů v závislosti na podmínkách skladování, což v případě digitální podoby snímků zcela odpadá.

5.1. Digitalizace stávajících rentgenových snímků na filmech

Jedná se o nejjednodušší způsob digitalizace. Lze ji provádět buďto fotografováním snímků na negatoskopu digitálním fotoaparátem, ale fotografie má velmi nízkou kvalitu, nebo pomocí scanneru, kdy je výsledek kvalitnější, je však zapotřebí speciální scanner (digitizér), který umožňuje digitalizovat snímky do vysokých hodnot zčernání [2].

Scannery se řadí do tří tříd [14]:

- 1. třída – DS: Dodržuje se při digitální archivaci radiografického filmu. Výsledný obrázek má snížený poměr signál-šum a prostorové rozlišení.
- 2. třída – DB: V této třídě dochází k určitému snížení jakosti. Výsledný obrázek slouží pouze pro digitální analýzu filmu, originální snímek na filmu musí být archivován.
- 3. třída – DA: Zde dochází k většímu snížení jakosti než ve 2. třídě a navíc i ke snížení prostorového rozlišení. Výsledný obrázek tedy také slouží pouze pro digitální analýzu filmu a originální snímek musí být archivován. Tato třída je nevhodná pro zjišťování trhlin a malých vad.

Parametry, podle kterých se scannery řadí do tříd [14]:

- velikost obrazového prvku – jednotka pixel: Je to geometrická vzdálenost středního bodu vedle sebe ležících obrazových bodů horizontální nebo vertikální rozteč snímaných obrazů
- optická hustota – density: To je dekadický logaritmus poměrů difusní intenzity světla před a za filmem.
- modulace přenosové funkce – MTF: Tato veličina je normalizována Fourierovou transformací, která diferencuje prostorovou optickou hustotu funkce obrazu rozhraní. Výpočet MTF je založen na optické hustotě, která odpovídá dávce rentgenového záření.

- digitální rozlišení – v bitech: Jde o počet bitů, který poskytuje digitální převodník digitizéru použitý den po digitalizaci.
- citlivost kontrastu hustoty: Sleduje se nejmenší změna hustoty, která je analyzována digitizérem.
- rozsah hustoty: Tento parametr určuje konstrukce digitizéru. Jde o rozsah maximální a minimální optické hustoty, kterou je možno změřit digitizérem.
- pracovní rozsah: Jde o rozsah optických hustot, ve kterých digitizér zaručuje minimální citlivost kontrastu hustoty v jednom procesu. Většinou lze nastavit více než jeden rozsah (např. pro tmavý nebo světlý film).



Obr. 5.1 – Digitizér rtg filmů, typ FS50/FS50B od společnosti GE [15]

Využití tohoto způsobu digitalizace k archivaci snímků je výhodné především díky ušetření místa a tím i finančních nákladů. Snímky v digitální podobě je pro jistotu vhodné archiovat ve více kopiích. Jak již bylo řečeno, digitalizace radiogramů na filmech slouží i k jejich vyhodnocování a počítačovému zpracování (můžeme třeba zvyšovat kontrast, označovat vady a psát poznámky). Nesmíme opomenout i možnost sdílet digitální snímky pomocí interní (popř. internetové) sítě.

5.2. Paměťové fosforové fólie (CR)

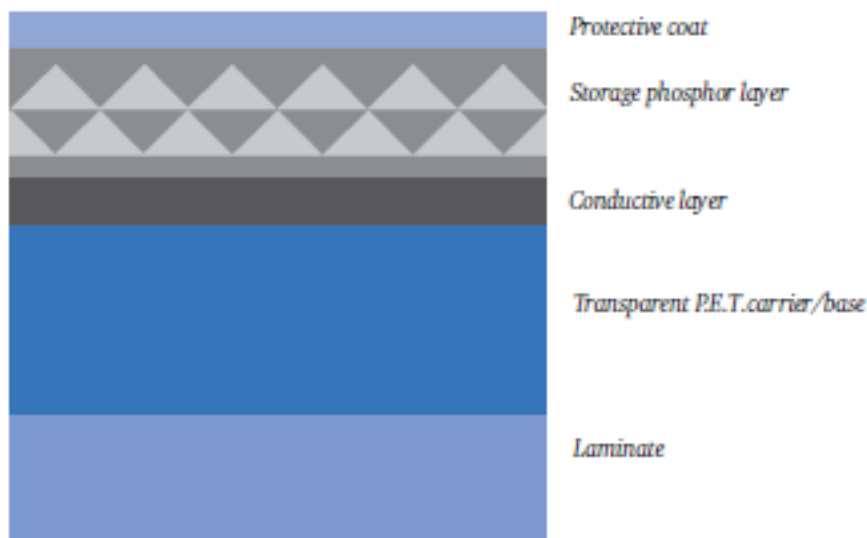
Jde o nejperspektivnější způsob digitalizace, může se také označovat zkratkou CR (computed radiography). V začátcích bránilo rozšíření paměťových fólií poměrně vysoká cena a malé rozlišení. Dnes už jsou tyto nedostatky odstraněny a systémy odpovídají normám EN 14784-1 a ASME E 2446 [2,8].

5.2.1. Struktura paměťové fólie

Na začátku bude vhodné uvést, že přestože český překlad názvu normy EN 14784 zní: „Nedestruktivní kontrola materiálů – průmyslová digitální radiografie s fosforovými paměťovými foliemi“, nejde o fólie obsahující fosfor. Toto nedorozumění je způsobeno nesprávným překladem normy, kdy je v originále slovo „phospor“, to lze přeložit jako luminiscence nebo fotoluminiscence. Fosfor se anglicky řekne

phosporus. Materiál fólie je výrobcem přísně chráněn, ale můžeme říct, že základem je vždy baryum, stroncium fluor a brom [8,27,28].

Fólie je složena z několika vrstev (obr. 5.2). Nejdůležitější je samozřejmě luminiscenční vrstva, která je citlivá na rentgenové a gama záření. Tato vrstva je pružná, průhledná a je opatřena ochranným povlakem, který chrání fólii především proti mechanickému poškození a také umožňuje její očištění. Další důležitou vrstvou je laminátový základ, který zajišťuje mechanické vlastnosti, jako je třeba flexibilita. Paměťová fólie ovšem není tak flexibilní, jako klasický film [6,7,16].



Obr. 5.2 – Struktura paměťové luminiscenční fólie: Protective coat – ochranný povlak; Storage phospho layer – luminiscenční paměťová vrstva; Conductive layer – vodivá vrstva; Transparent P.E.T. carrier/base – transparentní nosič z P.E.T.; Laminate – laminát [16]

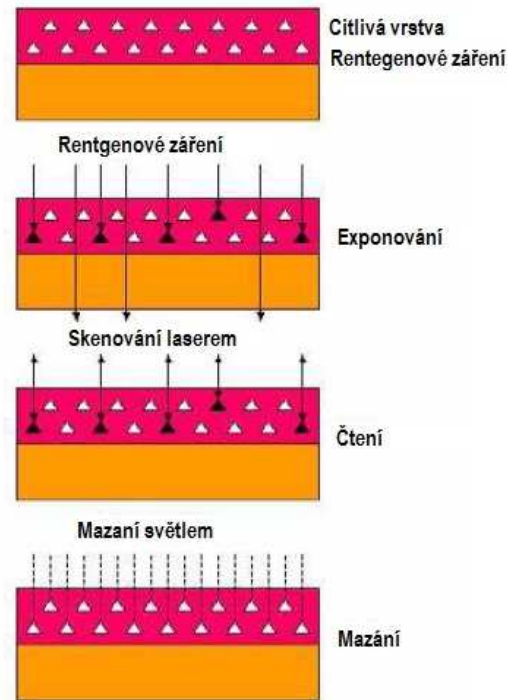
Fólie nejsou tak moc citlivé na světlo jako filmy, proto je lze zakládat do kazet i za světla, ale ne na přímém slunci, silným světlem se mažou [2,8].

5.2.2. Princip prozařování na fólie

Stejně jako prozařování na filmy, má prozařování na fólie dvě fáze. Fólie se založí do kazety a prozařuje se rentgenovým nebo gama zářením. Vytvoří se latentní obraz, podobně jako u filmu, ale místo krystalů AgBr reaguje luminiscenční vrstva. Místo chemického vyvolávání se obraz získává pomocí speciálních scannerů a je rovnou uložen do digitálního formátu [16,32].

Při dopadu rentgenového nebo gama záření jsou vybudeny elektrony v krystalické struktuře folie a posouvají se do vyšších energetických vrstev, kde zůstávají v kvazistabilním (polostabilním) stavu a tím se vytvoří latentní obraz. Speciální scanner tyto elektrony uvolňuje pomocí laserového paprsku, což způsobí, že začnou vyzařovat modré viditelné světlo, které může být zachyceno pomocí tzv.

PMT (Photo-Multiplier Tube – fotonásobič) a převedeno na digitální signál [2,16,17,24,26].

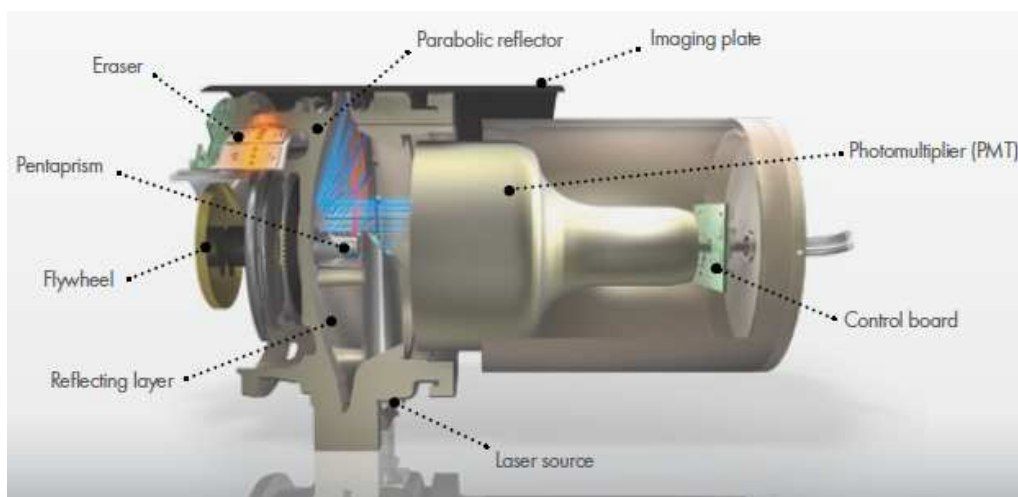


Obr. 5.3 – Princip práce s paměťovou fólií [24]

Fólii se doporučuje „vyvolat“ co nejdříve přečtením na scanneru, nejlépe týž den. V případě velmi teplého počasí v létě se doporučuje vyvolávat do několika hodin. Pokud se fólie dlouho nepoužívá, může se na ní obrázek opět objevit a musí se znovu vymazat (např. přiložením k negatoskopu) [8,24].

5.2.3. Principy scannerů

Každý scanner obsahuje již zmiňované PMT a elektroniku, která digitalizuje analogový světelný signál. Scannerů existuje řada typů. V rotačním scanneru je laserový svazek směřován na velmi rychle rotující hranol, tak, že laserový svazek velmi rychle rotuje. Současně je posouvána folie v axiálním směru skeneru. V místě odpadu laserového svazku je emitováno modré světlo, které je systémem parabolického zrcadla soustředěno na PMT. Na výstupu ze scanneru je nástroj k mazání (eraser), na kterém jsou umístěny led diody, které osvětlí fólii a tím ji vymažou. Tyto přístroje se používají především v případech, kdy potřebujeme zajistit mobilitu. [8,18]



Obr. 5.4 – Schéma rotačního scanneru HD-CR 35 NDT od firmy Dürr: Parabolic reflector – parabolické zrcadlo; Imaging plate – paměťová fólie; Photomultiplier (PMT) – fotonásobič; Control board – kontrolní panel; Laser source – laserový zdroj; Reflecting layer – odrazová vrstva; Flywheel – setrvačnick; Pentaprism – pentagonální hranol; Eraser – nástroj k mazání. [18]

Hlavními výrobci těchto přístrojů jsou v současnosti firma Dürr a General Electric (GE), proto je dále uvedeno srovnání scannerů od těchto dvou výrobců (Tab. 5.1). Firma Dürr má na trhu model HD-CR 35 NDT, jehož schéma je na obrázku 5.4, a firma GE nabízí model CR^x25P.

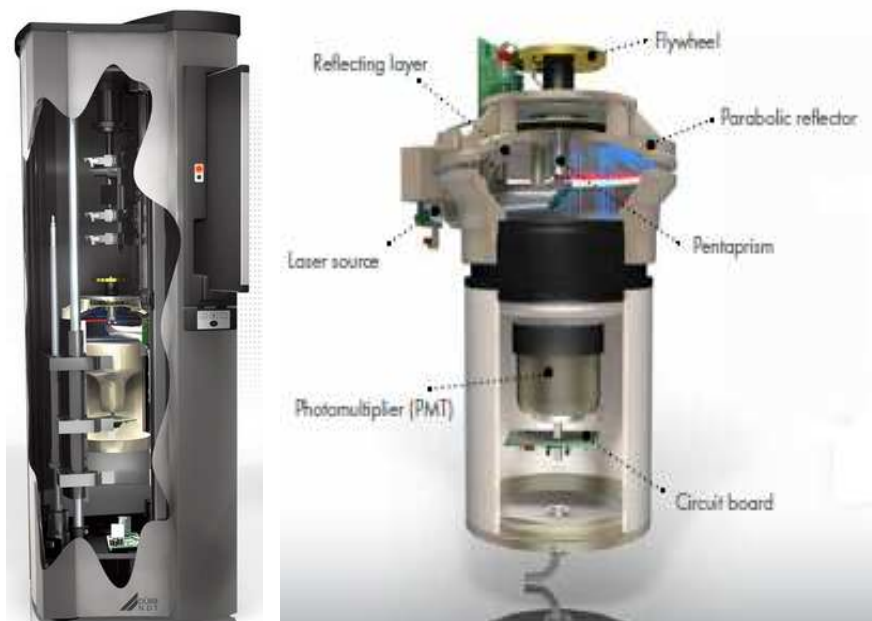
Tab. 5.1 – Srovnání scannerů HD-CR 35 NDT a CR^x25P

Výrobce	Dürr	General Electric
Typ	HD-CR 35 NDT	CR ^x 25P
Obrázek		
Rozměry (ŠxDxV) [cm]	38x52x39	39x42x35,5
Hmotnost [kg]	21	20
Napájení [V]	100 – 240	100 – 240
Třída laseru	I	I
Rozlišení [μm]	40	17
Maximální velikost skenované fólie	Šířka 35 cm, délka prakticky neomezená	35 x 43 cm

Jak lze vidět v tab. 5.1, scanner od firmy GE má lepší rozlišení, ostatní parametry jsou v podstatě srovnatelné. V praxi by tedy při výběru pravděpodobně rozhodla cena přístroje.

Dalším vyráběným typem jsou plně automatické scannery, které vyjmou fólii z kazety, přečtou ji, vymažou a uloží zpět. Fólie je potom okamžitě připravena k dalšímu použití. Díky automatizaci tyto přístroje podstatě urychlují práci a tím šetří i náklady. Také jsou šetrnější k fóliím, se kterými se nemusí ručně manipulovat, což výrazně snižuje možnost mechanického poškození a zvyšuje se jejich životnost. Nevýhodou by mohly být robustní rozměry a omezená mobilita [6,7,8,16].

Dále je opět uvedeno srovnání modelů automatických scannerů od firem Dürr (HD-CR 43 NDT – viz obr. 5.5) a GE (CRx Tower) – tab. 5.2.



Obr. 5.5 – Scanner typu HD-CR 43 NDT od firmy Dürr a schéma jeho optického systému: Parabolic reflector – parabolické zrcadlo; Photomultiplier (PMT) – fotonásobič; Circuit board – kruhový panel; Reflecting layer – odrazová vrstva; Flywheel – setrvačnický kotouč; Pentaprism – pentagonální hranol [18]

Tab. 5.2 Srovnání scannerů HD-CR 43 NDT a CRx Tower

Výrobce	Dürr	General Electric
Typ	HD-CR 43 NDT	CRx Tower
Obrázek		
Rozměry (ŠxDxV) [cm]	41x46x113	45x73x141
Hmotnost [kg]	56	210
Napájení [V]	100 – 240	100 – 240
Rozlišení [μm]	40	59
Velikosti skenovaných fólií [cm]	18x24; 24x30; 35x43	15x30; 20x25; 20x30; 35x42

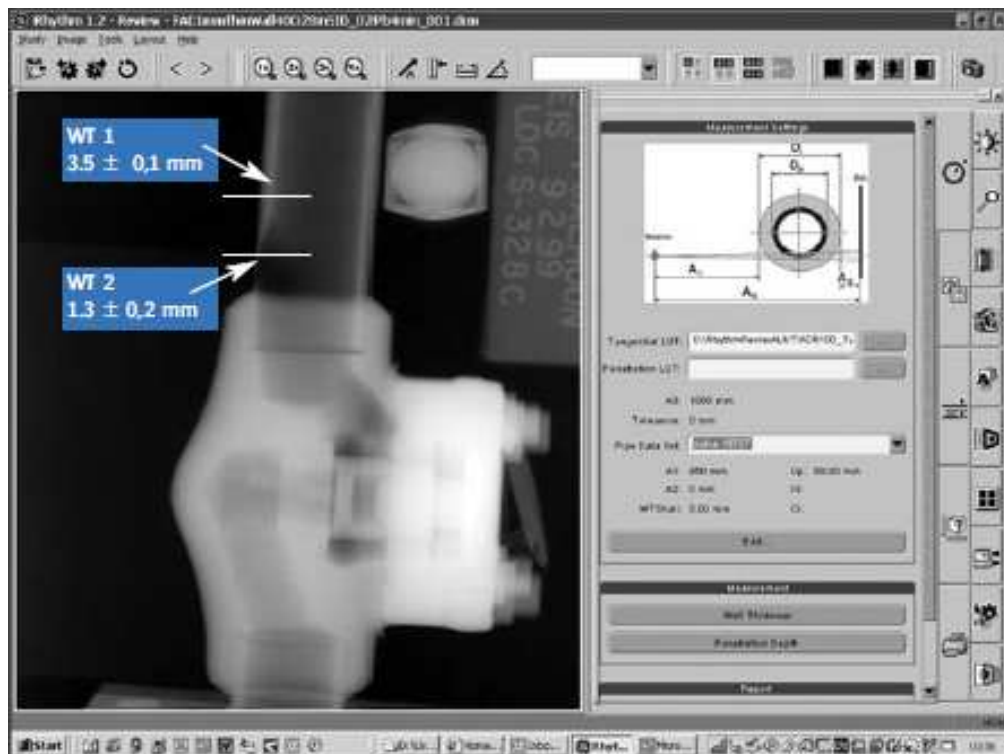
Scanner HD-CR 43 NDT od firmy Dürr má lepší rozlišení, kompaktnější rozměry, menší hmotnost a je novější, přístroj CRx Tower od firmy GE má zase širší možnosti volby scannované fólie. Na závěr by volbu pravděpodobně opět rozhodla cena.

5.2.4. Detekce vad pomocí paměťové fólie

Radiogram získaný pomocí paměťové fólie vypadá podobně jako z filmu, ale je negativní – co je na filmu černé, je na fólii bílé a naopak, takže vady jsou většinou bílá místa na černém pozadí.

K prohlížení jak radiogramů z paměťových fólií, tak naskenovaných filmů slouží speciální software, např. firma Dürr má software „D-Tect“ a firma GE software „Rythm“. Tyto programy jsou speciálně vyvinuty pro průmyslové použití a obsahují mnoho užitečných funkcí pro správu, zpracování a manipulaci s radiogramy, také mohou pomoci odhalit vady a detaily, které by normálně zůstaly pro lidské oko neviditelné. Na radiogramu se upravuje: jas, kontrast, ostrost, potlačuje se šum, může se různě otáčet, filtrovat, může se zobrazit inverzně, zvětšuje se, atd. Také lze do radiogramů přidávat různé poznámky [16].

Na obr. 5.6 je uveden náhled okna softwaru „Rythm“ firmy GE. Na obr. 5.6 je zobrazen ventil připojený k potrubí. Bílé čáry jsou značky nastavené operátorem na pracovišti, tloušťky stěn jsou následně vypočítány pomocí tohoto softwaru.



Obr. 5.6 – Náhled z programu „Rythm“ firmy GE [16]

5.3. Polovodičové detektory (DR)

Tomuto způsobu radiografie se říká přímá (direct radiography – CR). Jde o okamžité převedení intenzity záření na digitální obrazovou informaci. Expozice i vytváření obrazu tedy probíhá současně. Některé přístroje mohou zobrazovat rychlostí až 30 snímků za sekundu a objekt pak můžeme pozorovat opravdu v reálném čase (tzv. real-time) [2,16,32].

Různí výrobci dodávají různé typy panelů, které se odlišují především svou velikostí a rozlišením. Na rozlišení má vliv velikost jednoho pixelu – čím jsou menší a je jich více, tím je rozlišení lepší [16].

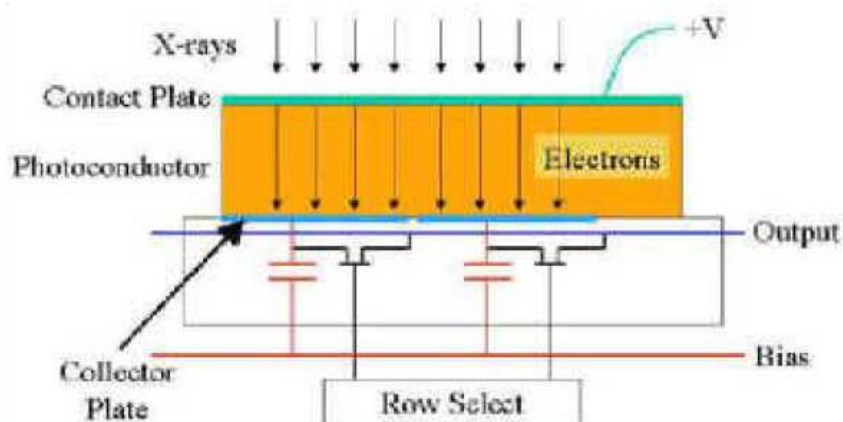


Obr. 5.7 – polovodičový detektor DRP 2020 NDT od firmy Dürr [18]

5.3.1. Princip funkce detektorů

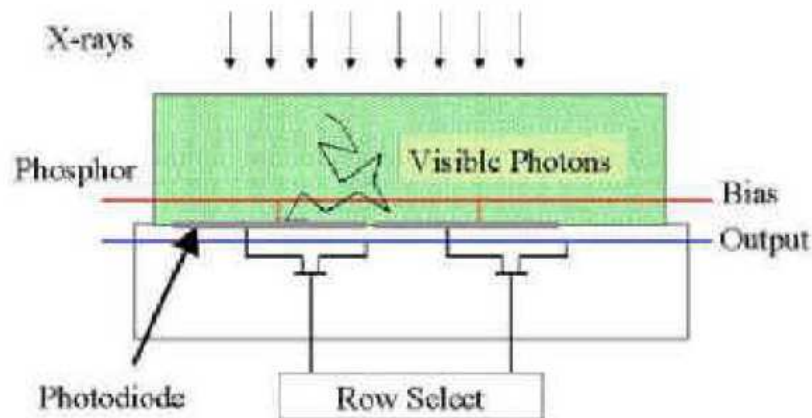
Jako základní materiál pro výrobu detektorů se používá amorfní křemík nebo amorfní selen [16,19].

- **Detektory na bázi amorfního selenu** – využívají přímou konverzi. Rentgenové (resp. gama) záření působí na vrstvu amorfního selenu, u něhož se tím změní elektrická vodivost. Emitované elektrony dopadají na sběrnou desku a jsou převáděny na digitální signál, který je odeslán do počítače zpracován pomocí softwaru. Zkládá se z detekční polovodičové vrstvy, která je nanesená na tenkou vrstvu tranzistorů TFT (Thin Film Transistor). Každé fotodiodě odpovídá jeden tranzistor [5,19,20].



Obr. 5.9 – princip detektoru na bázi amorfního selenu: X-rays – rentgenové záření, Contact Plate – detekční deska, Photoconductor – fotovodivá vrstva, Elestrons – elektrony, Output – výstup, Collector Plate – snímací deska, Row Select – výběr řádku, Bias – bias [21]

- **Detektory na bázi amorfního křemíku** – pracují s nepřímou konverzí. Rentgenové (resp. gama) záření dopadá na scintilátor a transformuje se na viditelné světlo, které je převedeno na odpovídající elektrický signál pomocí matice fotodiód nebo pomocí fototranzistorů. Signál je zpracován pomocí počítače, stejně jako u detektorů s nepřímou konverzí [5,16,19,20,21].



Obr. 5.9 – princip detektoru na bázi amorfního křemíku: X-rays – rentgenové záření, Phosphor – scintilátor, Visible Photons – viditelné fotony, Bias – bias, Photodiode – fotodiody, Row Select – výběr řádku, Output – výstup [21]

Detektory na bázi amorfního křemíku mají větší rozlišení, ale menší dynamiku než ty na bázi amorfního selenu. Dynamikou se rozumí citlivost v široké oblasti energií ve výsledku zčernání [16,19].

Hlavními výrobci polovodičových detektorů jsou opět firmy Dürr a General Electric (GE). Firma Dürr nabízí pouze typ DRP 2020 NDT, firma GE má ve své nabídce více typů, které se liší především svou velikostí.

Tab. 5.3 Srovnání polovodičových detektorů DRP 2020 NDT a DXR250RT

Výrobce	Dürr	General Electric
Typ	DRP 2020 NDT	DXR250RT
Obrázek		
Rozměry (ŠxDxV) [cm]	29,5x36x2,2	26x26x11,4
Hmotnost [kg]	6,5	14
Napájení [V]	100 – 240	100 – 240
Velikost jednoho pixelu [μm]	200	200
Velikosti aktivní (snímací) plochy [mm]	204,8x204,8	205x205

V tab. 5.3 je uvedeno porovnání dvou typů polovodičových detektorů, které mají srovnatelnou velikost aktivní oblasti. Hlavní rozdíl je v hmotnosti typů, polovodičový detektor typu DXR250RT má dvakrát vyšší hmotnost, než typ DRP 2020. Typ DXR250RT pracuje na bázi amorfního křemíku, firma Dürr složení detektoru na svých stránkách neuvádí.

Detekce vad pomocí polovodičových detektorů probíhá podobně jako u paměťových fólií, pomocí stejných speciálních softwarů.

6. Digitální radioskopie

Radioskopie je zobrazení obrazu záření procházejícího materiálem na obrazovce monitoru. Základem radioskopie jsou detektory záření, které transformují dopadající záření na optický nebo elektrický signál. Tento signál je zesílen a po digitalizaci dále zpracován a zobrazen na monitoru. Dalším znakem radioskopie je tzv. zobrazení real-time, tedy v reálném čase [5,16,22,30].

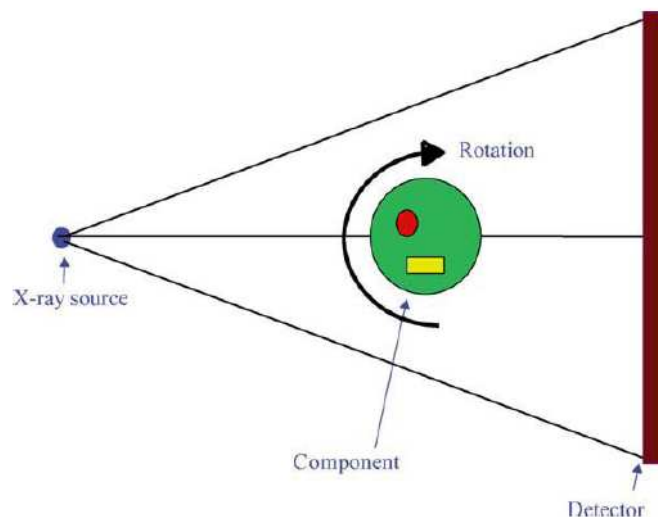
Hlavním představitelem digitální radioskopie je počítačová tomografie (CT), ale i polovodičové detektory, které real-time obraz přenášejí pouze omezeně (30 snímků za sekundu) [2].

6.1. Počítačová tomografie

Počítačová tomografie (CT) umožňuje zobrazovat tenké vrstvy v průřezu kontrolovaného objektu, a to v rovině svazku různých typů záření nebo vlnění procházejícího objektem [22,30,32].

Podstatou CT je počítačová rekonstrukce zobrazení určitého řezu objektu z naměřených dat, získaných při měření svazku záření v řadě projekcí při současné rotaci diagnostikovaného objektu nebo detektorů. Složením jednotlivých řezů lze získat detailní 3D obraz zkoušeného předmětu [16,22,23].

V průmyslu se nejčastěji používají tomografy třetí generace (princip je znázorněn na obr. 6.1). Zkoušená součást je umístěna na otočné desce a prochází přes ni rentgenové záření. Po průchodu součástí dopadá záření na detektor a je převáděno na digitální signál. V průběhu toho se součást otáčí tak, že je nasnímána ze všech úhlů [24].



Obr. 6.1 – princip CT 3. generace: X-ray source – zdroj rentgenového záření, Component – součást, Rotation – rotace, Detector – detektor [24].

Na trhu je dostupná celá řada přístrojů. Nejlepší z nich mají rozlišení až 1 μm (v závislosti na velikosti snímaného objektu). Příklad průmyslového tomografu je na obr. 6.2. Jde o typ v|tome|x L 240 od firmy General Electric, maximální rozlišení

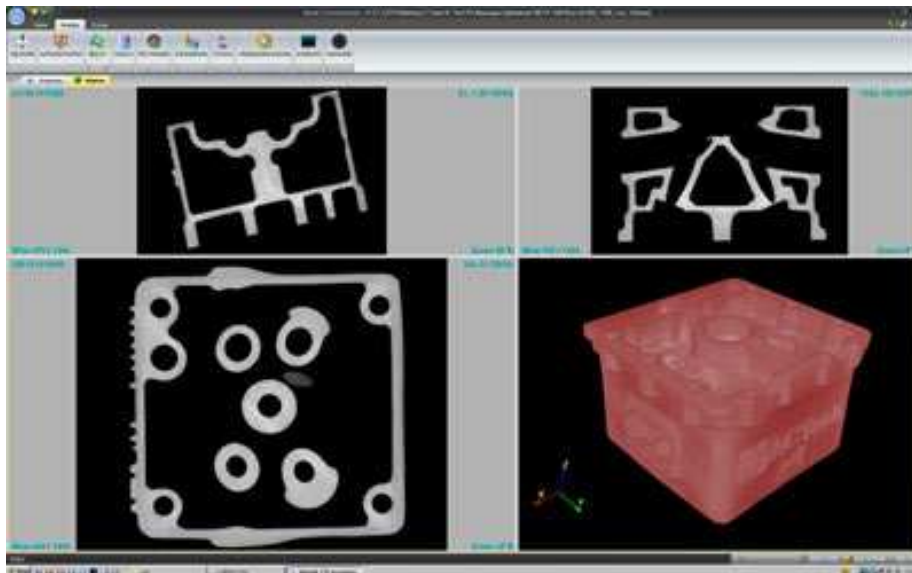
tohoto přístroje jsou 2 μm a může testovat součásti o maximální velikosti 1000x1250 mm a hmotnosti 100 kg [15,16].



Obr. 6.2 – tomograf typu v|tome|x L 240 od firmy GE [15]

Počítačová tomografie se v technické praxi používá především pro kontrolu kompozitních materiálů a vrstevnatých konstrukcí, odlitků a vysoce namáhaných keramických dílů.

Pro zpracování výsledných snímků se používá speciální software, který umožňuje zpracovávat 3D i 2D obrazy. Například firma GE používá program „datos|x“ (obr. 6.3), který umožňuje plně automatizovat celý testovací proces a následně zpracovávat jeho výsledky.



Obr. 6.3 – náhled z programu „datos|x“ od firmy GE

7. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vypracovat literární rešerši shrnující stav, současné trendy a moderní postupy prozařovacích metod nedestruktivního zkoušení materiálů. Tyto trendy spočívají téměř výhradně v možnostech digitalizace rentgenového obrazu.

Digitální radiografie, kromě digitalizace radiogramů na filmech, výrazně šetří náklady a životní prostředí. Jedna fólie, kterou lze použít až 1000x, je cenově srovnatelná s balíkem 100 ks vakuově balených filmů odpovídající kvality. Dále odpadají i náklady spojené s chemickým vyvoláváním klasických filmů. Polovodičové detektory nepotřebují žádné vyvolávání ani scannování, takže je práce rychlejší. Nejméně používaná je prozatím metoda počítačové tomografie, kterou nelze použít při kontrole součástí velkých rozměrů.

Bariérou pro využívání moderních metod v prozařování je v současné době nedostatečná legislativní podpora. Například i v harmonizovaných závazných požadavcích na výrobu tlakových nádob se hovoří pouze o kvalitě radiogramu v souvislosti s třídou citlivosti filmu. Přesto, že pro zákazníka by bylo pohodlnější použití některé z digitálních metod, už jen pro to, že k jejich hodnocení není potřeba negatoskopu, jejich zástupci, popř. notifikované osoby (inspektoři), stále upřednostňují klasické metody.

Seznam použité literatury

- [1] YXLON INTERNATIONAL GMBH. [online]. 2011 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://www.yxlon.com>
- [2] www.rentgen.eu [online]. 2007 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://www.rentgen.eu>
- [3] SODOMKA, Lubomír. *Rentgenové záření jako diagnostický prostředek materiálového inženýrství a nanotechnologie*. In: *Defektoskopie 2011: Sborník příspěvků 41. mezinárodní konference*. Brno: Vysoké učení technické v Brně ve spolupráci s Českou společností pro NDT, 2011. ISBN 978-80-214-4358-7.
- [4] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (Nauka o materiálu IV)*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [5] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. ISBN 80-730-0158-6.
- [6] PAPCO, s.r.o. [online]. 2008 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.papco.cz>
- [7] FOMA BOHEMIA SPOL. S R.O. [online]. 2004 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.foma.cz>
- [8] TESTIMA, spol. s r.o. [online]. 2011 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.testima.eu>
- [9] MARKARJANC, German. Rentgenová zkouška - základ defektoskopické kontroly. *TechMagazín: měsíčník pro technické obory, vědu, výzkum, strojírenství, plastikářský a automobilový průmysl, IT a technické školství*. Praha: Tech Media Publishing, 2011, roč. 2, 8/2011. ISSN 1804-5413. Dostupné z: http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/T082011M.pdf
- [10] SOLNAŘ, Josef. PTS - VZDĚLÁVACÍ STŘEDISKO. *Zkoušení materiálu prozařováním: Studijní materiály pro II. kavalifikační stupeň*.
- [11] PTS Josef Solnař s.r.o. [online]. 2011 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.ptsndt.com>
- [12] PORKERT, Zdeněk. Současné požadavky na rentgen. *NDT Welding Bulletin*. Praha: Agentura Tiret, 2003, roč. 13, č. 4, s. 25-30. ISSN 1213-3825.
- [13] PORKERT, Zdeněk. Mikrorentgen. *NDT Welding Bulletin*. Praha: Agentura Tiret, 2005, roč. 15, č. 4, s. 112-113. ISSN 1213-3825.
- [14] KOZA, Roman. Digitalizace radiogramů. *NDT Welding Bulletin*. Praha: Agentura Tiret, 2004, roč. 14, č. 1, s. 15-17. ISSN 1213-3825.
- [15] GENERAL ELECTRIC COMPANY. *GE Measurement & Control* [online]. 2012 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.ge-mcs.com>
- [16] GENERAL ELECTRIC COMPANY. *Industrial Radiography: Image forming techniques*. 2007. Dostupné z: http://www.ge-mcs.com/download/x-ray/GEIT-30158EN_industrial-radiography-image-forming-techniques.pdf
- [17] OPDEKAMP, Jimmy. Advancements in CR Radiography. *AIPnD - PnD Milano*. 2007. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/aipnd2007/files/orig/79.pdf>
- [18] DÜRR NDT GMBH & CO.KG. *Dürr NDT* [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.duerr-ndt.de>

- [19] PORKERT, Zdeněk. Zobrazovací systémy v radiografii a radioskopii. *NDT Welding Bulletin*. Praha: Agentura Tiret, 2003, roč. 13, č. 1, s. 23-25. ISSN 1213-3825.
- [20] HORÁK, Martin. *HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ RTG DSA ZOBRAZOVACÍCH SYSTÉMŮ*. Dostupné z: <http://home.tiscali.cz/martinftp/Projekt.pdf>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Aleš Drastich, CSc.
- [21] MARTINEK, Jiří. Digitalizace rentgenového obrazu: Použití v medicíně a defektoskopii. Dostupné z: <http://www.foma.cz/Upload/foma/prilohy/Digitalizace%20rentgenov%20obrazu%204.pdf>
- [22] www.ndt.cz [online]. 2008 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.ndt.cz/>
- [23] NOVÁK, Miroslav. Nedestruktivní 3D zobrazování s vysokým rozlišením. *TechMagazín: měsíčník pro technické obory, vědu, výzkum, strojírenství, plastikářský a automobilový průmysl, IT a technické školství*. Praha: Tech Media Publishing, 2011, roč. 2, 8/2011. ISSN 1804-5413. Dostupné z: http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/T082011M.pdf
- [24] MALCOLM, Andrew A. a Tong LIU. Case Studies in the Use of Computed Tomography for Non-Destructive Testing, Failure Analysis and Performance Evaluation. *SINCE* 2011. Dostupné z: http://www.ndt.net/article/SINCE2011/papers/5_Malcolm.pdf
- [25] PORKERT, Zdeněk. Digitalizace v rentgenové kontrole. *NDT Welding Bulletin*. Praha: Agentura Tiret, 2005, roč. 15, č. 4, s. 81-82. ISSN 1213-3825.
- [26] Digitalizace v radiografii. *NDT Welding Bulletin*. Praha: Agentura Tiret, 2009, roč. 19, č. 4, s. 54. ISSN 1213-3825.
- [27] ČSN EN 14784-1. *Nedestruktivní zkoušení - Průmyslová počítačová radiografie s fosforovými paměťovými fóliemi - Část 1: Klasifikace systému*. Český normalizační institut, 2006.
- [28] ČSN EN 14784-1. *Nedestruktivní zkoušení - Průmyslová počítačová radiografie s fosforovými paměťovými fóliemi - Část 2: Všeobecné zásady pro zkoušení kovových materiálů pomocí rentgenového záření a gama záření*. Český normalizační institut, 2006.
- [29] LEWINSKA-ROMICKA, Anna. *Badania nieniszczące: podstawy defektoskopii*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001, 600 s. ISBN 83-204-2641-3.
- [30] KLYUEV, V.V. a G.V. ZUSMAN. *Nondestructive Testing and Diagnostics: Handbook*. Huston: Metrix Instrument Co., 2004.
- [31] KLYUEV, V.V. *Nondestructive Testing: Handbook: Volume 1: Magnetic Testing, Eddy-Current Testing, X-ray Testing*. Moscow: Publishing house "SPEKTR", 2010. ISBN 978-5-904270-16-2.
- [32] ASM INTERNATIONAL. *Metals handbook. Volume 17: Nondestructive Evaluation and Quality Control*. 9th ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, c1978-c1989, 17 v. ISBN 08717000771.