Benedek Béla

DIGITÁLIS RADIOGRÁFIAI ANYAGVIZSGÁLAT © Dunaújvárosi Egyetem–Ecotech Nonprofit Zrt., 2022

© Benedek Béla, author, 2022.

A kötet A Dunaújvárosi Egyetem Paksi Kompetencia- és Kutatóközpontjának kialakításához szükséges feladatok ellátásához kapcsolódó 1734/2019. (XII. 19.) Korm. határozat alapján kapott támogatásból valósul meg.

DUNAÚJVÁROSI EGYETEM www.uniduna.hu D=U=E PRESS

Kiadóvezető Németh István

Felelős kiadó Dr. habil András István Felelős szerkesztő Nemeskéry Artúr

Tördelés Duma Attila Készült a HTSART nyomdában Felelős vezető Halász Iván **Benedek Béla**

DIGITÁLIS RADIOGRÁFIAI ANYAGVIZSGÁLAT

DUE Press Dunaújváros, 2022

TARTALOM

1. FIZIKAI ALAPISMERETEK (ISMÉTLÉS)	7
1.1 A RADIOGRÁFIAI VIZSGÁLAT MŰKÖDÉSI ELVE	7
1.2 A SUGÁRZÁS ÉS AZ ANYAG KÖLCSÖNHATÁSAI	22
1.3 GEOMETRIAI KÉPÁBRÁZOLÁSI FELTÉTELEK	28
2. A DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS ALAPJAI	45
2.1 A DIGITÁLIS LÁTÁS	45
2.2 DIGITALIZÁLÁS	47
2.3 DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS	50
2.4 KÉPTÁROLÓ LEMEZES RENDSZEREK	56
2.5 MÁTRIXDETEKTOROK	62
3. A DIGITÁLIS RADIOGRÁFIAI RENDSZER TULAJDONSÁGAI	71
3.1 KÉPMINŐSÉG	71
3.2 ALAPVETŐ BEFOLYÁSOLÓ PARAMÉTEREK	71
3.3 A KONTRASZT ÉS A KONTRASZT-ZAJ VISZONY	72
3.4 A KIS MÉRETŰ ELTÉRÉSEK FELISMERHETŐSÉGE	73
3.5 AZ MSZ EN ISO 19232 SZERINTI KÉPMINŐSÉGJELZŐK	75
3.6 AZ MSZ EN ISO 19232-5 SZERINTI KÉTHUZALOS	
KÉPMINŐSÉGJELZŐ	77
3.7 AZ ELÉRT KÉPMINŐSÉG	78
3.8 KÉPFELVÉTEL ÉS KÉPFELDOLGOZÁS	82
3.9 A KÉPADATOK SZŰRÉSE	88



97
97
103
112
116
131
131
132
134



1. FIZIKAI ALAPISMERETEK (ISMÉTLÉS)

1.1 A RADIOGRÁFIAI VIZSGÁLAT MŰKÖDÉSI ELVE

A radiográfiai vizsgálat célja, hogy olyan eltéréseket keressünk, melyek kiterjedése egybeesik az átvilágítás irányával. Ehhez nagyenergiájú sugárzásra (röntgen- vagy gammasugárzásra) van szükség, amely képes áthatolni az anyagon. A vizsgált tárgyakon áthatoló sugárzás (*1.1. ábra*) eltérő mértékben gyengül a test különböző tartományaiban: például az üregekben (pórusokban) kevésbé, mint a hibamentes anyagban. Ezt a gyengüléskülönbséget egy radiográfiai detektor képezi le, majd egy képfeldol-gozási folyamat után szürkeskála formájában jelenik meg a képernyőn.



1.1. ábra. Körvarrat átvilágítása

A radiográfiai vizsgálat sikeressége szempontjából a jó képminőség a meghatározó. A rosszul megválasztott vizsgálati paraméterek elégtelen képminőséget eredményeznek, ami megnehezíti, sőt akár el is lehetetleníti az eltérések értékelését (1.2. ábra).

- optimális felvétel.
- alacsony kontraszt.
- életlen kép.
- zajos kép.







1.1.1 Fogalmak

A röntgen- és a gammasugárzás – akár a látható fény vagy például a hősugárzás – szintén elektromágneses sugárzás (1.3. ábra). Nagy energiájuk (E) miatt a röntgen-, ill. gammasugárzás fotonjai a nem átlátszó anyagokon is képesek áthatolni. Az áthatolás során az anyag nem töri meg (nem téríti el) a sugárzást.





1.3. ábra. Az elektromágneses sugárzás energiatartományai

A röntgen- és a gammasugárzás fizikai szempontból nem különbözik egymástól, csupán létrejöttükben és emiatt energiaeloszlásukban térnek el. A folyamatos energiaspektrumú röntgensugárzás (ún. "fékezési sugárzás") röntgencsövekben az előzőleg felgyorsított elektronok lefékezése során jön létre. Ezzel szemben a gammasugárzás radioaktív atommagok bomlása során keletkezik.

1.1.1.1 Dózis (H) [Sv]/dózisteljesítmény (H') [Sv/h]

A dózisteljesítmény egy adott helyen az ionizáló sugárzás miatt elszenvedett terhelést adja meg. A radiográfiai vizsgálatokban legtöbbször a H ekvivalens sugárzási dózist vagy másképpen dózisegyenértéket használjuk, amely az ionizáló sugárzás mennyiségét annak biológiai hatása alapján értékeli. A dózis, ill. a H sugármennyiség a H' dózisteljesítményből számítható ki annak az időnek a szorzatával, amíg a röntgen- vagy gammasugárzás az elnyelőre hat:

A dózis mértékegysége a sievert (ejtsd: szívert), melynek rövidítése Sv. A dózis az ionizáló sugárzás által az elnyelő testnek leadott energiát fejezi ki. Gamma- és röntgensugárzás esetében 1 Sv = 1 J/kg. A dózisteljesítményt – azaz az egységnyi idő alatti sugárzásmennyiséget – sievert/órában (Sv/h) mérjük.

1.1.1.2 Energia (E) [keV]

A gamma-, ill. röntgensugárzás energiája alatt a fotonok energiáját értjük:

 $E = h \cdot v$



Atomerőműi Képzési Bázis

Itt a v a frekvencia, a h pedig az ún. Planck-állandó (hatáskvantum, természetes állandó). A sugárzás energiája meghatározó annak áthatoló képessége szempontjából.

Az energia, a dózis és a dózisteljesítmény közötti különbséget az alábbi egyszerű példával szemléltetjük:

Ha egy kamerában a fotófilmet a látható fény nem, de a rádiósugárzás elfeketíti, akkor az energia kérdése. Ha ugyanez a film kevésbé feketedik el a beltéri felvételeknél (megvilágítás nélkül), mint az azonos megvilágítási idővel, de szabadtéren készült felvételeknél, akkor az az intenzitás, ill. a dózisteljesítmény következménye. Ha pedig hosszabb ideig megvilágítva a film feketébb lesz, mint rövidebb megvilágítást alkalmazva, akkor az a sugárzásmennyiség, ill. a dózis következménye.

1.1.2 Ionizáció

Az atomok és az atomokból álló molekulák az anyagot felépítő elemi részecskék. Az atom atommagból és a körülötte keringő elektronok alkotta elektronfelhőből áll. Az atom elektromosan semleges, mivel az atommag pozitív töltésű protonjainak száma megegyezik az elektronfelhőben lévő, negatív töltésű elektronok számával. A kémiai elemek elektronjaik (illetve protonjaik) számában különböznek egymástól. Az atommagban a pozitív töltésű protonok mellett elektromosan semleges neutronok is találhatók. A neutron tömege csaknem teljesen megegyezik a protonéval. Az atommag tömegszáma megegyezik a benne található protonok és neutronok együttes számával.

A kvantumfizikai kutatások kimutatták, hogy az elektronfelhőben lévő elektronok csak bizonyos energiaállapotokat képesek felvenni, melyek az atommag körüli különböző helyeknek (elektronhéjaknak, ill. elektronpályáknak) felelnek meg. Amikor röntgen- és gammasugárzás hatol át az anyagon, akkor az kölcsönhatásba kerül az elektronfelhőben lévő elektronokkal. A fotonok kellően nagy energiájúak ahhoz, hogy elektronokat lökjenek ki az elektronfelhő belső héjaiból (*1.5. ábra*). Ezt a folyamatot nevezzük ionizációnak. Ennek során a foton energiája részben vagy teljesen átadódik a kilökött elektronoknak. Ennek eredményeképpen az elektromosan semleges atomból pozitív töltésű ion lesz. Az atomok ionizálására való képessége miatt a röntgen- és a gammasugárzást ionizáló sugárzásnak is nevezzük.



1.4. ábra. Az ionizáció elve



1.1.2.1 Biológiai hatás

Az ionizáló folyamatok rendkívül nagy jelentőséggel bírnak sugárvédelmi szempontból. Az emberi testben zajló élettani folyamatok biokémiai reakciókon alapulnak. A röntgen- vagy gammasugárzás hatására az emberi szövetekben keletkező ionoknak megnő a kémiai reakcióképességük, és beláthatatlan következményekkel járó, negatív hatást gyakorolnak az örökítőanyagra és az emberi sejtek reprodukciós folyamataira. Emellett a leváló elektronok energiája miatt plusz hőenergia is leadódik a testbe. A radioaktív sugárzás biológiai hatása többek között a sugárzás fajtájától, annak energiájától és az elnyelt dózistól függ.

A radiográfiai vizsgálat során alkalmazandó sugárvédelem szempontjából ez tehát azt jelenti, hogy a lehető legalacsonyabb és legésszerűbb értéken kell tartani a röntgen- és gammasugárzásnak való kitettséget, valamint az emberi testben ennek hatására végbemenő ionizációs folyamatokat. A jogszabályban meghatározott határértékeket minden körülmények között be kell tartani.

1.1.2.2 Elektromos, fotokémiai, fluoreszcens hatás

Az ionizációs folyamatoknak a röntgen- és gammasugárzás okozta (negatív) biológiai hatások mellett a sugárzás kimutatása és a dózis mérése szempontjából is nagy jelentősége van.

Az ionizáló sugárzás elektromos hatása a rossz elektromos vezetők vezetőképességének befolyásolásán alapul. Ezek az anyagok az ionizáció hatására elektromosan vezetővé válnak, vezetőképességük az ionizációs folyamatok számával egyenes arányban nő. Ez a dózisteljesítmény meghatározására használható.

A fotokémiai hatás a fényképészeti emulziók – például filmek – ionizáció okozta elfeketedésén alapul. A fotokémiai hatás az alapja mind a radiográfiai felvételnek, mind pedig a filmdoziméteres személyi dózismérésnek.

Végül pedig az ionizáció fluoreszcenssé tesz bizonyos anyagokat (azaz látható fényt bocsátanak ki). Az ionizáló sugárzás fluoreszcens hatása egyaránt használható a röntgensugaras átvilágításra, valamint a sugárvédelem terén magának a sugárzásnak a kimutatására és mérésére.

1.1.3 A röntgensugárzás létrehozása

A röntgencsőben három lépésben történik a röntgensugárzás létrehozása:

- 1. Szabad elektronokból álló felhő létrehozása a katódon.
- 2. Az elektronok felgyorsítása a katód és az anód közötti elektromos mezőben.
- 3. Az elektronok lefékezése az anódon.



1.5. ábra. A röntgencső elvi felépítése



A szabad elektronokból álló felhő létrehozása termikus emisszió útján történik a röntgencső katódján. Ehhez egy fűtőtranszformátor segítségével (néhány voltos fűtőfeszültséggel) elektromosan felfűtik a spirál alakú katódszálat. A katód és a vele szemben elhelyezett anód között nagyfeszültséget hoznak létre (tíztől néhány száz kV-ig). Ha a katód pozitív polaritású, akkor a negatív töltésű elektronok felgyorsulnak, majd az anódnak ütközve hirtelen lefékeződnek. Ennek során az elektronok mozgási energiája mintegy 99%-ban hővé, és csupán kb. 1%-ban röntgensugárzássá alakul. Az elektronok ütközéskori E mozgási energiája egyenesen arányos a katód és az anód közötti U nagyfeszültséggel. Ezért az elektronok és a folyamat eredményeképpen létrejövő röntgensugárzás energiáját rendszerint keV-ban adjuk meg (például az U = 100 kV E = 100 keV-nak felel meg).

Csak igen ritkán fordul elő, hogy az elektron energiáját egyetlen, nagyütközéssel alakítják át röntgensugárzássá, amikor is a maximálisan lehetséges EH határenergiájú foton jön létre. Sokkal gyakoribb, hogy több lépésben, ütközések sorozatával fékezik le az elektronokat, amelynek során létrejön a röntgencsőre jellemző fékezési spektrum és folyamatos eloszlású energia (1.6. ábra). A röntgensugárzás dózisteljesítménye egyaránt függ az I röntgenáram erősségétől [mA] és a csőre rákapcsolt U nagyfeszültségtől [kV]. Ha például egy U = 200 kV feszültséggel működtetett csőnél megkétszerezzük a röntgenáramot I = 5 mA-ről I = 10 mA-re, akkor a dózisteljesítmény is a duplájára emelkedik, ám a sugárzás energiája és ezáltal az áthatolóképessége is változatlan marad (1.6. ábra).







Ha viszont a csőre rákapcsolt nagyfeszültséget növeljük U = 100 kV-ról U = 200 kV-ra, ill. U = 400 kV-ra, akkor nemcsak a dózisteljesítmény, de a sugárzás energiája és ezáltal az áthatolóképessége is nő (1.7. ábra). Az itt ábrázolt spektrumok ideális állapotot mutatnak be. A valóságban azonban a sugárzás szűrődik, amikor kilép a csőablakon (saját szűrés). E folyamat során főként a lágy sugárösszetevők gyengülnek, ezért a maximum eltolódik a kemény sugárösszetevők irányába. Azért, hogy ez a hatás a lehető legkisebb mértékű legyen, az ablak anyagaként berilliumot használnak.





Összegzés:

- Feszültség növelése → nő a sugárzás energiája → nő a sugárzás áthatolóképessége → nő a sugárzás intenzitása.
- 2. Az áram növelése \rightarrow nő a sugárzás intenzitása \rightarrow az áthatolóképesség nem változik.
- Előszűrés → csökken a sugárzás alacsony energiájú összetevőinek aránya → csökken az intenzitás → lehetővé teszi a nagyobb falvastagság különbségek leképezését.



1.1.3.1 A fókuszfolt mérete (d)

Az elektronok anódnak ütközése egy apró, mindössze néhány mm²-es felületre koncentrálódik. Ezt a területet valódi vagy termikus fókuszpontnak nevezzük. A gyakorlatban viszont a d hatásos optikai fókuszpontot szokás megadni *(1.8. ábra)*. A termikus fókuszponttól függően változik a maximálisan lehetséges röntgenáram is. Ugyanakkora feszültség mellett a kis fókuszpontú csövek csak kisebb anódáramot és így kisebb dózisteljesítményt tesznek lehetővé.



1.8. ábra. Termikus és optikai fókuszpont

1.1.4 Röntgenberendezések

A röntgenberendezések a feszültségellátás fajtája szerint félhullámú és simított egyenfeszültségű középfrekvenciás berendezések csoportjába sorolhatók. A fémkerámia csövet, gázszigetelést és középfrekvenciás technológiát alkalmazó korszerű berendezések lényegesen kisebbek és könnyebbek, mint a régi félhullámú, 50 Hz-es generátorok, így már hordozható módon is alkalmazhatók. A többtartályos rendszerben a cső és a generátor két külön burkolatban van elhelyezve, és nagyfeszültségű kábellel van összekötve, míg az egytartályos berendezésekben a generátor és a cső egyetlen egységet alkot.

1.9. ábra. 420 és 160 kV-os félhullámú mobil berendezések





DIGITÁLIS RADIOGRÁFIAI ANYAGVIZSGÁLAT

A félhullámú berendezések dózisteljesítménye lényegesen alacsonyabb, mint a középfrekvenciás berendezéseké. Ezek a berendezések elektronikus vezérlésű, 20 kHz körüli frekvenciájú nagyfeszültség-generátorral üzemelnek. Az ily módon létrehozott nagyfeszültség inkább hasonlít az egyenfeszültségre, mint a váltófeszültségre. Ez a simított nagyfeszültség a félhullámú berendezésekéhez képest jóval nagyobb dózisteljesítményt eredményez a csőben. Az *1.10. ábrán* egy egytartályos, léghűtéses középfrekvenciás berendezés látható, melynek maximális gyorsítófeszültsége 200 kV.



1.10. ábra. 200 kV-os középfrekvenciás berendezés

1.1.5 Röntgencsövek

A röntgencsövek az alábbi szempontok alapján csoportosíthatók:

- felépítés (egy- és kétpólusú csövek; az anód fajtája),
- névleges feszültség,
- védőburkolat fajtája,
- használható szögtartomány,
- teljesítmény,
- fókuszfolt mérete.

A csövek bizonyos jellemzői függenek egymástól (például a teljesítmény és a fókuszpont mérete, a teljesítmény és az anód fajtája vagy a max. névleges feszültség és a felépítés).



1.1.5.1 Felépítés és névleges feszültség

Felépítés tekintetében egy- és kétpólusú csöveket különböztetünk meg. Az egypólusú csövekben csak a katódon van nagyfeszültség. Az anód le van földelve (0 V), így csak egyetlen nagyfeszültségű kábelre és egy nagyfeszültség-generátorra (mínuszgenerátorra) van szükség. Az egypólusú csövek anódjának hűtése 225 kV-ig vízzel, a középfrekvenciás, egytartályos berendezéseké pedig általában levegővel történik (1.11. ábra).

1.11. ábra. Az egypólusú cső vázlata



Az egypólusú csövek szigeteléstechnikai okokból általában nem működtethetők ésszerűen 225 kV feletti feszültséggel. Ezért ennél magasabb csőfeszültség esetén kétpólusú csövet használnak. Így a katódra kötött, max. -225 kV és az anódra kötött, max. +225 kV feszültséggel max. 450 kV összfeszültség hozható létre (1.12. ábra). A kétpólusú csövek hűtése olajjal történik, melyet hőcserélő/hűtő berendezés segítségével kell hűteni.

1.12. ábra. A kétpólusú cső vázlata



Napjainkban mindkét csőtípus esetében ún. fémkerámia csövekről van szó, melyeknél a fémköpeny és a nagyfeszültség alatt álló alkatrészek közötti kerámiatest látja el az elektromos szigetelést. A csőablak anyaga berillium. Ez az anyag alacsony szűrőhatással rendelkezik, így a lehető legkevésbé befolyásolja a sugárzási spektrumot.



Az ipari röntgenberendezésekben a röntgensugárzó anódjai ún. volfrám-targetek, melyek hűtéstechnikai okokból a kiváló hővezetőként is ismert vörösréz környezetbe vannak beépítve.

A mikrofókuszú és nanofókuszú csövek rendkívül apró fókuszpontú csövek, melyek gyakran ún. nyitott csövek. Ez azt jelenti, hogy egy külön vákuumszivattyút kell használni a csőtest légtelenítésére. Az ilyen rendszerekben a fűtőspirál és az anód szükség esetén kicserélhető. Emellett azonban léteznek zárt mikrofókuszú csövek is.

A mikro- és nanofókuszú csövekben fókuszálórendszerek találhatók, melyek nyalábosítják az elektronsugarat. Ennek vázlatos felépítését az 1.13. ábra szemlélteti. A hagyományos csövekkel ellentétben itt van egy fókuszálótekercs és egy Wehnelt-henger a sugárnyalábosításhoz, valamint egy X–Y-eltérítő rendszer, amellyel optimálisan pozícionálható a fókuszpont az anódon. A fókuszpont mérete jellemzően a 10 µm-es tartományban van, a teljesítmény pedig kb. 10 W. Az ennél nagyobb teljesítmény nagyobb fókuszpontot eredményez. A nanofókuszú csövekkel 1 µm-nél kisebb struktúrák képezhetők le. A mikroés nanofókuszú csöveket elsősorban az elektronikai iparban használják különböző vizsgálati feladatokra. A reflexiós targetek mellett léteznek transzmissziós targetek is.



1.13. ábra. Reflexiós targettel rendelkező, mikrofókuszú cső elvi vázlata

1.1.5.2 Fókuszpont mérete és teljesítmény

Speciális alkalmazások esetén a röntgencső kiválasztásának egyik fontos szempontja a fókuszpont mérete. A radiográfiai vizsgálathoz a fókuszpontok az alábbi séma szerint csoportosíthatók.



Fókuszpont fajtája	Fókuszpont mérete
Normál	≥ 1,0 mm
Minifókusz	0,1–1,0 mm
Mikrofókusz	≤ 100 µm; változó
Nanofókusz	< 1 µm; változó

1.1. táblázat: Röntgencső típusok csoportosítása a fókuszpont mérete szerint

A fókuszpontok méretének meghatározása az MSZ EN 12543 szabvány szerint olyan kiértékelési eljárás keretében történik, amelynél a fókuszpont mérete a tényleges méreteknek felel meg. Nanofókuszú csövek esetében a fókuszpont mérése problémás, és nem is szabályozza egyetlen szabvány sem; az MSZ EN 12543 csak 3 µm feletti fókuszpontra alkalmazható.

Ahogy az az 1.14. ábrán is látható, a fix anódok esetében közvetlen fizikai összefüggés van a röntgencső teljesítménye és a fókuszméret között. Ez változatlanul folytatható a mikrofókuszú tartományig. Azonos hűtési elv esetén az összefüggés viszonylag lineáris (szaggatott vonal az 1.14. ábrán). A hordozható berendezésekben alkalmazott, léghűtéses csövek csak alacsonyabb tartós teljesítménnyel üzemeltethetők (kör). Az újfajta HP hűtési technológiával lényegesen nagyobb anódterhelhetőség valósítható meg.



1.14. ábra. A csőteljesítmény és a fókuszméret összefüggése



1.1.6 Gammasugárzók/izotópok

Azokat az atomokat, melyek azonos protonszámú, de eltérő tömegszámú (azaz eltérő számú neutront tartalmazó) atommagokat tartalmaznak, az adott kémiai elem izotópjainak nevezzük. Az izotópokat a kémiai elem vegyjelével és az utána álló tömegszámmal lehet egyértelműen leírni (például Co60).

A protonok és neutronok számának aránya érzékeny kritérium az atommag stabilitása szempontjából. Számos elemnek több stabil izotópja is ismert, míg vannak olyanok is, amelyeknél egy sem. Az instabil atommagokat radionuklidoknak (radioaktív izotópoknak) nevezzük. Ezek mindegyike radioaktív, azaz részecske- és/vagy gammasugárzás formájában történő energialeadás kíséretében spontán átalakulásra törekszenek. A radioaktív bomlás eredményeképpen a legtöbb esetben a magtöltésszám is megváltozik. Tehát egy másik elem atommagja jön létre. Ez az atommag lehet stabil vagy ugyancsak radioaktív, ami további bomlási folyamatokkal jár egészen addig, amíg az atommag el nem ér egy stabil állapotot.

A bomlásuk során gammasugárzást kibocsátó radionuklidokat (például Se75, Ir192, Co60) a radiográfiai vizsgálatban gamma-sugárzóknak nevezzük. Ezeket mesterségesen hozzák létre úgy, hogy egy atomreaktorban neutronokkal bombáznak megfelelő izotópokat. A folyamat során neutronbefogás miatt létrejövő izotópok a neutronfeleslegük miatt radioaktívvá válnak. A gamma-sugárzók egy, ill. több meghatározott energiájú sugárzást bocsátanak ki. Ez a vonalas spektrum jellemző az adott gammasugárzóra (1.15. ábra).





A röntgensugárzással ellentétben – melynek folyamatos spektruma és ezáltal energiája is a röntgencsőre kötött nagyfeszültséggel befolyásolható – a gamma-sugárzók vonalas spektruma nem befolyásolható semmilyen külső paraméterrel sem. Következésképpen a például Ir192-vel készült felvétel kontrasztja mindig ugyanolyan.



1.1.6.1 Radioaktivitás/felezési idő

A gamma-sugárforrás radioaktivitását az egységnyi idő alatt végbemenő radioaktív bomlások száma jelenti.

Aradioaktivitás SI mértékegysége a becquerel (Bq): 1 Bq = 1 bomlás/másodperc. Aroncsolásmentes vizsgálatban a forrás radioaktivitását curie-ben (Ci) szokás megadni: 1 Ci = 37 GBq. Egy curie, azaz másodpercenként 37 milliárd bomlás 1 gramm Ra₂₂₆ rádiumizotóp radioaktivitásának felel meg.

A mesterséges radionuklidok radioaktív bomlása már akkor megkezdődik, amikor a reaktorban létrejön a radioaktív anyag, ami végül a roncsolásmentes vizsgálathoz fontos gamma-sugárzók esetében stabil magot eredményez. A még sugárzó anyag mennyisége az idő előrehaladtával egyre kisebb. Ezáltal csökken a radioaktivitás, vagyis az egységnyi idő alatt végbemenő bomlások száma, miközben a sugárzás energiája változatlan marad. Ennek az aktivitáscsökkenésnek az egyszerű mérésére vezették be a felezési időt. A felezési idő jellemző az adott sugárzó anyagra, és azt fejezi ki, hogy mennyi idő után csökken a felére az A₀ kezdeti aktivitás (például a forrás kiszállításának napján mért aktivitás). Az Ir₁₉₂ (*1.16. ábra*) felezési idéje 74 nap. Minden sugárzó anyaghoz tartozik egy aktivitási táblázat, amelynek alapján tetszőleges időpontban meghatározható a mindenkori A-aktivitás.

1.16. ábra. Az Ir₁₉₂ bomlásgörbéje



1.2. táblázat. Azonos értékű röntgenenergiák és felezési idők

Sugárzó anyag	Ekkora röntgensugárzás energiának felel meg:	Felezési idő
Itterbium Yb169	kb. 250	31 nap
Szelén Se75	350–500	120 nap
Irídium Ir192	500–600	74 nap
Kobalt Co60	2000–2500	5,2 év



1.1.7 A gamma-sugárzó készülékek felépítése

A gamma-sugárzó készülékek lényegesen kompaktabb és egyszerűbb felépítésűek, mint a röntgenkészülékek, mivel alapjában véve csak mechanikus manipuláló berendezések. E készülékek feladata lényegében az, hogy nyugalmi helyzetben a lehető legjobban leárnyékolják a radioaktív anyagot, ill. üzemi helyzetben kúp- vagy gyűrűalakú sugárzási viszonyokat hozzanak létre.

1.1.7.1 A sugárzó/készülék

Sugárzó alatt olyan radioaktív anyagot értünk, amelyet sűrű burok vesz körül. Ennek a buroknak biztosítania kell, hogy az üzem közben előforduló igénybevételek során a radioaktív anyag ne juthasson ki a burkon kívülre. A radiográfiai vizsgálat céljára csak "különleges formájú, zárt radioaktív források" jöhetnek szóba.

A készülék (1.17. ábra) az alábbi elemekből épül fel:



1.17. ábra. 2-es kategóriájú gamma-sugárzó készülék

A készüléknek olyan biztonsági berendezésekkel kell rendelkezniük, melyek megakadályozzák, hogy illetéktelenek kinyithassák a készüléket, és hogy a sugárzó ne eshessen ki a készülékből, ha a távvezérlő nincs csatlakoztatva.

1.18. ábra. Ir192 munkatároló különböző kollimátorokkal



1.2 A SUGÁRZÁS ÉS AZ ANYAG KÖLCSÖNHATÁSAI

1.2.1 A sugárzás gyengülése

A röntgensugárzás egyik lényeges tulajdonsága az áthatolóképessége. Ez azt jelenti, hogy a sugárzás átmegy a vizsgált darabon, és közben gyengül. Az így kialakuló gyengülési profilt egy a célra alkalmas detektor érzékeli, és leképezi a radiográfiai képet.

A sugárzás vizsgált darabon való áthatolásakor kialakuló kölcsönhatások jobb megértéséhez képzeljük el a sugárzást meghatározott energiájú részecskékként. Az elektromágneses sugárzás esetében ezeket a részecskéket fotonoknak vagy kvantumoknak nevezzük. A gyengülést úgy kell elképzelni, mint a vizsgált darab atomjainak elektronjaival való lökésszerű kölcsönhatást. Az ezen a tanfolyamon bemutatott alkalmazások energiatartománya (kb. 40–450 keV) szempontjából a gyengülés két részfolyamat összegeként írható le: az abszorpció és a szóródás.

Azokat a rendkívül összetett, másodlagos folyamatokat, melyek az atomok ideiglenes ionizációja ellen hatnak, itt nem ismertetjük részletesebben. Ezenkívül arra is felhívnánk a tisztelt olvasó figyelmét, hogy a röntgensugárzás és az anyag között végbemenő kölcsönhatások a valóságban sokkal bonyolultabbak. Az itt felvázolt, leegyszerűsített információk azonban bőven elegendőek ehhez a tanfolyamhoz.



1.2.1.1 Fotoelektromos abszorpció miatti sugárzásgyengülés

A fotoelektromos abszorpció nem más, mint a tulajdonképpeni kívánatos és képalkotó hatás. E folyamat során a röntgensugárzás fotonjainak energiája átadódik az ütközésben résztvevő anyagnak (elnyelődik benne). Ezután az anyag fotoelektron felszabadulásának és karakterisztikus röntgensugárzás keletkezésének formájában leadja az energiát. (1.19. ábra).



1.19. ábra. Foton fotoabszorpciója az elektronfelhő egy elektronjánál

1.2.1.2 Szóródás miatti sugárzásgyengülés

A szóródás során a röntgenfoton irányváltást (szóródást) végez, ami vagy energiacsökkenéssel jár, vagy nem (Compton- vagy Rayleigh-szórás). Mivel már 40–60 keV-os energiától nem a Rayleigh-szórás, hanem leginkább a Compton-szórás dominál, a továbbiakban csak a Compton-hatást vizsgáljuk. Itt az ütközéskor a foton energiacsökkenést szenved el, azonkívül egy ún. Compton-elektron is felszabadul (2.20. ábra). Az ily módon létrejövő szórt sugárzás egyenletesen terjed minden irányban, ezért a radiográfiában nem alkalmas a képalkotásra. Ez úgy képzelhető el, mint egy minden oldalról megvilágított tárgy, amely nem vet árnyékot a látható fény tartományában.



1.20. ábra. A Compton-szóródás



A két fenti hatás eredőjeként kapott sugárzás gyengülése erősen függ a sugárzás E energiájától. Az energia növekedésével erőteljesen csökken a gyengülés mértéke. Az, hogy éppen melyik hatás dominál, a fentieken túl függ a vizsgált tárgy anyagának Z-rendszámától is *(1.21. ábra)*.





1.2.1.3 A röntgensugárzás gyengülési törvénye

Az, hogy konkrét esetben hogyan jelenik meg a sugárzás gyengülése miatti intenzitásprofil a vizsgált tárgy mögött, nem fordítható le a matematika nyelvére. A sugárzás gyengülésének mennyiségi leírása csak nagyon-nagyon leegyszerűsített, és a gyakorlattól messze elrugaszkodott feltételezések mellett sikerülhet:

- szűk sugárnyaláb,
- monoenergetikus sugárzás (csak egy vonal a spektrumban).

Ennek ellenére sokféle alkalmazás szempontjából hasznos, ha ezekkel az előfeltételekkel írjuk le matematikailag a sugárzás gyengülésének alakulását:

 $I = I_o \cdot e^{-\mu \cdot w}$

- ahol: I a vizsgált darab mögötti intenzitás,
 - I₀ gyengítetlen sugárzásintenzitás,
 - μ gyengülési együttható,
 - w a vizsgált darab átvilágított falvastagsága.

A µ gyengülési együttható az alábbiaktól függ:

- energia,
- anyagszerkezet.



A sugárzás energiájának növekedésével a gyengülési együttható egyre csökken (1.22. ábra), magyarán a vizsgált darab egyre átlátszóbbá válik, tehát egyre kevesebb sugárzást nyel el. Ez azt is jelenti, hogy ugyanazon vizsgált darab két különböző falvastagsága az energia növelésével egyre kisebb intenzitáskülönbséggel (KS sugárkontraszttal) képezhető le.





1.2.2 A sugárzás keményedése az előszűrés hatására

A teljes intenzitás lecsökken, az átlagos energia és az intenzitás maximumának helye pedig a magasabb energia irányába tolódik (1.23. ábra).

Az előszűrésre használt, elterjedt anyagok az 1–5 mm vastagságú alumínium (AI) és a 0,2–1 mm vastagságú vörösréz (Cu).



1.23. ábra. A spektrum változása előszűrés esetén



1.2.3 A sugárkontraszt

A sugárkontrasztnak különösen nagy jelentősége van a vizsgálat szempontjából, mivel rendszerint szoros összefüggés van az anyaghibák felismerhetősége és a radiográfiai vizsgálat képének kontrasztaránya között. A sugárzás energiájának növekedésével a gyengülési együttható egyre csökken, magyarán a vizsgált darab egyre átlátszóbbá válik, tehát egyre kevesebb sugárzást nyel el. Ez azt is jelenti, hogy ugyanazon vizsgált tárgy két különböző falvastagsága az energia növelésével egyre kisebb ΔI intenzitáskülönbséggel képezhető le (1.24. ábra).



1.24. ábra. Az intenzitáskülönbség és az energia összefüggése

A vizsgált tárgy mögötti teljes intenzitás a sugárzásgyengüléskor lejátszódó fizikai folyamatoknak megfelelően mindig a gyengített primer sugárzásból (abszorpció) és a szórt sugárzásból tevődik össze. Mivel a szórt sugárzás egyenletesen terjed minden irányban, kis Δw anyagvastagság-különbség mellett a szórt sugárzás hányada mindenütt azonos a vizsgált tárgy mögött. Ezért a szórt sugárzás "diffúz" jellege alapintenzitásként jelenik meg a radiográfiai képen.







A hibafelismerés szempontjából fontos és a Δw falvastagság-változás által előidézett ΔI intenzitáskülönbség tehát csak a gyengített I_{P1} és I_{P2} primer sugárzás különbsége

$$K_{_{\mathrm{S}}} = \Delta I = I_{_{\mathrm{P1}}} - I_{_{\mathrm{P2}}}$$

Ez a K_s sugárkontraszt.

A szórt sugárzás tovább erősíti a primer sugárzás képét. A primer sugárzás képére végeredményben egy második, életlen kép rakódik. Ezt öntvények vizsgálatakor figyelembe kell venni a különböző falvastagságok átvilágításához.

A gyakorlati vizsgálat szempontjából az alábbi következtetések vonhatók le:

Levegővel, ill. gázzal teli üregek – például lunker stb. – esetében magas, csakis a hiba mélységi kiterjedése, a vizsgált tárgy anyaga és a szóródási arány által meghatározott sugárkontrasztot kapunk. Ez síkszerű hibákra és repedésekre is igaz.

Fémes zárványok esetében magas sugárkontrasztot kapunk, ha a vizsgált tárgy anyaga és a zárvány gyengülési együtthatóinak különbsége nagy. Ez különösen és igen gyakran könnyűfém öntvények esetében van így. Természetesen itt is igaz, hogy a besugárzási irány változtatásával elérhető az optimális sugárkontraszt.

1.2.4 Jel, kontraszt és zaj a digitális képen

A sugárzás "kvantumtermészetének" szemléltetésére az ún. "részecskemodellt" használjuk. Ez szemléletesen azt jelenti, hogy a sugárzást részecskeáramként kell elképzelni. Így állandó anyagvastagságú anyagok átvilágításakor mindig csak egyetlen középértéket kapunk, amely körül az intenzitás ingadozik (1.26. ábra). Ezt a középérték körüli ingadozást nevezzük zajnak.



1.26. ábra. Az átlagos intenzitás zaj általi elfedése



1.2.4.1 A különböző zajforrások vizsgálata

A **fotonzaj** a túl alacsony dózisú sugárzás következtében keletkezik a képen (alacsony mA·min vagy GBq·min beállítás). A kép jel-zaj aránya (SNR) az expozíciós dózissal együtt nő.

Érzékelő oldali zajforrások:

A mátrixdetektorok és a képtároló lemezek **strukturális zaja**, amely az egyes pixelek érzékenységének különbségéből és a foszforréteg inhomogenitásából adódó állandó zajminta.

Tárgyoldali zajforrások:

Az anyag (például nikkelalapú ötvözetek) kristályszerkezete röntgen diffrakciós hatások ("mottling") formájában, valamint a vizsgált tárgy felületi érdessége.

Az első két zajforrás az expozíciós körülmények változtatásával és a detektor kiválasztásával befolyásolható. A felvételeken elért jel-zaj viszony (SNR) a foton statisztika javulása miatt a dózis négyzetgyökével nő. A képtároló lemezek zaja messzemenően azok gyártási folyamatától függ. A mátrixdetektorok pixeleinek különbözőségéből eredő zaj a detektor kalibrálásával jelentősen csökkenthető. A kalibrálással kiegyenlíthetők az egyes pixelek közötti különbségek.

1.2.4.2 A jel-zaj viszony (SNR)

A zajnak hasznos jelre gyakorolt hatásának mértéke az ún. jel-zaj viszonnyal definiálható (angolul: signal to noise ratio, SNR), amely az I0 intenzitási középérték és a σ zajamplitúdó hányadosa.

A jel-zaj viszonynak a filmes radiográfiával ellentétben sokkal nagyobb jelentősége van a digitális radiográfiában, mivel itt a létrehozott radiográfiai képek részben közvetlenül ("élőben") vizsgálhatók a megfelelő érzékelőkkel. A hagyományos radiográfiában a szükségszerűen lényegesen hosszabb megvilágítási idők miatt az intenzitás "átlagolódik", ami kellően nagy SNR-t eredményez, ezért a zaj képminőségre gyakorolt hatása elhanyagolható. A digitális radiográfiában ezért vagy megfelelően nagyobb intenzitásokkal kell dolgozni (már amennyire ezt a sugárforrás lehetővé teszi), vagy pedig digitális képfeldolgozó rendszerek segítségével kell elvégezni az intenzitás átlagolását.

1.3 GEOMETRIAI KÉPÁBRÁZOLÁSI FELTÉTELEK

1.3.1 A röntgencsövek fókuszfoltja

Az anód anyagának azt a területét, ahol a katód által kibocsátott elektronok becsapódnak, ún. termikus fókuszfoltnak nevezzük. Ennek a termikus fókuszpontnak a mérete az elektronsugár fókuszáltságától, valamint a fűtőspirál méretétől és elhelyezkedésétől függ. Mivel az elektronok lefékeződésekor az anód anyagában kb. 99%-ban hő keletkezik és csupán kb. 1%-ban jön létre röntgensugárzás, az anód anyagának magas olvadáspontú anyagból kell készülnie. Erre a célra általában volfrámot használnak (olvadáspontja kb. 3 000 °C). A fókuszban az átlagos hőmérséklet kb. 800 °C, de ennél sokkal magasabb csúcsértéket is elérhet.



A hatásos vagy optikai fókuszfoltot úgy kapjuk meg, hogy levetítjük a termikus fókuszpontot a központi sugárra merőleges felületre (1.27. ábra). Ezért ennek mérete a radiográfiában elemi fontosságú a leképezés minősége szempontjából. Az optikai fókuszpont mérete a termikus fókuszpont mellett elsősorban az anód felülete és a központi sugár által bezárt szögtől, az ún. β anódszögtől függ. A hagyományos durvastruktúrájú csöveknél ez az érték kb. 20°. A röntgensugárzás minden irányban terjed. Az anódszög és a sugárkilépési ablak kb. 40°-ra korlátozzák a hasznos sugárnyalábot. A fókuszpont legnagyobb mérete a radioszkópiában alkalmazástól függően 0,3 mm és max. 1,5 mm között mozog, míg a radiográfiában a néhány milliméteres értéket is elérheti. A leképezés legszigorúbb minőségi követelményeihez olyan mikrofókuszú csöveket használnak, melyek fókuszpontjának mérete 0,1 mm-nél is kisebb.





1.3.2 Fókuszfoltmérés

A korábbi IEC-szabvány kiterjedés nélküli, névleges fókuszméretet (fókusznévértéket) határozott meg. Így a furatkamerás módszerrel rögzített röntgen fókuszfolt eredményét összehasonlították az IEC által megadott referenciatáblázattal. Ez az eljárás azonban problémás volt, mert a meghatározott névértékeknek csak igen kevés közük volt a fókuszfolt valós fizikai méreteihez.

Ezért a röntgenkészülékek tulajdonságainak európai szabványosításakor (CEN TC 138 WG1) figyelembe vették a számítási módszert is, mivel különösen a radioszkópiában igen nagy jelentősége van a fókuszfolt méretének pontos meghatározásának. Ezért a szabványtervezet 1. részében meghatároztak egy referencia mérési eljárást, amellyel minden további eljárás összehasonlítható. Továbbá ebben a szabványtervezetben definiálták a fókuszfolt méretének a mérési eredmények alapján történő, pontos meghatározását is, melyet a többi szabványos számításhoz és határérték-meghatározáshoz kell használni.



1.3.2.1 MSZ EN 12543-1 Pásztázó eljárás

A fókuszfolt mérésére szolgáló ún. pásztázó eljárás olyan radiometriai módszer, amely a fókusz soronkénti letapogatásán (szkennelésén), majd a fókuszfolt méretének kiszámításán és háromdimenziós grafikus ábrázolásán alapul.

1.28. ábra. Radiometriai fókuszfoltmérésre szolgáló mérőberendezés

Adatfeldolgozó PC	Szcintillációs számláló	Előkollimátor	Röntgencső
sz	órt sugárzás Kere védelem kol 10 μm x 1	esztréses limátor 0 μm x 20 mm	

A röntgencső durván kollimált központi sugarát szcintillációs számláló méri meg egy 10 µm x 10 µm hatásos nyílásméretű, keresztréses kollimátoron keresztül (*1.30. ábra*). A mérőkollimátor divergenciája 1:2000. Az előkollimátor, a kollimátor és a szcintillációs számláló egy precíziós keresztszánra van felszerelve, mozgatásuk léptetőmotorral történik. A kimeneti jelet egy számítógép fogadja megfelelő mérési érték rögzítővel, amelynek pontosan szinkronban kell lennie a keresztszán vezérlésével. A soron-kénti szkennelés meghatározott lépésközzel történik. Ez a lépésköz a kívánt felbontástól függ. A szoftver lehetővé teszi a szemléletes grafikus ábrázolást és a fókuszpont méretének pontos meghatározását.

Az 1.31. ábrán egy jellemző, élesen kirajzolódó nyeregstruktúrájú fókuszpont mérési eredménye látható. A térbeli ábrán az intenzitási eloszlás maximális értékei megfelelnek a maximális intenzitásoknak, ami a lyukkamerás módszernél a legnagyobb mértékű elfeketedést jelenti.



1.29. ábra. A pásztázó eljárás eredménye



Az *1.32. ábrán* a fókuszfolt intenzitási eloszlása "szintvonalak" formájában van ábrázolva. Ez az ábrázolás a maximális intenzitás 10%-a és 90%-a közötti izodózisokat mutat.



1.30. ábra. A pásztázó eljárás eredménye izodózisos ábrázolás formájában

Az új szabvány az izodózisos ábrázolás 10%-os izodózisai közötti hosszúsági és szélességi maximális kiterjedést definiálja a fókuszpont méreteként. Ezen túlmenően a radiográfia e két méret legnagyobb értékét definiálja.

1.3.2.2 MSZ EN 12543-2 Furatkamerás radiográfiai módszer

A szabvány ezen része a furatkamera leképezési feltételeit határozza meg.



1.31. ábra. Fókuszfoltmérés furatkamerás leképezéssel



A fókuszfolt méretének méréséhez egy ólomköpennyel borított furatkamerát helyeznek a cső kilépési ablaka elé. A kamera furatának mérete 0,8 mm-nél nagyobb fókuszpontméret esetén 30 μm, 0,8 mm-nél kisebb fókuszpontméretű, minifókuszú csövek esetén pedig 10 μm. Az 1,2-nél, ill. 2,5-nél nagyobb fókuszpontmérethez 75, ill. 100 μm a furat megengedett mérete. A fókusz leképezése röntgenfilmre történik. Az *1.33. ábrán* egy röntgencső fókuszfoltjának nagyított képe látható. Ezt megmérik a filmen, és a kamera felépítéséből adódó nagyítási aránynak megfelelően korrigálják.

Ennél a mérésnél különböző problémák jelentkeznek, melyek jelentős mértékben befolyásolhatják a mérési eredményt:

- a kamera furata életlenül hozza létre a fókuszpont képét,
- a kamera furatának pontosan a központi sugárba kell esnie.

Ennek az eljárásnak legnagyobb hátránya a korlátozott energiatartomány (max. 60–70 keV), mivel az ennél nagyobb energia már áthatolna a furatkamera ólomköpenyén.

1.3.2.3 MSZ EN 12543-3 Réskamerás radiográfiai módszer

Ez a fókuszfoltméret meghatározási eljárás nagyon hasonlít az MSZ EN 12543-2-ben ismertetett furatkamerás eljárásra. Itt azonban hosszanti és keresztirányban is megtörténik a fókuszpont leképezése.

1.32. ábra. Fókuszfolt mérése réskamerával





1.3.2.4 MSZ EN 12543-4 Élmódszer

Az élmódszernél egy élről radiográfiai felvételt készítenek filmre, és a létrjött geometriai életlenségből határozzák meg a fókuszfolt méretét.



1.33. ábra. Fókuszfoltmérés élmódszerrel

Az élmódszert a röntgencsövek gyártásakor alkalmazzák ellenőrzésre. Az élmódszer egy egyszerű eljárás a fókuszfolt méretének folyamatos, helyben történő ellenőrzésére.



1.34. ábra. Élmódszer: a geometriai életlenség mérése



A meghatározott életlenségből kiszámítható a hatásos fókuszfolt mérete:

$$d = U_{a}/(M-1)$$

1.3.2.5 MSZ EN 12543-5 Kis- és mikrofókuszú röntgencsövek tényleges fókuszfoltméretének mérése

Ezt az eljárást a mikrofókuszú röntgencsövek fókuszfoltméretének meghatározására fejlesztették ki. A szabvány 4. részének analógiájára itt egy platinahuzal vagy golyó segítségével határozzák meg a fókuszfoltméretéből adódó geometriai életlenséget.



1.35. ábra. Mérési elrendezés kis- és mikrofókuszú csövek fókuszfoltjának méréséhez

A fókuszfolt méretének lehető legpontosabb meghatározása érdekében a lehető legközelebb – tehát nagy geometriai nagyítással – rögzítik a platinahuzalt vagy golyót mikrofókuszú cső elé.



1.36. ábra. Mikrofókuszú csövek fókuszfoltjának mérése: az életlenség mérése



A fókuszfoltból adódó geometriai életlenségnek az detektor (film) életlenségénél jelentősen nagyobbnak kell lennie.

A meghatározott életlenségből kiszámítható a hatásos fókuszfolt:

Ennek szabványrésznek az alkalmazása igen nehezen valósítható meg a gyakorlatban a fókuszpont méretének meghatározására, mert a cső központi sugarának pontosan a platina huzalkereszt közepére kell esnie. Ellenkező esetben a sugárdivergencia miatt eltérő életlenségeket kapnánk a huzalkereszt szárainál.

1.3.2.6 A gammasugárzók fókuszméretének meghatározása

A gammasugárzók esetében a kiszállításkori radioaktivitás határozza meg a sugárzó méretét.

A sugárzó aktiválásakor 1,5 és 3,0 mm közötti átmérőjű és kb. 1,0 mm vastagságú tárcsákat aktiválnak. Ezzel csak egy bizonyos maximális aktivitás érhető el. Ha erősebb radioaktivitásra van szükség, akkor több tárcsát helyeznek el a kapszulában.

Sugárzó-mére- tek	Kiszállításkori radioaktivitás [GBq (Ci)]			
[mm]	Se ₇₅	Yb ₁₆₉	lr ₁₉₂	Co ₆₀
1,0 · 1,0	90 (2,5)	111 (3)	370 (10)	37 (1)
1,5 · 1,5	370 (10)		740 (20)	
2,0 · 2,0	810 (22)		1850 (50)	222 (6)
2,5 · 2,5	1670 (45)			
3,0 · 3,0	3000 (80)		5550 (150)	740 (20)
4,0 · 4,0			7400 (200)	3700 (100)

1.3. táblázat. Sugárzóméretek – kiszállításkori radioaktivitás



1.37. ábra. lr $_{\rm 192}$ sugárzótartó sugárzókapszulával



A sugárzás aktivitása az idő előrehaladtával csökken, viszont a sugárzó mérete változatlan marad.

1.38. ábra. Egy Se_{75} munkatároló metszete



1.39. ábra. Egy $Ir_{_{192}}$ sugárzó fókuszpontjának meghatározása




1.3.3 Leképezési geometria

A vizsgált tárgyak geometriai nagyítása azt eredményezi, hogy a röntgen fókuszfolt mérete meghatározó mértékben befolyásolja a leképezési minőséget. A fókuszfolt hatásának jobb megértése érdekében először az ideális (ám a gyakorlat szempontjából nem releváns) leképezési geometriát kell körüljárni.





Az 1.42. ábrán egy pont alakú fókuszfolt ideális leképezési geometriája látható. A vizsgált tárgy képe csak annak a fókusz és a detektor között elfoglalt helyzetétől függ; a vizsgált darab éles pereme – mely pontosan sugárirányban helyezkedik el – mindig erősebb ugrásként jelenik meg a detektor intenzitáseloszlásán.

Így geometriai vagy közvetlen nagyítással elméletileg tetszőlegesen apró tárgyrészletet lehet leképezni, ill. a radiográfiai felvételen láthatóvá tenni. Az M nagyítási tényező a fókusz-detektor távolság és a fókusz-tárgytávolság arányából számítható ki:

$$\frac{u_g}{d} = \frac{FDA - FOA}{FOA} \quad vagy \quad u_g = d \, \cdot \, \left(\frac{FDA}{FOA} - 1 \right)$$

Ha most behelyettesítjük az M geometriai nagyítást, akkor a következőt kapjuk:

$$u_{a} = d(M - 1)$$

A képen a geometriai életlenség úgy jelentkezik, hogy a perem vagy az éles struktúra már csak életlenül, nem pedig hirtelen intenzitásbeli ugrásként képeződik le. Tehát a fókuszfolt által okozott geometriai életlenség az egész röntgenes vizsgálórendszer korlátozott hibafelismerhetőségét eredményezi, függetlenül az alkalmazott detektortól. Ezt most egy kísérlettel szemléltetjük. Helyettesítsük a röntgencsövet egy fényforrással (diaprojektorral). A fókuszfolt mérete különböző furatblendékkel változtatható. A detektor síkja legyen a vetítővászon felülete. Az eltérést egy tárggyal (ollóval) szimuláljuk.



1.41. ábra. A távolság és a fókuszfolt méretének a geometriai életlenségre gyakorolt hatása



Kis távolság az érzékelőtől. Nagy méretű fókuszpont. Az olló vetett árnyéka éles. Kis nagyítás.

Az olló az érzékelő és a cső között középen van. Nagy méretű fókuszpont. Az olló vetett árnyéka a hegyénél életlen. Közepes nagyítás.



Nagy távolság az érzékelőtől. Kis távolság a csőtől. Nagy méretű fókuszpont. A vetett árnyék életlen. Nagy nagyítás.

Nagy távolság az érzékelőtől. Kis távolság a csőtől. Kis méretű fókuszpont. A vetett árnyék a nagy nagyítás ellenére éles.

1.3.3.1 Teljes életlenség

Ha most összevetjük az ug geometriai életlenség hatását a detektor ui belső életlenségével, akkor azt állapíthatjuk meg, hogy a kettő közül a nagyobbik a döntő az uT teljes életlenség szempontjából. A teljes életlenség jó közelítéssel kiszámítható az alábbi képlettel:

$$u_{total} = \sqrt{u_g^2 + u_i^2}$$



1.3.3.2 Optimális nagyítás

Ezek alapján a jó hibafelismerést biztosító optimális nagyítás annál a lehető legnagyobb nagyításnál érhető el, ahol a geometriai életlenség még nem nagyobb, mint a belső életlenség (ug = ui). Adott ui detektoréletlenség és d fókuszpont méret esetén az Mopt optimális nagyítás a következő képlettel számítható ki:

$$M_{opt} = \frac{u_i}{d} + 1$$

1.3.3.3 A felismerhető legkisebb részlet

Ha a legkisebb felismerhető részlet méretét szeretnénk meghatározni, akkor az a teljes életlenség és a nagyítás hányadosával számolható ki. Más szóval Up vetített életlenségről is beszélhetünk:

$$u_P = \frac{u_{total}}{M}$$

1.3.3.4 Életlenség a detektor felületre helyezett tárgy esetén

Életlen hibaleképezés akkor is előfordul, ha a vizsgált tárgy közvetlenül ráfekszik a detektorra. Az 1.42. ábrán egy pontszerű röntgenfókuszfolt ideális leképezési geometriája látható. Mivel a gyakorlatban nem pontszerű fókuszfoltot használunk a vizsgálat során, a szélek életlenül (elmosódottan) képeződnek le.



1.42. ábra. Ideális leképezés



1.43 ábra. Valós leképezés



1.3.3.5 Minimális távolság (fmin)

1.44. ábra. Forrás-detektor távolság (SDD), az eltérés távolsága a detektortól (b) és az eltérés távolsága a sugárforrástól (f)



A fókuszfolt mérete és a vizsgált anyag vastagsága miatt az eltérések geometriai életlenséggel képeződnek le. Emiatt a szükséges képélesség kellően nagy f távolság megválasztásával biztosítható. A geometriai életlenség az

képlettel határozható meg.

 $u_g = \frac{d \cdot b}{f}$

Itt b méret behelyettesítésekor a legkedvezotienebő nibapozícióból, azaz a detektortól való lehető legnagyobb távolságból indulunk ki. A leképezni kívánt vizsgálati területen a detektortól legtávolabb eső pont és a sugárforrás között mindig megfelelő távolságot kell választani.



A leképezés kellő élességének elérése érdekében f_{min} minimális távolság tartása szükséges.

$$f_{min} = \frac{d \cdot b}{u_g}$$

A kiválasztott SDD távolságnak teljesítenie kell az

$SDD \ge fmin + b$

Akkor érjük el az optimumot, ha a geometriai életlenség egyenlő a belső életlenséggel (azaz az érzékelő életlenségével). A szükséges minimális távolság az alábbi képlettel számítható ki:

$$f_{min} = \frac{d \cdot b}{u_i}$$
 $f_{min} = \frac{d \cdot b}{u_{Detektor}}$

Az MSZ EN ISO 17636-2 szabványban is ugyanez az eljárás szerepel, ám akkora minimális távolságot enged meg, ami valamivel nagyobb életlenséget eredményez.

$$\begin{split} f_{min} &= d\cdot 7, 5\cdot b^{2/3} & \quad \mbox{,} A^{"} \mbox{ vizsgálati osztály esetén, és} \\ f_{min} &= d\cdot 15\cdot b^{2/3} & \quad \mbox{,} B^{"} \mbox{ vizsgálati osztály esetén} \end{split}$$

Abból indul ki, hogy a detektor (CR-fólia) szorosan felfekszik az anyag geometriájára.

Azért, hogy ne kelljen a rendkívül bonyolult képlettel kiszámítani a minimális távolságot, a szabvány megad egy nomogramot (1.45. ábra).



1.45. ábra. Diagram az fmin minimális távolság meghatározásához



Görbült területek sík detektorral és egyképes technikával végzett radiográfiai vizsgálatához az alábbi képletek érvényesek:

$$f_{min,Pkl,B} = d \cdot 15 \cdot \frac{b}{\sqrt[3]{b}}$$
$$f_{min,Pkl,A} = d \cdot 7,5 \cdot \frac{b}{\sqrt[3]{b}}$$

Ha a vizsgált tárgyban a hiba a geometria életlenséghez hasonló méretű vagy kisebb nála, akkor az érezhető kontrasztgyengülést eredményez. Apró tárgyrészletek vonatkozásában ez azt jelenti, hogy az "elmosódás" miatti kontrasztgyengülés miatt már nem lesznek kimutathatók a radiográfiai felvételen.

1.3.4 A távolság-négyzet törvény

A távolság-négyzet törvény kimondja, hogy ha a fókusz-detektor távolság a kétszeresére nő, akkor már csak az intenzitás negyede (2² = 4) jut az érzékelő felületére. Az *1.48. ábrán* látható, hogy a távolság megnégyszereződésével az intenzitás az 1/16-ára (24 = 16) csökken. Ahhoz, hogy mégis ésszerű jel-zaj viszonyt lehessen elérni, a radiográfiában ez a jelenség egy lényegesen nagyobb csőárammal (melyet rendszerint a cső fókuszpont mérete korlátoz) egyenlíthető ki.





A sugárintenzitás és a távolság négyzetének összefüggése ezenkívül a maximálisan áthatolható falvastagságot is meghatározza. Minden falvastagságot (például kb. 25 mm acél 160 kV feszültség, 640 W röntgenteljesítmény és képerősítő alkalmazása mellett) mindig egy bizonyos SDD értékkel (például 700 mm) együtt kell megadni.



Mivel a radiográfiai vizsgálatnál a kontraszt függ a feszültségtől, és ezért a megengedett maximális feszültséget (kV) nem lehet túllépni, továbbá az intenzitás közvetlen hatással van a zajra (SNR), az alkalmazott röntgencsöveknél mindig kompromisszumot kell kötni a szükséges sugárintenzitás és a

A meghatározott minimális hibafelismerhetőségtől függően bizonyos alkalmazásokhoz alkalmazásspecifikus rendszereket (röntgencső, detektor, geometria) állítanak össze.

fókuszpont mérete között.

 $\mathbf{\Lambda}$



A DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS ALAPJAI

2.1 A DIGITÁLIS LÁTÁS

2

A képek információk tömkelegét tartalmazzák. Ha egyetlen pillantást vetünk egy képre, már azzal is sokkal több információhoz jutunk, mint például egy leírás végigolvasásával. Ennek alapján nyilvánvaló, hogy a képek olyan formában tartalmazzák az információt, amit az emberi agy megért. Látásával az ember sokkal gyorsabban képes feldolgozni az adatokat, mint más érzékszerveivel.

A "műszaki látórendszerek" felépítésével mutatott hasonlóságai ellenére az emberi látás (2.1. ábra) alapvetően különbözik a képi információk feldolgozásában. Míg a műszaki rendszerek csak szekvenciálisan képesek az információ feldolgozására és ebből csak rendkívül számítás-, ill. időigényes módon tudnak kapcsolatot teremteni a kép egyes pontjai között, addig az emberi látás asszociatív módon működik, és akár a nagyon bonyolult összefüggéseket is képes igen gyorsan analizálni. A különbség miatt az emberi látás még az erősen zavaros információkat tartalmazó képekből is képes felismerni a lényeges információkat. Ezzel szemben a technikai látórendszereknek bizonyos képminőségre van szükségük ahhoz, hogy ki tudják nyerni a képből a kívánt információkat.





A "digitális" szó görög eredetű, jelentése "megszámlálható". Ez azt jelenti, hogy a képi információt át kell alakítani a számítógép számára érthető formába. Csak ez után lehet alkalmazni a kívánt digitális



képfeldolgozási eljárást. E téren képjavító és képelemző/képkiértékelő eljárásokat különböztetünk meg. Az ipari röntgenvizsgálatban mindkét feladatnak igen nagy jelentősége van.

2.1.1 Bitek és bájtok

A legkisebb számítógépes információegység a bit. A bit az angol "binary digit" kifejezés rövidítése. Egy bitnek kétféle állapota lehet: IGEN vagy NEM (Be vagy KI, 1 vagy 0). A számítógép ezekkel az információegységekkel tud dolgozni. Két bittel (két kapcsolóval) négyféle állapot, míg négy kapcsolóval már 16 különböző állapot írható le.



2.2. ábra. Bitek és bájtok

Tehát a biteknek valahol rendelkezésre kell állniuk. Erre a célra szolgálnak az adathordozók, például a merevlemezek. A tárolókapacitást manapság azonban már nem bitben szokás megadni. 8 bit egy másik tárolóegységet jelent, amit bájtnak nevezünk. 1 bájt tehát 8 bit.

A bájtok tovább is átválthatók nagyobb mértékegységekbe. A tömeghez hasonlóan itt is használjuk a kiló előtagot. 1 kilobájt azonban nem 1000, hanem 1024 bájt. Ennek az az oka, hogy ez a mértékegység



210 kilobájtot jelent, ami pontosan 1024. A következő, eggyel nagyobb mértékegység a megabájt. 1 megabájt 1024 kilobájtot jelent.

Az alábbiakban áttekintjük az átváltásokat:

- 8 bit = 1 bájt
- 1024 bájt = 1 kilobájt (KB)
- 1024 kilobájt = 1 megabájt (MB)
- 1024 megabájt = 1 gigabájt (GB)
- 1024 gigabájt = 1 terabájt (TB)

2.2 DIGITALIZÁLÁS

2.2.1 Képfelbontás/pixelsűrűség

A digitalizálás a kép kétdimenziós képmátrixszá történő átalakítása. Egy képpontot pixelnek nevezünk. A digitalizáláshoz használt letapogatási értékek, ill. pixelek száma döntő mértékben meghatározza a digitális kép minőségét, ill. a képfelbontást (2.3. ábra).



2.3. ábra. A pixelfelbontás hatása a képre

16x16 képpont felbontás 64x64 képpont felbontás 512x512 képpont felbontás

Az ipari digitális radiográfiában manapság legalább 1024x1024 pixel felbontású röntgenképet használnak.

2.2.2 A kvantálás

A pixelek száma mellett – amelyre az eredetileg folytonos képet szétszedjük – az analóg világossági értékek, az ún. szürkeárnyalatok egyes képpontoknak való megfeleltetésének is döntő jelentősége van (2.3. ábra).



2.4. ábra. A szürkeárnyalatok számának hatása a képre



1 bit (2 szürkeárnyalat) 3 bit (8 szürkeárnyalat) 8 bit (256 szürkeárnyalat)

Ha digitalizálunk egy képet, akkor az egy adott világossághoz tartozó szürkeárnyalat a digitalizálás kvantálásától függően különböző értékű lesz (2.4. ábra).

2.5. ábra. Szürkeárnyalat és világosság



Míg az emberi szem szürkeárnyalat-felbontó képessége látási és környezeti feltételektől függően kb. 64, addig az ipari röntgenképfeldolgozásban legalább 8 bit, azaz 256 szürkeárnyalat az alapkövetelmény. Azonban érzékelőtől függően mára már a 12, 14, 16 vagy még több bites szürkeárnyalat-felbontások is elterjedtek. A folyamat lényege, hogy bizonyos feszültségértéket bizonyos szürkeárnyalatnak feleltetnek meg. Minél magasabb a szürkeárnyalatok száma (a szürkeárnyalat mélysége), annál kisebb a digitalizálás során jelentkező mérési eltérés.

A 2.5. ábrán bemutatott példán 1000 mV feszültséget látunk, amely az első esetben 255 szürkeárnyalatként (8 bit), a második esetben pedig 4096 szürkeárnyalatként (12 bit) került digitalizálásra. Ha feszültség 400-ról 600 mV-ra – tehát 200 mV-tal (ΔU) – változik, akkor 8 bites digitalizálás esetén 51 szürkeárnyalatbeli változás történik. Ez a 200 mV/51 szürkeárnyalat változás szürkeárnyalatonként 3,9 mV feszültséget jelent. Ezzel tehát soha nem lehet elérni a szürkeárnyalatonkénti 1 mV felbontást. A 12 bites digitalizálás esetében azonban a 200 mV-os változás 2458 – 1638 = 820 szürkeárnyalatot jelent, ami a 200 mV/820 szürkeárnyalat esetében 0,24 mV/szürkeárnyalattal egyenlő.



2.6. ábra. Szürkeárnyalat-felbontás



2.2.3 A képzaj

A röntgensugárzás kvantumtermészetéből adódóan jelentős mértékű zaj jelenik meg a digitális radiográfiai képeken. A hasznos képi információ és a zaj arányát nevezzük a jel-zaj viszonynak (SNR, signal-noise ratio).

A jel-zaj viszony javítása, illetve a zajcsökkentés fontos lépés a képfeldolgozásban. A mai rendszerek már a kép beolvasásakor megpróbálják minimalizálni a zajt. Ez történhet magas sugárzásintenzitással vagy több felvétel átlagolásával.





SNR = 2

SNR = 10

SNR = 80



2.3 DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS

A modern képfeldolgozó rendszerek az alábbi egységekből épülnek fel:

- detektor és interfész,
- képfeldolgozó számítógépes egység,
- kimeneti eszközök.

Manapság szerencsére már nincs szükség drága hardverekből összeállított, speciális képfeldolgozó számítógépes rendszerekre, mert a modern ipari PC-k számítási teljesítménye bőven elegendő a legtöbb képfeldolgozási művelet gyors elvégzésére.



2.8. ábra. Egy modern képfeldolgozó rendszer hardverének felépítése

2.3.1 Kontrasztkiterjesztés

Utólagos kontrasztkiterjesztéssel a kontrasztszegény képek jelentősen feljavíthatók. Itt azt a jelenséget lehet kihasználni, hogy a gyenge kontrasztú képek csak nagyon korlátozott szürkeárnyalattartományt tartalmaznak, például egy 8 bites, 256 szürkeárnyalatot tartalmazó képen csak 100 és 200 között mozog a szürkeárnyalatok száma. Ezt a 100 szürkeárnyalatot azután kiterjesztjük a teljes, 0 és 255 közötti tartományra (2.8. ábra).

Viszont problémás, ha 256-nál több szürkeárnyalatot kell megjeleníteni a képernyőn. Habár a monitorok többmillió különböző szín megjelenítésére képesek, de csak 256 szürkeárnyalatot tudnak leképezni.

Például 4096 szürkeárnyalatból (12 bit) vagy kb. 65000 szürkeárnyalatból (16 bit) megfelelő eszközökkel ki kell választani a 256 szürkeárnyalatot, amit a képernyőn megjelenítünk.



2.9. ábra. 256 szürkeárnyalat ábrázolása 12, ill. 16 bitből



A nagyobb felbontású szürkeskálából a 256 szürkeárnyalat kiválasztása az ipari radiográfiai vizsgálatban megfelel egy bizonyos, megjeleníteni kívánt falvastagság-tartomány ábrázolásának. Ezt az ábrázolást nevezzük kontrasztkiterjesztésnek.





2.3.2 Digitális szűrés

Az 5.10. ábra a digitális szűrésre mutat példát. A különböző szűrők hasznosságát az adott célkitűzéstől függően kell értékelni.



2.11. ábra. Digitális szűrés eredménye (jobbra)



2.3.3 Digitális képek nagyítása (zoom)

A képek nagyítása (zoomolás), illetve kicsinyítése szinte az összes, kereskedelmi forgalomban kapható képfeldolgozó rendszerrel lehetséges (2.11. ábra). Azt azonban nem árt tudni, hogy a képek utólagos, digitális nagyítása nem eredményezi a képminőség javulását.



2.12. ábra. Digitális nagyítás

A digitális nagyítás csak kiemeli a kép pixelstruktúrájátt. Ez a hatás megfelelő interpolációs eljárással optikailag javítható, de nem jár a képminőség javulásával.

2.3.4 Intenzitásprofil

A digitális képeken a szürkeskála elemzésének egyik egyszerű eszköze az ún. intenzitás (szürkeárnyalat) profil (2.12. ábra). Segítségével egyszerűen, szemléletesen és könnyen értelmezhető módon ábrázolható a kép szürkeárnyalat intenzitásának alakulása.



Az intenzitásprofillal egyszerűen meghatározhatók a képrészletek közötti távolságok, ill. az egyes képrészletek kiterjedése. Ennek fontos szerepe van a radiográfiai képek kiértékelésében. Mérhetők a távolságok, a hosszúságok és a területek.



2.13. ábra. Szürkeárnyalat-profil a képen berajzolt vonal mentén

A képrészlet mérethű mérésénél figyelembe kell venni a radiográfiai képen adott geometriai felbontást. Ehhez összefüggésbe kell hozni egy ismert tárgy – pl. egy kalibrálótest – méreteit a pixelenkénti felbontással. Mivel ez az összefüggés a felvétel geometriájától (használt geometriai nagyítás) függően változik, a kalibrálást minden geometriai nagyításhoz újra és újra el kell végezni. Az 2.13. ábrán egy 2 mm átmérőjű acélgolyó látható, amelyet kalibrálótestként alkalmaznak egy alumíniumöntvényhez.

2.14. ábra. Alumíniumöntvény acélgolyóval (átmérő = 2 mm)



2.3.4.1 Hosszúság és terület mérése

Az első feladat az öntési hibák és a hegesztési varratok eltéréseinek detektálása a képen, amit az értékelés és az osztályozás követ. Az értékelés szempontjából fontos értékek a eltérés tényleges méretei, legyen az a kép síkjában (X és Y) vagy a térben (Z irány).



A nagyítások figyelembevételéhez minden mérés előtt kalibrálni kell a rendszert, hogy a számítógép valós egységekbe – például mm-be – tudja átszámolni a pixelszámban mért távolságokat.

2.3.4.2 A mérés kalibrálása

Mérés előtt egy referenciatest alapján el kell végezni az ismert méretek kalibrálását. Ilyen referenciatest lehet például egy felragasztott képminőségjelző. A kalibrálás eltárolódik a képhez, így közvetlenül meghatározhatók a képen látható hosszúságok.

2.3.4.3 Hosszmérés

A mai digitális rendszerek közvetlenül a képen végzik el a hosszmérést. A tévéképernyőn vonalzóval végzett mérés már a múlté.

Kalibrálás után a mérés közvetlenül a képen történik úgy, hogy egérrel kijelölünk két vagy több pontot. Ezután a számítógép meghatározza a távolságot pixelben és mm-ben.

2.15. ábra. Kalibrálás, hosszmérés, majd kijelzés mm-ben



2.3.4.4 Területmérés

A területmérés a hosszméréshez hasonlóan történik. A legtöbb képfeldolgozó rendszer előre beállított mérési alakzatokat kínál, például téglalapot vagy kört. Ezekkel a következő képen látható módon végezhető el a mérés.

Gyakran apró vagy még annál is kisebb részletek mérését kell elvégezni. Ehhez érdemes digitálisan felnagyítani a képet, és azon elvégezni a mérést.



2.16. ábra. Mérés téglalap és ellipszis funkcióval



2.3.4.5 Intenzitásmérés

Hossz- vagy területméréskor a mérés az X/Y síkban történik. Intenzitásméréskor a szürkeárnyalatbeli különbségeket értékeljük ki.

2.3.4.6 Az intenzitásmérés kalibrálása

Az első mérés előtt a hossz-, ill. területmérésnél már megismert módon itt is kalibrálni kell a rendszert egy kalibrálótesttel a szürkeárnyalat-eloszlás tekintetében, hogy megkapjuk a különböző anyagvastagságokhoz tartozó szürkeárnyalatok különbségét.



2.17. ábra. Az intenzitás kalibrálása (szürkeárnyalat megfeleltetése az anyagvastagságnak)



A kalibrálás eredménye egy táblázat, amelyben különböző szürkeárnyalatok felelnek meg az egyes anyagvastagságoknak, például a 100 mm-es alumíniumnál 26-os szürkeárnyalat a 40 mm-es vastagságnál már 165. Ebből a számítógép a képen előforduló minden szürkeárnyalathoz kiszámítja a hozzá tartozó anyagvastagságot. A kalibrált pontok között elhelyezkedő értékeket a számítógép interpolálja.

Az intenzitásmérés végrehajtása:

Az intenzitások mérése rendszerint vonalprofilokkal vagy az egérmutató pozíciójában a szürkeárnyalat egyszerű pontmérésével történik. A szürkeárnyalat egy diagramon jelenik meg a képernyő szélén vagy közvetlenül az egérmutatónál.

2.4 KÉPTÁROLÓ LEMEZES RENDSZEREK

2.4.1 Általános tudnivalók

A képtároló lemezeket (angolul Storage Phosphor Imaging Plate, IP) a digitális képalkotáshoz fejlesztették ki (a Kodak kb. 1975-ben bejelentett szabadalmait a Fujifilm 1995-ig kizárólag orvosi célokra használta). Ezt a technikát számítógépes radiográfiának vagy CR-technikának ("Computed Radiography") is nevezzük. A képtároló lemezes technika orvosi célú alkalmazásában immár több mint 30 éves tapasztaltok állnak rendelkezésre, melyeket a szabadalmak 1995-ös lejártát követően a roncsolásmentes vizsgálat is átvett. Az, hogy ez a technika először orvosi fejlesztés volt, azzal járt, hogy a képtároló lemezek nagyobb érzékenységének és nagyobb dinamikatartományának köszönhetően új alkalmazási lehetőségek nyíltak a roncsolásmentes vizsgálatban. Például a vastagfalú, magas elnyelőképességű anyagok rövidebb megvilágítási idővel is besugározhatók, ha utána a kiértékelés során teljes mértékben kiaknázzuk a digitális képfeldolgozásban rejlő lehetőségeket.

2.4.2 A képtároló lemezek működési elve

A képtároló lemezek megvilágítása a röntgenfilmekéhez hasonlóan történik. A látens képi információt (a BaFBr:Eu2+ krisztallitokban lévő rácshibák) egy speciális lézerszkenner olvassa ki. Ezután egy erősebb fényforrás törli a lemezen még meglévő információmaradványt. Ez történhet közvetlenül a kiolvasás után magában a lézerszkennerben vagy pedig speciális törlőegységgel. Ez feleslegessé teszi mindenféle előhívő vegyszer használatát, az eredmény pedig a lényegesen rövidebb szkennelési idő után egyből megjelenik a számítógép képernyőjén. Ha a képtároló lemez felülete mechanikusan nem sérül, akkor minden további nélkül több százszor újra használható.





2.18. ábra. A képtároló lemez működési ciklusa és használata

A képtároló lemezen egy rugalmas polimer hordozót használnak, amelyre sugárzásérzékeny képtároló réteget visznek fel. Erre egy vékony védőréteg kerül, amely védi a lemezt a mechanikus sérülésektől. Ez a védőréteg azonban gátolja az ólomfóliák erősítő hatását, így a filmes technológiához képest lényegesen vastagabb erősítőfóliákra van szükség. A képtároló lemez érzékenysége és térbeli felbontása a foszforréteg vastagságától függ. A vastag foszforréteg érzékeny, de életlenebb is, mivel diffúz módon bocsátja ki a kiolvasáskor keletkező fényt.



cserélhető Ólomfólia 27 - 300 μm Védőfólia 10 - 15 μm Fénypor réteg 100 - 300 μm Hordozóréteg 100 - 500 μm
--

A fényérzékeny képtároló réteg (fénypor réteg) szinte minden CR-rendszerben Eu2+ európiummal dotált krisztallitból (BaFBr) áll. A besugárzás hatására hibák keletkeznek ebben a képtároló fényérzékeny rétegben, melyek szobahőmérsékleten stabilak, eloszlásuk pedig látens képet alkot a lemezt ért sugárzásnak megfelelően. Ezek a hibák vörös (600–700 nm hullámhosszúságú) lézerfénnyel végzett optikai stimulációval állíthatók vissza eredeti állapotukba. Ez úgy gerjeszti az Eu2+ európium ionokat, hogy azok kéken világító (390 nm) fotonokat bocsátanak ki. Ezt a folyamatot fotostimulált lumineszcenciának (PSL) nevezik.



Mivel ennek a fénynek a hullámhossza eltér a stimuláló vörös fényétől, a foszforeszkáló anyag által kibocsátott kék fény hullámhossz-specifikus érzékeléssel mérhető. A képtároló lemez kiolvasóoptikával végzett letapogatása létrehozza a detektált sugárzás képét. A kiolvasási folyamat után erős fehér vagy vörös fénnyel világítják meg a képtároló lemezt, ami törli az esetlegesen még rajta lévő hibás pontokat. Ezután a lemez ismét rendelkezésre áll újabb felvételek készítéséhez.

2.20. ábra. Egy magas érzékenységű, de kis felbontású (balra) és egy alacsony érzékenységű, de nagy felbontású képlemez kristályszerkezete



2.21. ábra. Megvilágítás és fotostimulált lumineszcencia a képtároló lemez kiolvasásakor



2.4.3 Az elérhető maximális jel-zaj viszony

A képtároló lemezek alkalmazásakor kiderült, hogy az elérhető maximális jel-zaj viszony korlátozza a képtároló lemezek képminőségét. Ezt a maximális SNR-t a képtároló lemez rétegének a gyártási folyamatból adódó strukturális zaja korlátozza. Ezt a strukturális zajt nem lehet olyan könnyen elnyomni, mint a digitális mátrixérzékelők esetében a pixelre pontos kalibrálással.



Hosszabb megvilágítási időt alkalmazva csak a dózis négyzetgyökével növekvő zajhányad csökkenthető (sugárkvantumok Poisson-zaja). A strukturális zaj (tulajdonképpen a képtároló lemez helyi érzékenységének gyártási folyamatból adódó ingadozása) egyenesen arányos a sugárdózissal, amit a magasabb dózis nem csökkent. Ezért ez a strukturális zaj egy bizonyos megvilágítási dózis felett korlátozó tényezővé válik.

A nagyfelbontású képtároló lemezt alkalmazó HD–CR-rendszerek a filmnél magasabb SNRN-érték elérésére képesek hasonló alapvető térbeli felbontás mellett (filmdigitalizáló szkennerrel összehasonlítva), ám többnyire magasabb megvilágítási időt igényelnek, mint a filmek.



2.22. ábra. Film, normál CR-rendszer és HD–CR-rendszer összehasonlítása

Alkalmazások és szabványosítás

A CR-rendszerek jellemző alkalmazási területe a csőfalak korróziómérése (tangenciális vetítés vagy árnyékfelvételek). A csövek korrózióvizsgálata a vegyiparban az egyik legfontosabb roncsolásmentes vizsgálati intézkedés. A csővezetékek többnyire hőszigeteltek, és a szigetelőanyagot fémkarmantyú rögzíti. A radiográfiai vizsgálatot a szigetelés eltávolítása nélkül végzik. Ez sokkal előnyösebb az ultrahangos eljáráshoz képest, ahol a csővel való közvetlen érintkezésre van szükség.

A ma rendelkezésre álló képtároló lemezek és a hozzájuk tartozó lézerszkennerek többnyire 16 bites szürkeskála felbontásúak, azaz 65536 szürkeérték megjelenítésére képesek. Ez nagyságrendekkel több szürkeértéket jelent, mint amire az emberi szem képes (egy képen kb. 80). Ezt a dinamikacsökkentést (a képernyőn csak 8 bit, azaz 256 szürkeérték jeleníthető meg) többé-kevésbé intelligens képfeldolgozó algoritmusok végzik, ezért minden CR-rendszernek elengedhetetlen eleme a megfelelő képfeldolgozás. A legmodernebbek azok a képfeldolgozó algoritmusok, amelyek nem igényelnek semmilyen felhasználói közreműködést (pl. AGFA "Musica 1-3", GE "Flash Filter" vagy ISee! "Enhance Details").



Atomerőműi Képzési Bázis

A roncsolásmentes vizsgálatban a képtároló lemezek használatára az MSZ EN 14784-1 (Roncsolásmentes vizsgálat. Ipari számítógépes radiográfia foszforlemezen való képtárolással.

1. rész: A rendszerek osztályozása) és az MSZ EN ISO 16371-2 (Roncsolásmentes vizsgálatok. Ipari számítógépes radiográfia foszforlemezen való képtárolással.

2. rész: A fémek röntgen- és gamma-sugaras vizsgálatának általános alapelvei) szabványok vonatkoznak.

2.23. ábra. Szigetelt csővezeték számítógépes vizsgálata vetítéses radiográfia segítségével



A 2.23. ábrán látható a képtároló lemezes rendszer számítógépes képkiértékelésének előnye. A kis mértékben gyengítő hatású köpenyről (szigetelés) és a csőről azonos paraméterekkel (Ir192 izotóppal) készült a felvétel. A két terület mindenféle digitális utómunka nélkül is kellően világos és kontrasztos a képen. Az egérrel interaktív módon jelölhetők ki azok a pontok a falra merőlegesen, ahol a falvastagsá-got meg kell mérni. Itt megfelelő algoritmus érzékeli a cső külső és belső szélét, így a tulajdonképpeni falvastagságmérést automatikusan a nyersadatokban található profilon végzi el, nem pedig a monitorképen, ez ugyanis a szürkeskála-felbontás konverziója miatt könnyen hibás falvastagságot eredményezhet. A nyers adatok használata elengedhetetlen a megbízható falvastagságméréshez.

Napjainkban már sokféle képtároló lemez elérhető a roncsolásmentes vizsgálathoz. A filmes radiográfiához hasonlóan ezeket is az adott alkalmazástól függően kell kiválasztani. Univerzális képtároló lemez ugyanis nem létezik. A különböző lemezrendszerek felbontása a 2.24. ábrán látható. A felvételek MSZ EN ISO 19232-5 szerinti kéthuzalos képminőségjelzőkkel készültek, melyek a repedésekhez hasonló, apró szerkezetű hibákat szimulálnak.





2.24. ábra. Kéthuzalos képminőség-vizsgáló testek és azok profiljainak leképezése különböző képtároló lemezeken

A kutatások azt mutatják, hogy vastagfalú alkatrészek vizsgálatakor a képtároló lemezek rövidebb megvilágítási idejének előnye a filmes radiográfiához képest vitatható, különösen olyan esetekben, ahol 300 keV-nál nagyobb energiákat vagy Ir192 izotópot használnak. A nagyfelbontású HD képtároló lemezek hasonló megvilágítási időt igényelnek, mint a hagyományos röntgenfilmek, ám vitathatatlan előnyük, hogy az adatok a szkennelés után azonnal, digitális formában rendelkezésre állnak. Kisenergiájú alkalmazásokhoz, valamint hegesztési varratok vizsgálatához ezek a nagyfelbontású képtároló lemezek a legalkalmasabbak.

Ma már léteznek ≤ 50 µm-es alap térbeli felbontású, akár 2 m-es vagy annál hosszabb képtároló lemezek beszkennelésére alkalmas CR-rendszerek. Segítségükkel a csövek körvarratának vizsgálata gyorsan és hatékonyan elvégezhető. Az elérhető kontrasztérzékenység javítása érdekében ajánlott a csőfeszültséget kb. 20%-kal csökkenteni a filmes rendszerek értékeihez képest (MSZ EN ISO 17636-2). A legújabb, lényegesen magasabb maximális SNRN telítettségi értékű HD–IP lemezek azonban a filmek esetében alkalmazottnál magasabb feszültségekkel is sikeresen használhatók. Ez az MSZ EN ISO 17636-2 szerinti I kompenzációs elven alapul, ami a vizsgálat során rövidebb megvilágítási idő mellett is megfelelő képminőséget eredményez, különösen 2–2T vizsgálati érzékenység esetén (ASTM E 1742), vagy ha az A vizsgálati osztály (MSZ EN ISO 5579 vagy MSZ EN ISO 17636) a követelmény.



2.5 MÁTRIXDETEKTOROK

2.5.1 Mátrixdetektorok (síkdetektorok, DDA) működési elve

A mátrixdetektorok működési elvének alapja a beeső röntgensugárzás elektromos töltéssé történő átalakítása, amely azután elektronikus úton kiolvasható. Ehhez amorf szilíciumot (α-Si) használnak elektromos félvezetőként.

Az alábbi két átalakítási elvet különböztetjük meg:

- direkt módszer (fényelektromos /fotokonduktoros/ átalakítás),
- indirekt módszer (fénnyé történő átalakítással szcintillátorral).

Az mindkét átalakítási módszernél fotodiódákból álló mátrixokat alkalmaznak, melyek elektromos töltéssé alakítják át a beeső fotonokat (röntgensugárzást vagy fényt). A fotodiódák egy bizonyos ideig töltéshordozókat tárolnak, mielőtt egy elektronika pixelenkénti kiolvassa őket, majd feldolgozza kép formájában történő megjelenítésre. Minden fotodióda mellett található egy-egy TFT-kapcsoló (TFT = vékonyfilm tranzisztor, lásd pl. a laptop kijelzőjét), amely a megfelelő időpontban engedélyezi a töltések kiolvasását a fotodiódából.

| TFT |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Photo |
| diode |
| TFT |
| Photo |
| diode |
| TFT |
| Photo |
| diode |
| TFT |
| Photo |
| diode |
| TFT |
| Photo |
| diode |
| TFT |
| Photo |
| diode |

2.25. ábra. A síkdetektorokban elhelyezkedő fotodiódák mátrixa

2.5.1.1 Direkt módszer fényelektromos vezetővel

A direkt átalakításos módszerénél sokkal jobb hatásfok eléréséhez a szilíciumnál jobb elnyelőképességű anyagot, amorf szelént használnak. Ezt az anyagot elektromosan vezető rétegek közé viszik fel, és kondenzátor segíti a töltéshordozók tárolását az elektródákon. A töltéshordozókat a tulajdonképpeni átalakító rétegen kívül kell tárolni, máskülönben az egyes cellák túlaktiválódnának, aminek életlen, elmosódott kép lenne az eredménye.





2.26. ábra. A direkt átalakító (fotokonduktoros) detektor vázlata

Egyrészt a töltéshordozók rekombinációjának megakadályozására, másrészt a töltéshordozóknak egyenesen az elektródákra történő szállítására fém elektródákat, illetve fém kontaktfóliát használnak, amelyre 1000–5000 V feszültséget (+V) adnak. A töltéshordozók kiolvasása itt is soronként vagy oszloponként vezérelt vékonyfilm tranzisztorokkal (TFT) történik.

2.5.1.2 Indirekt módszer szcintillátorral

Ennél a módszernél olyan fluoreszcens réteget (szcintillátort) visznek fel az amorf szilíciumra, amely látható fénnyé alakítja át a röntgensugárzást. A szcintillátoranyagok többnyire fluoreszkáló anyagok, például gadolínium-oxiszulfid, cézium-jodid.



2.27. ábra. Szcintillátorral és fotodióda réteggel rendelkező α-Si-detektor vázlata



A beeső röntgenfoton a fényfotonok sokaságát hozza létre a szcintillátorban, melyet az alatta elhelyezkedő fotodióda-réteg elektromos töltéssé alakít át. Minél vastagabb a szcintillátor, annál több röntgenfotont képes elnyelni és átalakítani. Mivel a fényfotonok véletlenszerűen minden irányba szóródhatnak, életlenség jön létre. A kellően nagy hatásfok (kevesebb zaj) és a lehető legkisebb mértékű életlenség (részletfelismerhetőség) érdekében a szcintillátor vastagságát a detektor felbontásához (cellaszélességéhez) igazodva kell kiválasztani.

A cézium-jodid szcintillátor használata nagyon jó kompromisszumot jelent a szükséges térbeli felbontás és a fénynyereség között. A cézium-jodid (CsJ) ugyanis tűszerű struktúrában kristályosodik, ami miatt a fény főként a tűstruktúrákon belül terjed, így koncentráltabban éri el a cellákat. Ennek eredményeképpen jobb térbeli felbontás érhető el.



2.28. ábra. Detektor CsJ-szcintillátorral (tűstruktúrák)

Ez a szcintillátoranyag akár 1 mm vastagságban is felvihető az amorf szilíciumra, ami magas hatásfokot eredményez a röntgensugárzás fénnyé történő átalakításakor. Ennek a CsJ-rétegnek azonban az a hátránya, hogy hosszabb ideig tárolja az előző képek információit (detektor lag, "szellemkép").

2.5.2 Pixelméret, térbeli felbontás - zaj

Egy síkdetektor milliónyi apró fényérzékeny képpontból (pixelből) áll, melyek egy téglalap alakú területen mátrix formájában helyezkednek el (2.25. ábra). Kiolvasásukhoz a TFT az erősítő elektronikára kapcsolja a fotodiódát, amely méri a fény hatására keletkező töltéseket.





2.29. ábra. A fotodióda kiolvasása

A folyamat elején először teljesen feltöltődik a fotodióda kondenzátora. A beeső fény kisüti a fotodióda kondenzátorát. A kiolvasás időpontjában a TFT átkapcsol. A kiolvasó erősítő ismét feltölti a fotodióda kondenzátorát, s közben az erősítő kapacitása "naplózza" az ehhez szükséges töltéseket. Ennek során a töltésekkel arányos U-feszültség jön létre, amit az elektronika digitalizál és hozzárendel a pixelhez. Egy pixel kiolvasásának ideje kb. 10 µs.

Alapszabálynak tekinthető, hogy a nagyobb pixelfelületű detektorok zaja kisebb, mert időegység alatt több foton esik egy pixelre. Egy 127 µm-es detektor egy pixelének felülete 0,0161 mm².

A 400 µm-es detektor egy pixelének felülete 0,16 mm2, vagyis egyidejűleg csaknem tízszer több fotonnal találkozik. A térbeli felbontása viszont mintegy háromszor rosszabb. A nagyságrendileg több foton feldolgozásához ezeknél a detektortípusoknál nagyobb (16 bites) felbontású digitális átalakítót használnak. Összehasonlításképpen a legtöbb 127 µm-es detektor csak 12 bites átalakítóval rendelkezik. Ennek megfelelően a nagyfelbontású detektorok elsődleges felhasználási területe a hegesztési varratok vizsgálata, míg a 400 µm-es detektorokat főként öntvényvizsgálatra használják, mert



ott sokkal fontosabb a kontrasztosság és a rövidebb kiolvasási idő. Hátrányaik ellenére ma a szcintillátoros eljárást alkalmazó α–Si-detektorok jelentik a legszélesebb körben alkalmazott technológiát. Ezek a detektorok ma már a költséges technika és gyártási folyamat ellenére elfogadható áron szerezhetők be, az elektronika és az α–Si-struktúrák tömeggyártásának köszönhetően.

2.5.3 Mátrixdetektoros digitális röntgenrendszer

A teljes rendszer a röntgensugárzásra érzékeny detektorból, az összekötő kábelből, az áramellátásból és a radiográfiai képet monitoron megjelenítő, mérésiadat-rögzítővel ellátott kiolvasó elektronikából áll. Erre a célra rendszerint ipari PC-t használnak.



2.30. ábra. Mátrixdetektoros radiográfiai rendszer



2.5.4 A mátrixdetektor kalibrálása

A mátrixdetektorok elektronikus részegységekből állnak. Egyes tulajdonságaik – például kapcsolási viselkedés vagy érzékenység – már a gyártás során bizonyos mértékű szórást mutatnak. Emiatt az egyes pixelek érzékenysége különböző. Továbbá a hőmérséklet-változások is befolyásolják az érzékelők viselkedését. Ezért a detektorokat rendszeresen kalibrálni kell. Ezt a kalibrálást erősítés/ofszet (GAIN/OFFSET) kalibrálásnak nevezzük. A mátrixdetektorokkal készült felvételeknél a rendszerek minden képnél automatikusan figyelembe veszik ezt a fajta korrekciót.

A fotodióda-félvezető lapkák gyártásában szintén nem lehet elkerülni, hogy olyan pixelek keletkezzenek, melyek nem szolgáltatnak használható jelet ("bad pixel"). A tömeggyártásban készült detektorok kalibrálásakor meghatározásra kerülnek ezek a pixelek, értékük a szomszédos pixelek alapján számított középérték lesz.



2.31. ábra. Egy képpont kimeneti értékeinek kalibrálása a dózishoz adott energiájú sugárzás esetén



2.5.4.1 Ofszet kalibrálás

A fotodióda kondenzátora fény nélkül is kisül valamennyire, ezért ezt a kisülést minden egyes pixelnél meg kell határozni ("sötét kép"). Ezt az eltolódást később minden egyes képből le kell vonni, így semlegesítve az ofszet eltolódás hatását.

2.32. ábra. Kalibrálatlan detektor képe röntgensugárzás nélkül



Az ofszet kalibráláskor a szoftver sugárzás nélkül nagyszámú képet készít és a képeket integrálja. Az integrálási folyamat során a statisztikus zaj kiszűrésre kerül az ofszet korrekcióra szolgáló képből, amelyből meghatározható és korrigálható minden egyes pixel jellemző ofszetértéke.



2.33. ábra. Kép korrigált ofszettel röntgensugárzás nélkül, kiterjesztett kontraszttal.

Azok a pixelek, melyeknek zaja jelentősen meghaladja az átlagos zajszintet bekerülnek a hibás pixelek táblázatába (bad pixel map). A hibás pixelek a későbbiekben nem saját értékükkel, hanem a szomszédos pixelek értékének átlagával jelennek meg a képen.



2.34. ábra. Példa a hibás pixelek táblázatára (bad pixel map)

Stade maprice - Earlor			
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?			
Last used Bad Pixel Definition Thre Underperform. Low Threshold = 45 Underperform. High Threshold = 150 Correction Range = 1	esholds: % %		2
Bid Dikal Summiry: trail Bid Pixel bead High (type = 1) bunderparform. Low (type = 4) underparform. High (type = 5) wone uniform. High (type = 5) Non. Uniform High (type = 6) Non. Uniform High (type = 9) Forced Bid (type = 32) Forced Bid (type = 34) Forced God (type = 64)	1829 524 26 1139 50 0 0 87 3 0		
ad pixe) Clurter 15t: 2. 7004 51me70 3. 432 Cluster4 4. 300 Cluster4 5. 314 Cluster4 5. 314 Cluster3 7. 324 Cluster3 7. 324 Cluster3 10. 203 Cluster3 10. 203 Cluster3 10. 203 Cluster3 11. 204 Cluster3 12. 204 Cluster2 13. 324 Cluster2 13. 224 Cluster2 14. 224 Cluster2 15. 226 Cluster3 15. 266 Cluster	. top left: (0, . top left: (10, . top left: (10, . top left: (20, . top left: (2) bottom right: (1021) bottom right: (1023) bottom right: (270) bottom right: (271) bottom right: (273) bottom right: (274) bottom right: (275) bottom right: (276) bottom right: (276) bottom right: (277) bottom right: (278) bottom right: (279) bottom right: (270) bottom right: (270) bottom right: (270) bottom right: (271) bottom right: (271) bottom right: (272) bottom right: (273) bottom right: (273) bottom right: (273) bottom right: (274) bottom right: (275) bottom right: (1023, 2) 60, 1021) 160, 999) 700, 231) 822, 724) 46, 75) 158, 577) 405, 750) 405, 750) 405, 907) 173, 1001) 173, 1001) 174, 1001) 175, 10

2.5.4.2 Az erősítés korrekció

Mivel minden fotodióda különböző hatásfokkal rendelkezik, és az oszlopok/sorok kiolvasó elektronikái is kis mértékben változnak, az egyes pixelek nem egyforma választ adnak ugyanarra a dózisra. Az eltéréseket meg kell határozni, és figyelembe kell venni a képkorrekcióhoz (erősítés-kép).

2.35. ábra. Kép korrigált ofszettel, röntgensugárzással, erősítés korrekció nélkül



Az erősítés-kalibráláskor a szoftver a kiválasztott energiájú és dózisú sugárzással nagyszámú képet készít és a képeket integrálja. Az integrálási folyamat során a statisztikus zaj kiszűrésre kerül



a korrekcióra szolgáló képből, amelyből meghatározható és korrigálható minden egyes pixel jellemző erősítés értéke.



2.36. ábra. Kép korrigált ofszettel/erősítéssel, röntgensugárzással

Az erősítés-kalibráláskor a specifikáción kívül eső pixelek szintén bekerülnek a hibás pixelek táblázatába.







2.5.5 A hibás pixelek típusai és jellemzésük

Dead pixel	A képpontok állandó értéket adnak, függetlenül a sugárzás intenzitásától.
Over responding pixel	Túlérzékeny képpontok, túl magas szürkeértéket adnak.
Under responding pixel	A képpontok csak a többi képpont szürkeérték-átlagának 60%-át érik el.
Noisy pixel	A pixelek értéke nagy szórást mutat.
Non-uniform pixel	A képpontok szürkeértéke és a bemeneti dózis közötti kapcsolat nem lineáris.
Persistence/Lag pixel Bad neighborhood pixel	A képpontoknak átlag feletti időt igényelnek, mielőtt újra felhasználhatók. A pixelek rossznak számítanak, ha a 8 szomszédos képpontjuk rossz.

Elhelyezkedésük szerint lehetnek:

- Egyedülálló hibás pixelek.
- Hibás pixelek vonala (sor vagy oszlop).
- Klasztermag hibás pixelek (CKP).

A klasztermag hibás pixelek (Cluster Kernel Pixels, CKP) azok a pixelek, amelyek ötnél kevesebb jó szomszédos pixellel rendelkeznek.

2.38. ábra. Hibás pixelek, k	laszterek, hibás pixelek vonala
------------------------------	---------------------------------

sing	le	bad	d pi	xel			2x2	2 cl	uste	er2			2	2x3	clus	ster	4			re	13x4	1 cli	uste	er7-	2
-	с	С	С				С	С	С		_		С	С	С	С				С	С	С	С	С	С
	С	D	С				С	D	С	С			С	D	D	С	С			С	D	C	С	D	С
	С	С	С				С	С	D	С			С	С	D	D	С			С	D	κ	κ	С	С
								С	С	С				С	С	С	С			С	С	С	D	D	С
																					С	С	С	С	С
					2x2	24 l	ine	26																	
	С	С	С										С	С	С										
c	С	D	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	D	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С
cl	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	С
С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С
с	-	pix	el u	Ised	d fo	r co	orre	ctio	n													à			
													D		det	fect	nix	el >	>= !	5 00	bod	nei	ahh	our	s



A DIGITÁLIS RADIOGRÁFIAI RENDSZER TULAJDONSÁGAI

3.1 KÉPMINŐSÉG

3

A radiográfiában vitatott a képminőség fogalma, mivel nehezen definiálható és nem mérhető egyszerűen. Az MSZ EN ISO 17636-2 például azt írja elő, hogy a radiográfiai felvételek a munkadarabnak és a vizsgálati technika színvonalának megfelelő képminőségűek legyenek. A képminőséggel szembeni követelményeknek való megfelelés szabványos képminőségjelzőkkel igazolható. Az igazolni kívánt képminőségi mutató a vizsgálati technika által meghatározott tényezőktől – úgymint kontraszt, leképezési élesség és zaj – függ. Ez a digitális radiográfiai képeken a természetes hibák felismerhetőségét is befolyásolja. Az alkalmazási szabványok (mint például az MSZ EN ISO 17636-2) különböző határértékeket szabnak meg a vizsgálati követelmény teljesítéséhez szükséges képminőségre vonatkozóan.

3.2 ALAPVETŐ BEFOLYÁSOLÓ PARAMÉTEREK

A digitális radiográfiában három fontos paraméter befolyásolja a hiba felismerhetőségét:

- 1. a hibaleképezés kontrasztja,
- 2. a képen lévő zaj,
- 3. a leképezés élessége.

Ezeket a paramétereket mérésekkel vagy képfeldolgozó program segítségével végzett vizuális értékeléssel, valamint a felvétel készítésekor odahelyezett képminőségjelzőkkel lehet meghatározni. Mivel ezek a paraméterek kölcsönösen befolyásolják egymást, a digitális radiográfiai vizsgálatban mindig "kombinált paramétereket" ellenőrzünk.



3.1. ábra. Az eltérések felismerhetőségét alapvetően befolyásoló paraméterek

A megfelelő CNR ellenőrzése a huzalos (W) képminőségjelzővel történik.

A normalizált jel-zaj viszony megfelelőségének értékeléséhez meg kell határozni az alap térbeli felbontást az MSZ EN ISO 19232-5 szerinti kéthuzalos képminőségjelzővel és meg kell mérni a felvételen a jel-zaj viszonyt. A normalizált SNR_N kiszámítása az alábbi képlettel történik:

$$SNR_N = \frac{SNR \cdot 88,6}{SR_b}$$

Atomerőműi Képzési Bázis

Az SR_b értékét mikrométerben kell behelyettesíteni.

3.3 A KONTRASZT ÉS A KONTRASZT-ZAJ VISZONY

Először is a kimutatni kívánt eltérés által okozott vastagság-változásnak kellően nagy dóziskülönbséget kell biztosítania a detektor számára. Ezt nevezzük sugárkontrasztnak. Ez a sugárkontraszt elsősorban a sugárzás energiájától, az átvilágított alapanyagtól, a falvastagságtól, az eltérés kiterjedésétől és adott esetben anyagától (zárvány) is függ.

Ha definiálni szeretnénk a megfelelő hibafelismeréshez szükséges minimális kontrasztot, akkor az csak megfelelően nagy térbeli felbontás és a képen előforduló zaj figyelembevételével lenne lehetséges.

Zajforrások								
Fotonzaj Oka: túl alacsony intenzitás	A megvilágítási dózis négyzetgyökével változik							
Strukturális zaj Oka: A pixelek érzékenységének különbsége, a foszforréteg inhomogenitása	A megvilágítási dózissal egyenes arányban változik							
Vizsgált tárgy Oka: Az anyag kristályszerkezete, felületi érdes- ség, hegesztési varratok, öntvény felületének ér- dessége	Az energiával és a besugárzás irányával változik Szükség esetén simítás vagy csiszolás							

3.1. táblázat. Zajforrások

3.3.1 A jel-zaj viszony (SNR)

A zaj tulajdonképpeni hasznos jelre gyakorolt hatásának mértéke az ún. jel-zaj viszonnyal definiálható (angolul: signal to noise ratio, SNR).

Nagy SNR \rightarrow a zajhoz képest nagy hasznos jel \rightarrow kevés zaj a képen. Kis SNR \rightarrow a zajhoz képest kis hasznos jel \rightarrow jelentős mértékű látható zaj.

3.3.2 A kontraszt-zaj viszony (CNR)

Ha a zaj megengedett nagyságát kell vizsgálnunk, akkor az az ún. kontraszt-zaj viszonnyal (contrast to noise ratio, CNR) írható le a legjobban.



Atomerőműi Képzési Bázis
Ha túl nagy a létrejövő hibakontraszt, akkor a vizsgálat magasabb zajhányaddal, azaz alacsonyabb SNR-rel is elvégezhető. A *3.2. ábrán* ezt a horony szemlélteti. Az életlenséget ennél a vizsgálatnál elhanyagolhatónak tekintjük.

3.2. ábra. Kontraszt-zaj viszony (CNR)



3.4 A KIS MÉRETŰ ELTÉRÉSEK FELISMERHETŐSÉGE

Az apró eltérések vagy a képminőségjelző vékony huzaljainak láthatósága a kontraszt-zaj viszonytól (CNR), az átvilágítás irányából és a hiba szélességéből adódó falvastagság különbségtől, azaz attól az élességtől (térbeli felbontástól) függ, amellyel az eltérés leképezése történik.

Ezért az életlenség meghatározásához a huzalos képminőségjelző mellett a kéthuzalos képminőségjelzőt is el kell helyezni a darabon a felvétel készítésekor.



3.3. ábra. Az életlenség hatása az eltérés felismerhetőségére



3.4.1 Az alap térbeli felbontás (SRb)

3.4.1.1 SRbimage, geometriai életlenség ug

Az alap térbeli felbontás meghatározása az MSZ EN ISO 19232-5 szerinti kéthuzalos képminőségjelző segítségével történik. A vizsgált tárgy sugárzó felőli oldalán a kéthuzalos képminőségjelzővel végzett mérés eredménye az u_{total} [µm] teljes életlenségi érték, amit az éppen már nem különállónak látszó vonalpár ad meg. Az u_{total} teljes életlenség az detektorrendszer geometriájából és életlenségéből tevődik össze:

$$u_{total} = \sqrt{u_{Detektor}^2 + u_{Geometrie}^2}$$

Az eredményül kapott alap térbeli felbontás az

$$SR_b^{image} = \frac{u_{total}}{2}$$

képlettel számítható ki és a közvetlen átalakító mátrixdetektorok (például α-Se-DDA vagy CdTe-DDA) esetében megfelel a pixelméretnek. A szcintillátoros CR-rendszerek és mátrixdetektorok esetében az $SR_b^{detector}$ nagyobb, mint a megadott pixelm $u_g = \frac{d \cdot b}{f}$ az

képlet alapján kis méretű fókuszpont és megfelelő fmin minimális távolság szükséges.

A mindennapi gyakorlatban azonban vastagabb tárgyaknál (nagyobb b távolság) csak igen nehezen valósítható meg az a követelmény, hogy a geometriai életlenség ne legyen nagyobb a belső életlenségnél (nagyobb távolság = hosszú megvilágítási idő, ill. kevés hely áll rendelkezésre). Többnyire elegendő betartani a szabványban előírt fmin minimális távolságokat, de repedésre hajlamos anyagoknál el kell érni legalább a B vizsgálati osztályt.

3.4.1.2 SR_b^{detector}, a detektor életlensége

A detektor alap térbeli felbontásának méréséhez a kéthuzalos képminőségjelzőt közvetlenül a detektor bemeneti ernyőjére kell ráhelyezni. Az így meghatározott életlenséget nevezzük detektor életlenségnek. A detektor alap térbeli felbontása az

$$SR_b^{Detektor} = \frac{u_i}{2}$$

képlettel számítható ki, ahol ui a belső életlenség. A közvetlen átalakító mátrixérzékelők (például α-Se-DDA) esetében megfelel a pixelméretnek. Képtároló lemezes rendszereknél és vastagabb szcintillátoros mátrixérzékelőknél az érzékelő alapvető térbeli felbontása (SR^{detector}) a megadott pixelméretnél nagyobb.



3.4.2 A sugárzás energiája

Ha a viszonylag egyszerűen használható gamma-sugárzók helyett röntgenberendezést alkalmazunk, illetve kisebb falvastagságok esetén csökkentjük a röntgensugárzás energiáját, az jelentős mértékű kontrasztnövekedést eredményez. Itt figyelembe kell venni az ajánlott maximális csőfeszültséget, illetve egy ajánlott falvastagság-tartományon belül a gamma-sugárzók alkalmazását. Az energia megválasztása mindig a besugárzott anyagtól és az átvilágított w falvastagságtól függ. Mivel a mátrixdetektorok magas kontrasztfelbontásúak, inkább korlátozott felbontóképességűek, megnövekedett zajt produkálnak, itt is az ajánlottnál magasabb energiák használhatók.

3.4.3 Szórt sugárzás

A szórt sugárzás a környezeti szórt sugárzásból, valamint a munkadarabban keletkező szórt sugárzásból tevődik össze. A szórt sugárzás kollimátorok és blendék, valamint oldal- és peremburkolatok alkalmazásával csökkenthető (3.4. ábra).





3.5 AZ MSZ EN ISO 19232 SZERINTI KÉPMINŐSÉGJELZŐK

Világszerte különböző képminőségjelzőket alkalmaznak. Európában, így Magyarországon is a legelterjedtebb az MSZ EN ISO 19232-1 szabványban részletesen ismertetett huzalos képminőségjelző. Ez egy műanyag tokból, valamint a benne elhelyezett ólom jelölésekből és meghatározott átmérőjű, egymással párhuzamos huzalokból (vas, alumínium vagy réz) áll. A képminőségjelző mindig hét huzalt tartalmaz, amelyek vastagsága a huzalok sorszámával egyre csökken. A legvastagabb mindig az 1-es számú huzal, átmérője 3,2 mm; a legvékonyabb pedig a 19-es számú, ennek átmérője mindössze 0,05 mm. A képminőségjelzőkben elhelyezett hét huzal egy-egy huzalcsoportot alkot.



Ezek a huzalcsoportok a következők: W 1–7, W 6–12, W 10–16 és W 13–19. A W az angol wire, azaz huzal szóból ered, a jelölésben mindig a legvastagabb huzal száma szerepel a huzal anyagának megnevezése mellett.

3.5. ábra. Huzalos képminőségjelzők



Az MSZ EN ISO 19232-1 részletesen ismerteti a huzalos képminőségjelzők felépítését.

Más országokban más képminőségjelzőket, ún. Image Quality Indicator-okat (IQI-kat) használnak. Ezek különböző vastagságú lapokból vagy lépcsős ékekből állnak, amelyekben különböző átmérőjű furatok vannak kialakítva. Ilyen szerepel az MSZ EN ISO 19232 szabvány 2. részében is, amely a lépcsős-furatos képminőségjelzőt ismerteti (*3.6. ábra*).





Az átvilágított falvastagságnak megfelelő képminőség követelményeit a DIN EN ISO 19232-3 vagy megfelelő felvételtechnikai (hegesztési varratok vagy öntvények vizsgálatáról szóló) szabványok ismertetik. Ha ismerjük a szükséges képminőség mutatószámát, akkor olyan képminőségjelzőt tudunk választani, amelynek lépcsőzetessége tartalmazza a szükséges lépcsőt vagy huzalszámot.

3.5.1 A képminőségjelző elhelyezése

A képminőség meghatározására rendszerint a felvétel készítésekor a sugárforrás felé néző oldalon helyezzük el a képminőségjelzőt (3.7. *ábra*). Úgy kell ráfeküdnie az alapanyagra, hogy a huzalok a hegesztési varratra merőlegesek legyenek.



3.7. ábra. A képminőségjelző elhelyezése



Amennyiben ez nem lehetséges – például duplafalú átvilágítás esetén – akkor a detektor oldalon is elhelyezhető. Ha a képminőségjelzőt a detektor felőli oldalon (*3.8. ábra*) helyezzük el, akkor a huzalok jobban felismerhetők. Ebben az esetben vizsgálati jegyzőkönyvben szerepelnie kell egy megjegyzésnek, és a felvételen is meg kell jelennie egy "F" jelölésnek.



3.8. ábra. A képminőségjelző elhelyezése ellipszisfelvétel készítésekor

Egyenes hegesztési varratoknál és nagy hajlítási sugarú körvarratoknál a képminőségjelzőt úgy kell elhelyezni, hogy annak huzaljai merőlegesek legyenek a varratra. Kis hajlítási sugarú körvarratoknál (ellipsziseknél) úgy érdemes elhelyezni a képminőségjelzőt, hogy a huzalok párhuzamosak legyenek a varrattal, és a legvékonyabb huzal legyen a hegesztési varrat felé, hogy minden huzalnál közel azonosak legyenek az átvilágítási feltételek.

3.6 AZ MSZ EN ISO 19232-5 SZERINTI KÉTHUZALOS KÉPMINŐSÉGJELZŐ

A kéthuzalos képminőségjelző (3.9. ábra) az életlenség ellenőrzésére, azaz az alap térbeli felbontás meghatározására használható. Itt a műanyag tokba foglalt, felületközeli huzalpárok mindegyike 15 mm hosszú, az átmérőjük pedig geometriai sorozatnak megfelelően csökken. A huzalpárok platinából vagy volfrámból készülnek. Magas rendszámuk miatt ezek a fémek erős kontraszttal jelennek meg a radiográfiai felvételen.



A huzalok közötti rés láthatóságával meghatározható az életlenség és így az alapvető térbeli felbontás (3.9. ábra). Az életlenség értéke kiolvasható az MSZ EN ISO 19232-5 szabványban szereplő táblázatból (3.2. táblázat).

Huzalpár sorszáma	Hozzárendelt képéletlenség [mm]	Huzalátmérő és távolság d [mm]	Alap térbeli felbontás SRb [mm]
D 13	0,10	0,050	0,050
D 12	0,13	0,063	0,063
D 11	0,16	0,080	0,080
D 10	0,20	0,100	0,100
D 9	0,26	0,130	0,130
D 8	0,32	0,160	0,160
D 7	0,40	0,200	0,200
D 6	0,50	0,250	0,250
D 5	0,64	0,320	0,320
D 4	0,80	0,400	0,400
D 3	1,00	0,500	0,500
D 2	1,26	0,630	0,630
D 1	1,60	0,800	0,800

3.2.	táblázat.	Huzalp	árok s	orszáma.	életlenséa.	alap	térbeli	felbontás
0.2.	tubiuzut.	riuzuip		orozumu,	olotionoog,	urup	1010011	lonoontaa

A felvétel kiértékelésekor azt a vonalpárt kell megkeresni, amelynél már éppen nem látszik a huzalok kettéválása. Ennek mérése képfeldolgozó rendszerrel és vonalprofillal lehetséges. Egy huzalpár akkor tekinthető kettéválónak, ha 20%-os Dip- (beesés az intenzitásprofilban) érték mérhető. Az első, legkisebb sorszámú nem felbontott huzalpár adja meg az életlenség és így az SRb-alap térbeli felbontás értékét.

3.7 Az elért képminőség

3.7.1 Az elért alap térbeli felbontás (SRb) meghatározása

A digitális radiográfiai kiértékelő szoftverek általában rendelkeznek az SRb mérésére szolgáló beépített programösszetevővel, amelyen egyszerűen és gyorsan megkaphatjuk a felvétel alap térbeli felbontás értékét. Ha a használt szoftvernek nincs ilyen funkciója, akkor a vonalprofil segítségével kell meghatározni az SRb értékét. Az MSZ EN ISO 17636-2 szabvány minimum 21, egymás melletti vonal használatát írja elő. Az eredő intenzitásprofil az egyes vonalak menti profilok átlagából alakul ki, ezzel csökkentve a profilgörbe zajosságát.







A Dip értékének kiszámításához érdemes felnagyítani a profilgörbe adott szakaszát. Az alábbi ábrán látható A, B és C távolságokat meg kell mérni a függőleges tengely skálaosztása segítségével.





A 20%-os Dip-hez tartozó pontos felbontást a szomszédos huzalpárok Dip-jének interpolálásával lehet meghatározni.





3.11 ábra. Az interpolált SRb-érték grafikus meghatározása

Az interpolált SRb-értéket iSRb-ként vagy iSRb^{detektor}-ként kell rögzíteni a vizsgálati jegyzőkönyvben. Ez az érték felhasználható a nem interpolált SRb-érték helyett a szerződő felek megállapodása alapján.

3.7.2 A normalizált jel-zaj viszony (SNR_N) meghatározása

A mért jel-zaj viszony általában egy 20x55 pixeles ablakban kerül meghatározásra az átlagos szürkeérték és a szórás hányadaként. Az SNR-mérés ablakának szélességét 20 pixelre kell korlátozni, a hossza ≥55 pixel lehet. A nagyobb hosszúság növeli az SNR mérésének pontosságát.



A mérésre egyenletes szürkeértékű régiót kell kiválasztani a képen, hegesztésvizsgálatnál például a varrat melletti hőhatás-zónát. Az ilyen területeken az átlagos szürkeérték egyenesen arányos a sugárzás dózisával.

Hasonló sugárterhelés esetén az életlen digitális rendszerek magasabb mért SNR-t érnek el, mint a nagy felbontású rendszerek, de nem nyújtanak megfelelő teljesítményt a finom hibák észleléséhez, ezért a mért SNR-t az alap térbeli felbontással normalizálni kell. Azonos normalizált alap térbeli felbontással rendelkező rendszerek hasonló részletgazdagsággal rendelkeznek.

A normalizálás a digitális radiográfiai rendszer (SRb) alap térbeli felbontásának értékén alapul, amelyet vagy a gyártó adott meg, vagy amelyet a felhasználó határoz meg az MSZ EN ISO 17636-2 szabvány C. mellékletében leírt eljárással.

Az összes SNRN-értéket az alábbiak szerint normalizáljuk:

$$SNR_N = SNR_{m\acute{e}rt} \cdot \frac{88.6 \ \mu m}{SR_b \ [\mu m]}$$

FONTOS: Az SRb-t és az SNR-t a szűretlen, eredeti képen kell meghatározni és megmérni!

3.7.3 Az elért képminőségi mutató meghatározása

A képminőségi mutatót (a huzalos tűsor értékét) nem mérjük, hanem csak vizuálisan állapítjuk meg. A kép kinagyítható, és a kontrasztkiterjesztéssel optimalizálható. Az a legvékonyabb huzal adja meg a képminőségi mutatót, amely legalább 10 mm hosszúságban még éppen látható. A monitoron gyakran az 1:1 arányú ábrázolással – azaz 1 pixel a képen = 1 pixel a képernyőn – érhető el az optimális ábrázolás.

3.12. ábra. A képminőség kiértékelése: 4 darab huzal látható = az elért képminőség a W 13; a hegesztési varrat kiértékeléséhez szűrők is alkalmazhatók







3.8 Képfelvétel és képfeldolgozás

3.8.1 Képfelvétel

A képfeldolgozás első lépése a képfelvétel. A mennyiségi értékeléshez, ill. a kiértékeléshez meg kell érteni a képfelvétel valamennyi tényezőjét. A tárgytól a képfeldolgozó rendszer memóriájában létrehozott digitális képig vezető út három lépésre bontható:

Láthatóvá tétel: A röntgensugárzás tárgy általi gyengítése. Leképezés: A háromdimenziós tárgy levetítése egy kétdimenziós képsíkra. Digitalizálás: Az analóg kép átalakítása diszkrét képpontokból (pixelekből) álló raszterré. A folyamatos intenzitási értékek leképezése szürkeárnyalatok értékére (kvantálás).

Megjegyzés: a képfelvétel határozza meg a képminőséget. Az utána következő képfeldolgozás csak azt az információt képes láthatóvá tenni, illetve kiemelni, ami eleve létezik a képen.

3.8.1.1 A hisztogram

A hisztogram a képen, illetve egy képrészleten előforduló szürkeárnyalatok gyakorisági eloszlásának ábrázolása grafikus formában. Emiatt fontos segédeszköz a felvett kép elemzéséhez. A hisztogram funkció megszámlálja a képen, illetve egy adott képrészleten, hogy hányszor van jelen egy adott szürkeárnyalat. Azután egy diagramon ábrázolja ezeket az értékeket: az Y-tengelyen a szürkeértékek gyakoriságát, az X-tengelyen pedig magukat a szürkeértékeket.

3.13. ábra. Hisztogram ábrázolása oszlop- és vonaldiagramként (szürkeárnyalatok normalizált száma és szürkeárnyalatok értéke)









A hisztogram jellemzői: középérték, szórás, variancia, minimális és maximális szürkeérték.

A gyakorlatban a képfelvétel után a hisztogram kiváló lehetőséget biztosít a felvételi paraméterek ellenőrzésére.

A hisztogram és a fényerő beállításának összefüggése:

Az alábbi ábrákon azt láthatjuk, milyen hatással van a fényerő módosítása a hisztogramra. Az egész hisztogram a magasabb vagy az alacsonyabb szürkeértékek irányába tolódik.



3.14. ábra. Sötét kép a hozzá tartozó hisztogrammal

3.15. ábra. Világos kép a hozzá tartozó hisztogrammal





A hisztogram és a kontraszt beállítás összefüggése

A képen lévő szürkeárnyalatok kiterjesztése például úgy történik, hogy a képen előforduló legkisebb szürkeérték a nullára, a legnagyobb pedig a maximális értékre kerül áthelyezésre. Így egy kiterjesztett kontrasztú kép hisztogramjában hézagok jönnek létre, mivel a kontrasztkiterjesztés után bizonyos szür-keárnyalatok már nem fordulnak elő.





3.17. ábra. Kontrasztban gazdag kép a hozzá tartozó hisztogrammal



3.8.2 Zajelnyomás

A röntgensugárzás kvantumtermészete miatt – a sugárzás intenzitásától és a detektor kiolvasási idejétől függően – jelentős mértékű zaj jelenik meg a radiográfiai képen, ezért a jel-zaj viszony javítása, ill. a zajcsökkentés fontos lépés a képfeldolgozásban.

Ahhoz, hogy az apró és kontrasztszegény részleteket is fel lehessen ismerni, a lehető legnagyobb jel-zaj viszonyra (SNR) van szükség.



3.18. ábra. Zajcsökkentés integrációval



Digitális képintegrációval (több képből középérték képzésével) jelentős mértékű zajcsökkentést lehet elérni. A digitális radiográfiában ezért vagy megfelelően nagyobb intenzitásokkal kell dolgozni (már amennyire ezt a sugárforrás lehetővé teszi), vagy pedig digitális képfeldolgozó rendszerek segítségével kell elvégezni az intenzitás átlagolását.

3.8.2.1 A jel-zaj viszony javítása az intenzitás növelésével

Alapvetően nincs különbség a jel-zaj viszony digitális képintegrációval való javítása és a detektor hosszabb megvilágítási ideje, vagy megnövelt sugárzási intenzitással történő megvilágítása között. Ez esetben is magasabb, azaz jobb jel-zaj viszonyt kapunk.

A gyakorlatban sokszor korlátozza ezeket az eljárásokat, hogy a detektorok a hosszabb megvilágítás miatt egyszerűen túltelítődnek. Ez a nemlineáris viselkedés pedig éppen a jel-zaj viszony javítása ellen hat. Mindez azt jelenti, hogy a mátrixdetektorok esetében gyakran a hosszabb kiolvasási idő és a digitális képintegráció (amit a legtöbb képszerkesztő program egyszerűen "Integrációnak" hív) kombinációját kell választani.

A jel-zaj viszony javulása a képek számának négyzetgyökével van összefüggésben, azaz az SNR nem javítható tetszőlegesen. A képek N számának megnégyszerezése 2-szeres javulást eredményez, míg 4-szeres javuláshoz már 16-szoros integrációt kell elvégezni.

3.8.2.2 A jel-zaj viszony javítása képintegrációval

Bizonyos számú, önálló radiográfiai képekből képzett középértékkel (digitális képintegrálás) jelentős mértékű zajcsökkentés érhető el. Ennek az eljárásnak alapvető feltétele, hogy a tárgy a felvételek készítése közben ne mozduljon el. A gyakorlatban ezt a zajcsökkentő eljárást csak mátrixdetektorok esetén lehet alkalmazni.



Vegyünk a következő példát: négy képet készítettünk egy hibáról. Míg a hiba intenzitása 4-szer azonos intenzitással, addig a zaj ingadozó intenzitással adódott össze. Ha ezt elosztjuk a négy képpel, akkor egyenletes intenzitást kapunk a hiba körül.



3.19. ábra. Zajcsökkentés egy 4-szeres képintegráció példáján keresztül

3.8.3 A képkonverziós táblázat (Look Up Table, LUT)

A képkonverziós táblázat (Look Up Table) alatt azt a táblázatot értjük, amellyel a képadatok szürkeárnyalatai módosíthatók.







3.8.3.1 Bemeneti LUT

A bemeneti LUT lehetővé teszi a detektoradatok súlyozását, és közvetlen hatással van az elmentett képadatokra.

Ezzel kiegyenlíthető a detektor nemlineáris viselkedése. Az a célja, hogy a dózis lineáris növelésével a szürkeértékek is lineáris növekedést mutassanak. Jól összehangolt bemeneti LUT esetén a kétszeres detektordózis kétszeres szürkeárnyalat értéket jelent a képen.

3.8.3.2 Kimeneti LUT

A kimeneti LUT elsősorban a vizsgált szürkeárnyalat-tartomány kontrasztkiterjesztéssel, a sötét képtartományok növelésével vagy bináris kép előállításával történő módosítására szolgál. A monitoron megjelenítendő minden egyes képpont átmegy a kimeneti LUT táblázaton.

Az átalakítás során a képpontnak az eredeti szürkeértéke nem módosul, csak módosítva jelenik meg a monitoron.

A 3.21. ábrán látható példa azt mutatja be, hogyan lehet binarizálni a képadatokat a kimeneti LUT segítségével. A binarizálás azt jelenti, hogy már csak képféle szürkeárnyalat (rendszerint fehér és fekete) fordul elő a képen. A konverziós táblázat úgy van beállítva, hogy az eredeti kép minden olyan szürkeárnyalatát, amelynek értéke pl. 127-nél kisebb, a 0 szürkeértékkel (feketével), ami pedig 127-nél nagyobb, azt a 255 szürkeértékkel (azaz fehérrel) kell ábrázolni.







3.9 A KÉPADATOK SZŰRÉSE

3.9.1 Bevezetés

A digitális képfeldolgozásban roppant nagy jelentősége van a szűrésnek. Az alkalmazási lehetőségek a zajcsökkentéstől, ill. a kisebb képrészletek elsimításától egészen a struktúrák és kisebb részletek kiemeléséig terjednek. A helyi szűrési műveletek további alkalmazási területe az egyszerű struktúrák – például élek, tárgyak pereme, sarkok, pontok – felismerése. Továbbá a képminta térbeli hatásúvá is átalakítható. A hegesztési varratok és öntvények esetében az automatikus hibafelismerés megközelítése ugyancsak speciális szűrési struktúrákon nyugszik.

A képadatok szűrésekor az egyik legnagyobb probléma, hogy a kép tartalmát célirányosan módosítani, ill. manipulálni kell. Ahogy a radiográfiai képen az anyaghibák még inkább láthatóvá tehetők, úgy egy másik szűrő használatával az ellenkező hatást is elérhetjük. Ebből következik, hogy a digitális szűrők alkalmazásához rendelkeznünk kell a különböző szűrők összefüggéseinek és hatásának alapismereteivel.

A képszűrés elméleti alapjai azonosak a jelfeldolgozás elméletével, és erősen matematikaközpontúak. Azonban a mindennapi gyakorlatban végzett vizsgálathoz nincs feltétlenül szükség ezekre a dolgokra. Ezért ebben a részben elsősorban a digitális képszűrés szemléletes értelmezésére helyezzük a hangsúlyt.

3.9.2 Pontműveletek – szomszédsági műveletek

A digitális képfeldolgozásban alapvetően kétféle eljárást különböztetünk meg: a pontorientált és a szomszédosságorientált eljárást.

Pontművelet alatt azokat a műveleteket értjük, amelyek nem teremtenek kapcsolatot az egymással szomszédos képpontok között, hanem csak az adott képpontra vonatkoznak (pl. integrálás).

Ezzel szemben a szomszédsági műveleteknél éppen az ellenkezőjéről van szó: az adott képpontot mindig a környezetében elhelyezkedő többi képponttal összefüggésben vizsgáljuk.



A digitális képfeldolgozásban az egyik legjellemzőbb szomszédsági művelet a szűrés.

3.9.2.1 Egy szűrési művelet gyakorlati megvalósítása

Először egy egydimenziós példán (egy képsor intenzitásain) keresztül magyarázzuk el az ún. szűrőmaszk és a képinformáció közötti szűrést. A feladat egy képsor következő részletének szűrése:



Mivel a digitalizált intenzitások, ill. szürkeárnyalatok értéke 255 (fehér) és 0 (fekete), jelen esetben a fekete és a fehér szín közötti ideális intenzitásbeli ugrásról van szó. A szűrőmaszk három elemből ("együtthatóból") áll, és a következőképpen néz ki:

1/3 1/3 1/3 Szűrőmaszk

A képsor szűrése a szűrőmaszkkal a következőképpen zajlik:

- 1. Ráhelyezzük a szűrőmaszkot a képmintára.
- 2. A képminta minden egyes értékét megszorozzuk a szűrőmaszk "felül lévő" értékével.
- A három szorzás összegét hozzárendeljük az új képponthoz a szűrt képen. Az eredménypont az a pont lesz, amely a szűrőmaszk közepe alatt található.



Az eredmény értékét hozzárendeljük a jelölt képponthoz az eredményképen.

4. Egy képponttal arrébb toljuk a szűrőmaszkot.



Az eredmény értékét hozzárendeljük a jelölt képponthoz az eredményképen.

5. Egy képponttal arrébb toljuk a szűrőmaszkot.



Az eredmény értékét hozzárendeljük a jelölt képponthoz az eredményképen.

6. Egy képponttal arrébb toljuk a szűrőmaszkot.



Az eredmény értékét hozzárendeljük a jelölt képponthoz az eredményképen. A szűrés eredményeképpen az alábbi értékű képsort kapjuk:





Láthatjuk, hogy az alkalmazott szűrőmaszk "elsimította" (elmosta) a képminta ideális intenzitásbeli ugrását. Látható, hogy az itt alkalmazott szűrőmaszk egy életlenre állított kameraobjektívhez hasonló viselkedést eredményez. Ezt a szűrőt "aluláteresztő szűrőnek" nevezzük. Ha több elemből álló szűrőt használunk, akkor az "elmosódási hatás" tovább erősödik. Például, ha 5 elemből állna a szűrőmaszk, akkor az elmosódás már négy pixelnél jelentkezne.

A szűrőmaszk elemeinek értékét általában úgy normalizálják, hogy az összegük egy legyen, mivel az nem növeli a szürkeárnyalat átlagos értékét.

A képek szűrésekor lezajló folyamat teljes mértékben megegyezik az egydimenziós példában bemutatott folyamattal. Az alábbi képen látható, kétdimenziós szűrőmaszk (vagy szűrőmátrix) – angolul kernelnek is nevezik – egy bizonyos képrészleten helyezkedik el. A páratlan számú elemet tartalmazó szűrőmaszkok esetében a kiszámítandó eredménypont mindig a szűrőmaszk közepén helyezkedik el. Az eredménypont kiszámítása a következőképpen történik:



- 1. Ráhelyezzük a szűrőmaszkot a képmintára.
- 2. A képminta minden egyes értékét megszorozzuk a szűrőmaszk értékeivel.
- A kilenc szorzás összegét hozzárendeljük az új képponthoz a szűrt képen. Az eredménypont az a pont lesz, amely a szűrőmaszk közepe alatt található.



Az eredmény értékét hozzárendeljük a jelölt képponthoz az eredményképen.

4. Egy képponttal arrébb toljuk a szűrőmaszkot.



Az eredmény értékét hozzárendeljük a jelölt képponthoz az eredményképen.

5. Egy képponttal arrébb toljuk a szűrőmaszkot.



Az eredmény értékét hozzárendeljük a jelölt képponthoz az eredményképen.

6. Egy képponttal arrébb toljuk a szűrőmaszkot.

1/9	1/9	1/9	0	0/9 +	0/9 +	0/9	
1/9	1/9	1/9		0/9 +	0/9 +	0/9	
[1/9]	L d	1/9		0/9 +	0/9 +	0/9 =	0



Atomerőműi Képzési Bázis

Az eredmény értékét hozzárendeljük a jelölt képponthoz az eredményképen. A szűrés eredményeképpen az alábbi értékű képrészletet kapjuk:

	255	255	170	85	0	0
l						

Itt is azt láthatjuk, hogy az alkalmazott szűrőmaszk "elsimította" (elmosta) a képminta ideális intenzitásbeli ugrását. Ezt a szűrőt "aluláteresztő szűrőnek" nevezzük.

3.9.3 Különböző szűrőmaszkok

3.9.3.1 Aluláteresztő szűrő

A szűrőmaszk fajtája meghatározza a szűrés képre gyakorolt hatását. Az imént bemutatott aluláteresztő szűrőnek az a jellemzője, hogy mátrixának minden értéke pozitív. Ha ráadásul minden érték még egyforma is, akkor azonos hatást gyakorol a képpont összes szomszédos pontjára. Ez a hatás abban nyilvánul meg, hogy kiátlagolja a szürkeértékek kisebb ingadozását, amivel pl. csökkenthető a zaj (geometriai átlagolás az integrációnál alkalmazott időbeli átlagolás helyett). Azonban egy aluláteresztő szűrő alkalmazásával még a tűéles képek is elmosódottak lesznek. Minél nagyobb a szűrőmaszk, annál erősebben jelentkezik az apró struktúrák elmosódása.



3.9.3.2 Felüláteresztő szűrő

Ha negatív értékek fordulnak elő a szűrőmaszkban, akkor a differenciáló hatás jön létre. A differenciáló szűrő az azonos szürkeértékeket tartalmazó képrészleteknél nulla értéket ad eredményül, ha a mátrixértékek összege nulla.

A szürkeárnyalatok közötti átmeneteknél ennek a szűrőnek az adott átmenet, azaz a szürkeérték gradiens erőssége lesz az eredménye.

Hatása a következő (a lépések azonosak a 10.3 pontban ismertetett lépésekkel):





Először ráhelyezzük a szűrőmaszkot a képsor bal oldalára. A képsor minden egyes értékét megszorozzuk a szűrőmaszk "felül lévő" értékével.



A három szorzás összegét hozzárendeljük az új képponthoz a szűrt képen. Az eredménypont az a pont lesz, amely a szűrőmaszk közepe alatt található.

A következő lépésekben mindig egy képponttal jobbra toljuk a maszkot. A lépések a következők lesznek:



Az eredménykép pedig így néz ki:



és egy magas, nullától különböző jelet mutat a szürkeértékbeli ugrásban.

A felüláteresztő szűrő kétdimenziós változatával a következő képet kapjuk eredményül:



3.9.3.3 Sávszűrő

A sávszűrő egyaránt rendelkezik differenciáló tulajdonságokkal a szürkeértékek közötti átmenetek felismeréséhez, valamint integráló hatással a zavaró zajok csökkentéséhez. Ennek megfelelően a szűrőmaszk közepén több pozitív értéket tartalmaz (integráló hatás), míg a széle felé negatív értékeket a szürkeátmenetek kivilágosítására (differenciáló hatás).





A sávszűrő hatása a fenti képen látható: a középső 5 érték adja az aluláteresztő hatást, míg a széleken lévő negatív értékek a felüláteresztő hatást. Ezt a szűrőt Gauss-szűrőnek (DoG, Difference of Gaussians) vagy a szűrő hatásvonala miatt "mexikói kalapnak" is nevezik.

3.9.3.4 Medián szűrő

A medián szűrő egy rendkívül számításigényes simító szűrő, amely elsimítja a kontúrok oldalát, de egyúttal megtartja az éleket.

Ez az eljárás először nagyság szerinti sorrendbe rendezi a ráhelyezett szűrőmaszkban lévő szürkeértékeket. Az ábrán egy 9 pixel méretű képrészlet látható.

A lista elejére kerül a három 2-es (1–3. hely), ezt követi a 3-as, aztán a három 4-es, majd az 5-ös, végül pedig szélsőséges értékként a 15-ös.

Az eredményképen az új képpont pontosan az a szürkeérték lesz, amely ennek a képpontértékfelsorolásnak a közepén található, jelen esetben az 5. helyen álló 4-es.







Az aluláteresztő szűrővel összehasonlítva a medián szűrő hatása a következő képen látható.

Eredeti

Aluláteresztő szűrővel

Medián szűrővel

Figyeljük meg, hogy az aluláteresztő szűrőnél a ráragasztott penetraméteren lévő három furat erősen elmosódottan jelenik meg, míg a medián szűrőnél szinte teljesen kivehető marad. A kép is kevésbé elmosódott.

3.9.3.5 Szűrők a struktúrák kiemeléséhez

Ebben a fejezetben már bemutattunk olyan szűrőket, amelyek kiemelik a struktúrákat (szürkeértékek közötti átmeneteket). Ezek olyan szűrők, melyek szűrőkernelében negatív értékek szerepelnek.

Élesítő szűrő (Sharpen)

Az alábbi, hegesztési varratról készült képen a hibákat és a képminőségjelző huzaljait, illetve a penetraméteren lévő lyukakat akarjuk még jobban láthatóvá tenni.



Az eredeti kép

A kép 3x3-as szűrőmaszkkal

A szűrőmaszk

Az itt látható szűrőmaszkot alkalmazó enyhe élességszűrő kissé kiemeli a struktúrákat; az eredeti kép intenzitását a mátrix közepén lévő érték adja meg. A közvetlenül szomszédos értéket levonja, így olyan gradienst hoz létre, amely hozzáadódik az eredeti képhez. Az arány itt 6:-4.



3	
6 ISO 12	<u>6 ISO 12</u>
	0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0

A bal oldali ábrán az eredeti érték és a gradiens aránya 5:-4-re csökkent, az élesítő hatás csökkent. Nagyobb mátrix – például 5x5-ös – esetén több képpont vonható be a gradiensszámításba, ez még erősebbé teszi a szűrő hatását.

Áltérbeli (pseudoplast, pseudo 3D)) szűrők

A fény és az árnyék szimulálásával még egyértelműbbé tehetők a struktúrák. Ennél a folyamatnál a vizsgálat tárgy térbeli hatást keltő képét kapjuk eredményül. A szűrőmátrixok helyes megválasztásával különböző irányok lehetségesek:





3.9.3.6 Szűrő az élek és struktúrák kinyeréséhez (Find Edges)

Szűrők segítségével különböző struktúrák és élek nyerhetők ki a képből, melyek alapján például meghatározhatók a repedések. Az élek kiemelése vagy kinyerése nagyban hozzájárulhat a képkiértékelés javításához. Egy kép vizsgálatakor az emberi szem elsősorban a képen szereplő élekre és sarkokra irányul, csak ez után kerül sor a felületszerű régiók elnagyolt átnézésére.

Olyan is előfordulhat, hogy csak a leképezett tárgy élei a fontosak a kép értelmezéséhez, például formaérzékelésnél vagy öntvények és egyéb alkatrészek ellenőrzésekor. Ebben az esetben az lenne az ideális, ha megfelelő zajelnyomó és élkiemelő algoritmussal egy olyan bináris vonalrajzot kapnánk eredményül, amelyen csak az élek látszódnak.

Az alábbi, vasalóról készült képen optimalizált algoritmussal kerültek kinyerésre az élek. Nem mindig egyszerű kiválasztani a megfelelő szűrőt az ilyesféle feladatokhoz.



Eredeti kép

Klasszikus, szűrőtechnikai alapú élműveletek az ún. Sobel- és Laplace-operátorok, valamint a sávszűrők. Ezek a kép feldolgozására használt különböző szűrőmátrixok (szűrőkernelek) számukban és tartalmukban térnek el egymástól, és a legtöbbször 3x3-as vagy nagyobb, kétdimenziós szűrőmaszkok.



A kép élkinyerés után

4 ALKALMAZÁSOK (HEGESZTETT KÖTÉS, ÖNTVÉNY, KORRÓZIÓ)

4.1 A DIGITÁLIS FELVÉTELKÉSZÍTÉS SZABVÁNYOS KÖVETELMÉNYEI

Az MSZ EN ISO 17636-2:2013 a fém alapanyagok – elsősorban réz (Cu), acél (Fe), titán (Ti), alumínium (Al) és ezek ötvözetei – hegesztett kötéseinek digitális radiográfiai vizsgálatára vonatkozik. Ez a szabvány rendelkezik arról, hogy a radiográfiai felvételek a vizsgált tárgynak és a vizsgálati technika színvonalának megfelelő képminőségűek legyenek. Meghatározza a gamma- és röntgensugárzók segítségével, képtároló lemezes technika (CR = Computed Radiography, számítógépes radiográfia) és/ vagy digitális mátrixdetektoros radiográfia (DDA = Digital Detector Array) alkalmazásával radiográfiai vizsgálat követelményeit.

Öntvények esetében a fenti követelményeket az MSZ EN 12681-2:2018, "Öntészet. Radiográfiai vizsgálatok. 2. rész: Digitális detektorokra alapozott módszerek" szabvány, míg a csövek korrózióvizsgálatához az MSZ EN ISO 20769-1:2019, "Roncsolásmentes vizsgálat. A csövekben lévő korrózió és lerakódások röntgen- és gamma-sugaras radiográfiai ellenőrzése. 1. rész: Érintőleges radiográfiai ellenőrzés", illetve az MSZ EN ISO 20769-2:2019, "Roncsolásmentes vizsgálat. A csövekben lévő korrózió és lerakódások röntgen- és gamma-sugaras radiográfiai ellenőrzése. 2. rész: Kettős falú radiográfiai ellenőrzés" szabványok tartalmazzák.

A digitális képek vizsgálatához szükséges hardverekről és szoftverekről – úgymint számítógép, vizsgáló program, monitor, nyomtató –, valamint a vizsgálati körülményekről a fenti szabványok nem rendelkeznek, ennek ellenére ezeknek is meg kell felelniük a bennük szereplő képminőségi kritériumok-nak.

A digitális felvételekkel kapcsolatos követelményeket terjedelmi okokból a fémek hegesztett kötéseinek digitális radiográfiai vizsgálatára vonatkozó MSZ EN ISO 17636-2:2013 szabvány alapján mutatjuk be.

4.1.1 Vizsgálati osztályok

Az MSZ EN ISO 17636-2 két vizsgálati osztályt különböztet meg:

- A vizsgálati osztály: általános vizsgálati technika.
- B vizsgálati osztály: magasabb érzékenységű vizsgálati technika.

A vizsgálati technika kiválasztása mindig a megrendelő és az radiográfiai felvételek készítője közötti megállapodáson alapul, és igazodik a vizsgálattechnikai követelményekhez. Ha a felvételek az MSZ EN ISO 5817 szerinti értékelés keretében készülnek, akkor az MSZ EN ISO 17635 szerint alkalmazandó vizsgálati osztály a legtöbb esetben a B vizsgálati osztály. *Megjegyzés:* Amennyiben nincs lehetőség a B vizsgálati osztály vizsgálati körülményeinek betartására – például sugárforrás vagy f távolság kiválasztása –, úgy a B vizsgálati osztály akkor tekinthető teljesítettnek, ha a normalizált jel-zaj viszony követelményt (SNRN) megállapodás szerint 1,4-szeresére növeljük. Azonban a B vizsgálati osztály által megkövetelt képminőséget (huzalos képminőségjelző) mindenképpen el kell érni.

4.1.2 A felvételi elrendezések kiválasztása

A felvételi elrendezés kiválasztása függ a vizsgált tárgy és a vizsgálati terület méretétől és alakjától, a hozzáférhetőségtől és a várható hibás helytől. Mindenesetre a hegesztési varratot lehetőség szerint merőlegesen kell átvilágítani (a kép közepén legyen). Ha valamilyen speciális esetben – például oldalkötési hibák kimutatásakor – el kell térni a merőleges átvilágítástól, akkor azt fel kell jegyezni a jegyzőkönyvben. A különböző felvételi elrendezéseket a szabvány 7.1. pontja ismerteti az 1–19. képen, vázlatos ábrázolás formájában (nem mérethű).

4.1.2.1 Meghatározott felvételi elrendezések speciális szabályai

Ellipszisfelvétel (11. kép) akkor alkalmazható, ha:

- ◆ De ≤ 100mm,
- ♦ a varrat szélessége ≤ De/4 és
- a névleges falvastagság t ≤ 8 mm.

A 100 százalékos vizsgálathoz legalább 2 darab, egymáshoz képest 90°-kal elforgatott helyzetben készült felvételre van szükség. Ha a falvastagság és a külső átmérő aránya t/De > 0,12, akkor legalább 3 darab, egymáshoz képest 60°-kal (ill. 120°-kal) elforgatott helyzetben készült felvételre van szükség.

Amennyiben De < 100 mm átmérő esetén már nincs értelme az ellipszisfelvételnek, akkor a szabványban a 12. képen ábrázolt merőleges átvilágítás alkalmazható. A 100 százalékos vizsgálathoz legalább 3 darab, egymáshoz képest 60°-kal (ill. 120°-kal) elforgatott helyzetben készült felvételre van szükség.



4.1. ábra. Nem vizsgált területek a 12. (11.) képen



Kis csőátmérőnél, ha a 12. kép szerinti három részfelvétel alapján készítünk felvételt, akkor 100 százalékosnál kisebb lesz a vizsgálat eredménye.

A 2-es, 13-as és 14-es felvételi elrendezésnél a nem hajlítható érzékelők síkban helyezhetők oda. Ebben az esetben figyelembe kell venni, hogy a vizsgált tartomány közepe és széle között megnő a geometriai életlenség.

4.1.3 A sugárforrás kiválasztása

A sugárforrás kiválasztása az alábbiaktól függ:

- a szerkezeti anyagtól,
- a sugárzási irány középpontjában átvilágított w falvastagságtól, valamint
- a vizsgálati osztálytól.

4.1.3.1 Felvételkészítés max. 1000 kV-os röntgensugárzással

A röntgensugárzás használata mindenféle falvastagsághoz és szerkezeti anyagok engedélyezett. A kiváló megjelenítési érzékenység elérése érdekében a röntgenfeszültségnek a lehető legalacsonyabbnak, valamint a digitális képen az SNRN értékének a lehető legmagasabbnak kell lennie. A röntgenfeszültség vastagságtól függő, ajánlott maximális értéke a 20. képen látható. Ezek a maximális értékek a filmes radiográfiában már jól bevált tapasztalati értékek.





4.2. ábra. Az ajánlott röntgenfeszültség meghatározására szolgáló diagram

A mátrixdetektorok pontos kalibrálás után a fenti ábrán megadottnál lényegesen magasabb röntgenfeszültség mellett is megfelelő képminőséget képesek nyújtani.

Az érzékeny (durvaszemcsés) foszforrétegben magas strukturális zajt produkáló képtároló lemezeknél a B vizsgálati osztály alkalmazásakor kb. 20 százalékkal alacsonyabb röntgenfeszültséget kell alkalmazni. Az alacsonyabb strukturális zajú, nagyfelbontású (finomszemcsés) képtároló lemezek az ábrának megfelelő vagy – megfelelően magas SNRN mellett – annál magasabb feszültségekkel is használhatók.

A képminőség (CNR, ill. képminőségi mutató) javítása:

- A kontrasztérzékenység állandó SNRN mellett a kontraszt növelésével, a röntgenfeszültség csökkentésével, valamint ezzel párhuzamosan a megvilágítási dózis (áram vagy idő) növelésével javítható.
- Ha még vannak tartalékok a vizsgált szakasz szürkeárnyalataiban, akkor a kontrasztérzékenység állandó röntgenfeszültség mellett az SNRN növelésével vagy a megvilágítási dózis (áram vagy idő) növelésével is javítható.
- A röntgenfeszültség növelése csökkenti a kontrasztot, de növeli az SNRN értékét. Akkor is nő a kontrasztérzékenység, ha az SNRN növekedése nagyobb, mint a magasabb energia miatti kontrasztcsökkenés.

4.1.3.2 Felvételkészítés > 1 MeV-os gamma- és röntgensugárzókkal

Az Yb₁₆₉, Se₇₅, Ir₁₉₂ és Co₆₀ gamma-sugárzók és > 1 MeV határenergiájú röntgensugárzók esetében az acél (Fe), réz (Cu) és rézötvözet, nikkelbázisú ötvözet, alumínium és alumíniumötvözet, titán és titán-ötvözet alapanyagú vizsgált tárgyak vizsgálati osztálytól függően megengedett vastagságtartományát a *4.1 táblázat* ismerteti.



Suciéntoriés	Átsugárzott falvastagság wFe,Cu [mm]				
Sugariorras	A vizsgálati osztály	B vizsgálati osztály			
Vh	1 – 15	max. 5			
1 D ₁₆₉	AI, Ti: 10 – 70	Al, Ti: 25 – 55			
0.5	10 – 40	14 40			
3e ₇₅	AI, Ti: 35 – 102	14 – 40			
Ir ₁₉₂	20 – 100	20 – 90			
Co ₆₀	40 – 200	60 – 150			

4.1. táblázat. Falvastagság-tartomány gamma-sugárzók esetében

Vékonyfalú, acélból készült tárgyak esetében az Se₇₅, Ir₁₉₂ és Co₆₀ gamma-sugárzók alacsonyabb hibakimutathatóságot lehetővé tevő radiográfiai képeket adnak, mint azok, amelyek röntgensugárzás alkalmazásával készülnek. A gamma-sugárforrások könnyű használatából és kiváló rendelkezésre állásából fakadó előnyök miatt a *4.1. táblázat* olyan vastagságtartományokat ad meg, melyek akkor megengedettek, ha nehézkes a röntgensugarak alkalmazása.

A szerződő felek megállapodhatnak úgy is, hogy az átsugárzott falvastagság még tovább, Ir192 esetében 10 mm-re, Se75 esetében pedig 5 mm-re csökkenthető. Az MSZ EN ISO 17636-2 B mellékletében előírt képminőséget el kell érni.

4.1.4 Detektorrendszerek és fémfóliák

4.1.4.1 Az elégtelen alap térbeli felbontás kompenzálása

CR- és DDA-rendszerek alkalmazásakor a legtöbb digitális mátrixérzékelő és képtároló lemez (IP) letapogató rendszer nagy pixelmérete (> 50 µm) akadályt jelent a filmek alacsony szemcseméretéhez képest (amely a filmeknél nagyon nagy térbeli felbontást eredményez). Ez a nehézség azzal kerülhető meg, hogy kihasználjuk a digitális detektorok nagy dinamikatartományát az SNRN növeléséhez. Ehhez olyan eljárások használhatók, mint a dózis növelése magasabb feszültséggel, hosszabb kiolvasási idő és/vagy képintegrálás. Azonban az SNRN mellett ugyanúgy el kell érni a szükséges huzalos képminőségjelző értéket és alap térbeli felbontást (SRb) is. Az SRb érték nagyítással történő javításának csak d < 0,5 mm fókuszpont méret esetén van értelme. Ha nem lehet elérni az alapvető térbeli felbontást, akkor lehetőség van a kompenzálásra (2. kompenzációs elv).

Ha például egy bizonyos detektornál nem lehet egyszerre elérni a szükséges D12 és W13 értéket (10 mm vastagság, B osztály, lásd a szabvány **B.3. és B.14. táblázatát**), akkor a D11 és a W14 értékekkel érhető el hasonló kimutathatósági érzékenység. A 2. kompenzációs elv szerint maximum két nem felbontott duplex huzalpárt lehet kompenzálni a magasabb huzalos képminőségjelző értékkel. Ha egy bizonyos alkalmazásnál igazolást nyer a szükséges hibakimutathatóság, akkor a szerződő felek megállapodhatnak abban is, hogy a kompenzációt három nem felbontott duplex huzalpárra terjesszék ki.



4.3. ábra. A 2. kompenzációs elv



A szabvány B melléklete szerint a huzalos képminőségjelző előírt értékének el nem érésekor tilos azt kompenzálni. Az SNRN-nél mindig a valós, meghatározott értéket kell alkalmazni.

4.1.4.2 Fémfóliák alkalmazása, árnyékolás

Fém előtétfólia használata esetén az érzékeny detektorrétegnek és a fémfóliának kiválóan kell érintkeznie egymással. Ez vákuumcsomagolású képlemez (IP) használatával vagy kazetták esetén leszorító nyomással érhető el. Az IP-vel nem jól érintkező ólomlemezek képéletlenséghez és ezáltal az SRb-kép teljes térbeli felbontás romlásához vezethetnek. Az ólom és az IP érzékeny rétege közötti védőréteg jelentősen csökkenti az elektronok erősítő hatását, ezért az csak magasabb energiák mellett jelentkezik. A sugárzás energiájától és a védőréteg méretétől függően a fémfóliák erősítése a jellemző röntgenenergiák mellett 20 és 100 százalék között mozog (a fémlemez nélküli megvilágításhoz képest).

Az IP-vel érintkező ólomlemez miatti alacsony erősítő hatás azzal kompenzálható, ha fémfólia nélkül hosszabb megvilágítási időt vagy magasabb röntgenáramot (mA) alkalmazunk.

Sok IP nagyon érzékeny az alacsony energiájú szórt és a röntgenfluoreszcens sugárzásra, amit a visszaverődés elleni védelemként használt ólomárnyékolás okoz. Ez a hatás jelentősen hozzájárul az életlenség kialakulásához és az alacsonyabb CNR értékhez, ezért mindenképpen a minimumra kell szorítani. A visszaverődést árnyékoló ólom és az IP között elhelyezett acél- vagy rézfólia képes javítani a képminőséget.

A korszerű kazettás és detektoros berendezések figyelembe veszik ezt a hatást, és úgy vannak kialakítva, hogy ne legyen szükség plusz acél vagy réz árnyékolásra a kazettán kívül.

Mivel az IP-vel érintkező ólomfólia karcokat ejthet az IP-n, amikor óvatlanul távolítják el a letapogatási folyamat előtt, a szórt sugárzás köztes szűrésére szolgáló ólomfóliát a kazettán kívül célszerű alkalmazni. Az acélból készült, 12 mm-nél kisebb vastagságú tárgyak vizsgálatához a köztes szűrés nem ajánlott.

A különböző sugárforrásokhoz használható fémfóliák ajánlott anyagát és vastagságát a szabvány 3. és 4. táblázata ismerteti.

Attól függően, hogy sikerült-e elérni a szükséges képminőséget, a szerződő felek más fóliavastagságok használatában is megállapodhatnak.

A szórt sugárzás hatását minden új vizsgálati elrendezés esetén a detektor mögé helyezett ólomszámmal kell ellenőrizni. Ha az ólomszám képe világos, akkor a felvétel nem használható.



4.1.5 A részfelvételek száma

Ha a központi és a peremsugár között a falvastagság növekedésével kell számolni, akkor az emiatt okozott geometriai leképezési torzítást bizonyos határok között kell tartani.

A 100 százalékos vizsgálathoz szükséges felvételek számát az MSZ EN ISO 17636-2 A mellékletében található A1–A4 diagram ismerteti a különböző felvételi elrendezésekhez. A B vizsgálati osztály esetében az A1 (egyfalú, kívülről befelé) és az A2 (excentrikus és kétfalú felvételek) diagram alapján a falvastagság megengedett növekedése legfeljebb 10 százalék lehet. Az A vizsgálati osztályra az A3 és az A4 diagram vonatkozik, itt a falvastagság növekedése legfeljebb 20 százalékos lehet.

4.2 A HEGESZTÉSI VARRATOK ELTÉRÉSEINEK MINŐSÍTÉSE DIGITÁLIS RADIOGRÁFIAI FELVÉTEL ALAPJÁN

4.2.1 A hegesztési varrat felépítése

A varrat radiográfiai vizsgálatakor nem csak magát a hegesztési varratot, hanem a csatlakozó anyagok területét, azaz a hőhatás zónát – melynek szélessége az anyagvastagságtól és a hegesztési varrat formájától függ – értékeljük a felvételen.





A varrat fajtáját többek között az alábbiak határozzák meg:

- 1. a hegesztési illesztés módja,
- 2. a hézag formája,
- 3. a szerkezeti anyag, valamint
- 4. a hegesztési eljárás.

Nagyjából kilencféle illesztési mód létezik, melyekre itt most nem térünk ki részletesen.

A hézag formájának azért van jelentősége a radiográfiai vizsgálat szempontjából, mert a síkszerű hibák (például kötési hibák) hegesztéstechnikai okokból igen gyakran a varratok éleinél, azaz a heganyag és az alapanyag találkozásánál jelentkeznek. Az átvilágítandó varrat élszögének ismeretében ki-



választható a megfelelő besugárzási irány. A hegesztési varrattal szemben támasztott követelményektől függően adott esetben több felvételt is kell készíteni (mindkét éllel párhuzamosan és azokra merőlegesen).

4.2.2 A hegesztési varratok hibafajtái

A különböző hibafajták először is lehetnek térbeliek és síkszerűek. A térbeli hibák a következők: pórusok, salakok, bezáródott idegen fém stb. A síkszerű hibák a következők lehetnek: repedések és kötési hibák. A síkszerű hibák csoportja fokozott odafigyelést igényel a radiográfiai vizsgálat során, mert ez egy veszélyes hibafajta. Nagyon nehéz kiválasztani az alkalmazandó vizsgálati technikát, mert minél kisebb a repedés vagy a kötési hiba résszélessége, annál pontosabban kell tudni a hiba kiterjedésének irányába sugározni. Már egy 5°-os eltérés is azt eredményezheti, hogy a felvételen nem látszik az ilyen jellegű hiba.

4.2.3 MSZ EN ISO 6520-1 szerinti hibacsoportok

Az MSZ EN ISO 6520-1 hat csoportba sorolja a különböző hibafajtákat.

4.2.3.1 Belső jellemzők

(kívülről nem látható hibák)

1. csoport:	100	Repedések, hosszában 101, keresztben 102
2. csoport:	200	Gázzárványok (pórusok 201, pórusfészkek 2013, salakpórusok 2016)
3. csoport:	300	Szilárd zárványok (salak 301, idegen fémek 304, volfrám 3041)
4. csoport:	400	Kötési hibák (élkötési hiba 4011, gyökkötési hiba 4013,
		nem áthegesztett gyök 402)

4.2.3.2 Külső jellemzők

(kívülről látható hibák)

5. csoport: 500 Beégési barázdák 5011, éleltolódás 507 Gyökbarázdák 5013 Gyökcseppek 5041 Gyökvisszaszívódás 515 Kidomborodó fedőréteg 504 Fedőréteg aláboltosulása 511

6. csoport: Gyújtási helyek 601, hegesztési fröcskölés 602

A kívülről látható hibák – például a beégési vagy gyökbarázdák, melyek az elhelyezkedésük miatt a radiográfiai képen kitakarnák a kötési hibákat – hozzáférhetőségüktől függően adott esetben szemrevételezéses vizsgálattal ismerhetők fel. Ez különösen a 6. csoportba tartozó hibatípusokra igaz.





4.2.4 Hegesztési varratok eltérései a radiográfiai képeken (MSZ EN ISO 6520-1:2008)



4.2.5 Az MSZ EN ISO 5817 (MSZ EN ISO 10042) szerinti értékelés

A roncsolásmentes vizsgálat során a vizsgálónak gyakran nem csak az eltérések felismerése, hanem azok értékelése, azaz a vizsgált tárgy használhatóságának megítélése is a feladata. Ám a szükséges értékeléscsoport alkatrésztől függő meghatározására nincs általános érvényű recept. Az, hogy milyen minőségű hegesztési varratoknak kell lenniük egy adott alkatrészen, sokféle tényezőtől függ, például a tervezési körülményektől, az utána következő eljárásoktól, a felületkezeléstől, az igénybevétel fajtájától, az üzemi körülményektől, a hiba következményeitől, de még gazdaságossági megfontolásoktól is.

A hegesztési varrat szükséges minőségének eldöntését értelemszerűen a tervező, a gyártó és a felhasználó bevonásával, tehát interdiszciplináris módon kell kidolgozni. Mivel a minőségi jellemzőknek a lehető legköltséghatékonyabbnak és kalkulálhatónak kell lenniük, a minőségi követelményeket már a megrendelés előtt, tehát lehetőség szerint az ajánlati szakaszban le kell fektetni. Alapvetően abból kell kiindulni, hogy szinte minden hegesztési varrat szabálytalan, ennek ellenére képvisel egyfajta minőséget. Ha a tervezési, a gyártási vagy az átvételi osztály olyan irányelvet ad egy 2-es szintű vizsgáló kezébe, amely azt írja neki elő, hogy pl. nem szabad túllépni egy bizonyos gyakoriságú és méretű eltérést, akkor ezen irányelv alapján lehetősége van az eltérések besorolására (osztályozására). Az értékelés mindig a hegesztési varrat gyártási minőségére vonatkozik.

Az MSZ EN ISO 5817 szerint a hegesztési varratok esetében három értékelési csoport lehetséges az igénybevételtől függően:

- D értékelési csoport: alacsony igénybevétel,
- C értékelési csoport: közepes igénybevétel,
- B értékelési csoport: magas igénybevétel.

Ezekhez az értékelési csoportokhoz különböző eltérési határok (az eltérés méretét meghatározó határértékek) tartoznak, melyek a B-től a D csoport felé haladva egyre tágabbak. A szabvány mindhárom minőségi szint jellemzőit definiálja. Nehéz értelmezni a szabványt, ha a hegesztési varrat egy adott pontjánál különböző eltérések csoportosulnak, mivel ilyenkor már nem érvényesek az egyes eltérések értékelésére vonatkozó maximális értékek, ehelyett összesített értékelésnek kell történnie.

A hegesztési varrat külső jellemzőit – amennyiben azok hozzáférhetőek – szemrevételezéses vizsgálattal és mérő idomszerek segítségével végzett mérésekkel kell értékelni.

A belső eltérések értékelésének alternatív lehetőségei a radiográfiai vizsgálat (film vagy digitális radiográfia), a törésfelület értékelése vagy az ultrahangos vizsgálat.

Figyelembe kell venni, hogy az MSZ EN ISO 5817 (MSZ EN ISO 10042) szabványban megadott határértékek olyan tényleges hibaméretek, melyek a roncsolásmentes vizsgálattal csak feltételesen határozhatók meg. Ezért határesetben sokkal nagyobb jelentősége van az eltérés mérete pontos meghatározásának. Ugyanakkor további roncsolásmentes vizsgálati eljárásokat kell lefolytatni.



4.2.6 Az MSZ EN ISO 17635

Az eltérések értékeléséhez először is szükség van azok megtalálására és így egy alapvető technikai ráfordításra. Ez a kimutatandó hibamérettől függő vizsgálati osztályokkal történik. Míg az acélöntvények vizsgálatához általában elegendő az A vizsgálati osztály, addig a hegesztési varratok vizsgálatához már a B vizsgálati osztályra van szükség, amely szigorúbb követelményeket támaszt. Az MSZ EN ISO 17635 az egyik ilyen jellemző szabályzat, amely rávilágít az értékeléscsoport (a varrattal szembeni követelmények) és a vizsgálati osztály, valamint az értékelés közötti összefüggésekre.

Azért, hogy egyértelműen szét lehessen választani az eltérés roncsolásmentes vizsgálattal megjelenített képe és az eltérés tényleges kiterjedése közötti különbségeket, bevezették az MSZ EN ISO 10675 szabványt. Ennek 1. része a vas, 2. része pedig az alumínium hegesztett kötések engedélyezett határait határozza meg.



4.5. ábra. A hegesztési varratokra vonatkozó szabványok áttekintése az MSZ EN ISO 17635 szerint

4.2.7 A hegesztési eltérések osztályozása

Az osztályozás az eltérések meghatározott minőségi szintre való besorolását jelenti (elfogadhatósági csoport). Ez az adott eltérés típusától, méretétől, helyétől és gyakoriságától függ.

Az értékelési csoport meghatározását, amely feltétlenül szükséges az értékeléshez, a tervezés során kell megadni. A különböző eltérések különböző értékelési csoportokkal dokumentálhatók.



A gyakorlatban azonban ez a követelmény általában egy teljes hegesztésre vonatkozik. A roncsolásmentes vizsgálati eljárások különbözőképpen osztályozzák a talált indikációkat. E célból meghatározzák az elfogadhatósági határértékeket.

Értékelési csoport ISO 5817 (Fe) ISO 10042 (Al)	Vizsgálati osztály ISO 17636 szerint	Elfogadhatósági határ ISO 5817 → ISO 10675-1 ISO 10042 → ISO 10675-2
В	В	1
С	В*	2
D	A	3

4.2. táblázat. Az MSZ EN ISO 17635 szabvány kivonata

Kalibrált skálával való összehasonlítással mérhető az eltérés kiterjedése. Ha összeadjuk az egyes eltérések területét, megkapjuk a lefedettségi fokot. Az alábbi táblázatok az ISO 10675-1 és az ISO 10675-2 szerinti repedések, üregek és szilárd zárványok elfogadási határait mutatják.

Ha az eltérés mérete ≤ mint a határérték, akkor úgy tekintjük, hogy elérte az elfogadhatósági határértéket és így az értékelési csoport követelményét.

4.2.8 MSZ EN ISO 10675-1 Elfogadhatósági határértékek, acél, nikkel, titán és ö	ötvözeteik
---	------------

Sz.	DIN EN ISO 6520-1 szerinti eltérések	3. elfogadhatósá- gi határ	2. elfogadhatósá- gi határ ₁₎	1. elfogadhatósá- gi határ _{ı)}
1	Repedések (100)	nem megengedett	nem megengedett	nem megengedett
2	Pórusok és pórusosság (2011, 2012)	d ≤ 0,4 s, max. 5 mm A < 2,5% (5%, többrétegű)	d ≤ 0,3 s, max. 4 mm A < 1,5% (3%, többrétegű) Ref. felület = varrat- szélesség · 100 mm	d ≤ 0,2 s, max. 3 mm A < 1,0% (2%, többrétegű) Ref. felület = varrat- szélesség · 100 mm
3	Pórusfészek (2013)	d _{pórus} ≤ 0,4 s, max. 4 mm A < 16% ³⁾ Ref. felület = varratszélesség · 100 mm	d _{pórus} ≤ 0,3 s, max. 3 mm A < 8 % ³⁾ Ref. felület = varratszélesség · 100 mm	d _{pórus} ≤ 0,2 s, max. 2 mm A < 4 % ³⁾ Ref. felület = varratszélesség · 100 mm


DIGITÁLIS RADIOGRÁFIAI ANYAGVIZSGÁLAT

Sz.	DIN EN ISO 6520-1 szerinti eltérések	3. elfogadhatósá- gi határ	2. elfogadhatósá- gi határ ₁₎	1. elfogadhatósá- gi határ ₁₎
4	Pórussor (2014)	d ≤ 0,4 s,max. 4 mm ₃₎ A < 8 % (16 %, többrétegű) Re. felület = varrat-szélesség · 100 mm	d ≤ 0,3 s,max. 3 mm 3) A < 4 % (8 %, többrétegű) Ref. felület = varrat- szélesség · 100 mm	d ≤ 0,2 s, max. 2 mm 3) A < 2 % (4 %, többrétegű) Ref. felület = varrat- szélesség · 100 mm
5	Gázcsatorna, sa- lakpórusok (2015, 2016)	h ≤ 0,4 s, max. 4 mm Σ I ≤ s (max. 75 mm) ³⁾ Ref. hossz = 100 mm	h ≤ 0,3 s, max. 3 mm Σ I ≤ s (max. 50 mm) ³⁾ Ref. hossz = 100 mm	h ≤ 0,2 s, max. 2 mm Σ I ≤ s (max. 25 mm) ³⁾ Ref. hossz = 100 mm
6	Lunker (202)	h ≤ 0,4 s, max. 4 mm I < 25 mm	nem megengedett	nem megengedett
7	Végkráter lunker (2024)	l ≤ 0,2 s, max. 2 mm	nem megengedett	nem megengedett
8	Szilárd zárványok (301, 302, 303)	h ≤ 0,4 s , max. 4 mm Σ I ≤ s (max. 75 mm) ³⁾ Ref. hossz = 100 mm	h ≤ 0,3 s, max. 3 mm Σ I ≤ s (max. 50 mm) ³⁾ Ref. hossz = 100 mm	h ≤ 0,2 s, max. 2 mm Σ I ≤ s (max. 25 mm) ³⁾ Ref. hossz = 100 mm
9	Szilárd zárványok (304)	l ≤ 0,4 s, max. 4 mm	l ≤ 0,3 s, max. 3 mm)	l ≤ 0,2 s, max. 2 mm)
10	Rézzárványok (3042)	nem megengedett	nem megengedett	nem megengedett
11	Kötési hibák (401)	csak megszakítva és nem a felületig h ≤ 0,4 s, max. 4 mm; l ≤ 25 mm	nem megengedett	nem megengedett
12	Elégtelen áthe- gesztés (402)	h ≤ 0,2 s, max. 2 mm l ≤ 25 mm	nem megengedett	nem megengedett
13	Végkráter repedés (104)	nem megengedett	nem megengedett	nem megengedett
142)	Beégési barázdák (501)	Lágy átmenet szükséges h ≤ 0,2 t; max. 1,0 mm	Lágy átmenet szük-séges h ≤ 0,1 t; max. 0,5 mm	Lágy átmenet szükséges h ≤ 0,05 t; max. 0,5 mm



Sz.	DIN EN ISO 6520-1 szerinti eltérések	3. elfogadhatósá- gi határ	2. elfogadhatósá- gi határ ₁₎	1. elfogadhatósá- gi határ ₁₎
15 ²⁾	Gyökkiemelkedés (504)	Falvastagság 0,5 – 3 mm h ≤ 1 mm + 0,6 b falvastag- ság > 3 mm h ≤ 1 mm + 1,0 b; max. 5,0 mm	Falvastagság 0,5 – 3 mm h ≤ 1 mm + 0,3 b falvastag- ság > 3 mm h ≤ 1 mm + 0,6 b; max. 4,0 mm	Falvastagság 0,5 – 3 mm h \leq 1 mm + 0,1 b falvastag- ság > 3 mm h \leq 1 mm + 0,2 b; max. 3,0 mm
16 ²⁾	Gyújtási hely (601)	megengedett, ha nem károsítja az alapanyagot	nem megengedett	nem megengedett
17 ²⁾	Hegesztési fröcs- kölés (602)	A hegesztési	fröcskölés megenge alapanyagtól függ	dhetősége az

¹⁾ A 3. és 2. megengedhetőségi határnál X is szerepelhet, ami azt jelenti, hogy minden 25 mm-nél nagyobb megjelenített hiba nem elfogadható

²⁾ Felületi eltérések: A megengedhetőségi határok azonosak a szemrevételezéses vizsgálatnál definiáltakkal. Ezek az eltérések általában elfogadhatók vagy nem fogadhatók el a szemrevételezéses vizsgálat során.

³⁾ A szomszédos (egy sorban lévő) eltérésektől való távolságnak nagyobbnak kell lennie a két eltérés közül a kisebbnél.

4.2.9 MSZ EN ISO 10675-2 Elfogadhatósági határértékek, alumínium és ötvözete
--

Sz.	DIN EN ISO 6520-1 szerinti eltérések	3. elfogadhatósági határa)	2. elfogadhatósági határa)	1. elfogadhatósági határ
1	Repedések (100)	nem megengedett	nem megengedett	nem megengedett
2a	Pórusok (2011)	d ≤ 0,4 s; max. 6 mm	d ≤ 0,3 s; max. 5 mm	d ≤ 0,2 s; max. 4 mm
2b 2c 2d 2e	Porózusság (2012) t = 0,5 mm – 3 mm t = > 3 mm – 12 mm t = > 12 mm – 30 mm t = > 30 mm	A ≤ 6 %/100 mm varrathossz · Nb A ≤ 10 %/100 mm varrathossz · Nb A ≤ 15 %/100 mm varrathossz · Nb A ≤ 20 %/100 mm Varrathossz · Nb	A ≤ 2 %/100 mm varrathossz · Nb A ≤ 4 %/100 mm varrathossz · Nb A ≤ 6 %/100 mm var- rathossz · Nb A ≤ 8 %/100 mm varrathossz · Nb	$A \le 1 \%/100 \text{ mm}$ varrathossz · Nb $A \le 2 \%/100 \text{ mm}$ varrathossz · Nb $A \le 3 \%/100 \text{ mm}$ varrathossz · Nb $A \le 4 \%/100 \text{ mm}$ Varrathossz · Nb
3b)	Pórusfészek (2013)	d _A ≤ 25 mm (max. varratszélesség)	d _A ≤ 20 mm (max. varratszélesség)	d _₄ ≤ 15 mm (max. 1/2 varratszélesség)
4b)	Pórussor (2014)	l ≤ 25 mm ref. hossz = 100 mm	nem megengedett	nem megengedett
5b)	Gázcsatorna, salak- pórusok (2015, 2016)	l ≤ 0,4 s; max. 6 mm	l ≤ 0,3 s; max. 4 mm	l ≤ 0,2 s; max. 3 mm



DIGITÁLIS RADIOGRÁFIAI ANYAGVIZSGÁLAT

Sz.	DIN EN ISO 6520-1 szerinti eltérések	3. elfogadhatósági határa)	2. elfogadhatósági határa)	1. elfogadhatósági határ							
6	Oxidzárvány (303)	l ≤ s; max. 10 mm	l ≤ 0,5 s; max. 5 mm	l ≤ 0,2 s; max. 3 mm							
7	Volfrámzárványok (3041)	l ≤ 0,4 s; max. 6 mm	l ≤ 0,3 s; max. 4 mm	l ≤ 0,2 s; max. 2 mm							
8c)	Kötési hibák (401)	csak megszakítva és nem a felületig h ≤ 0,4 s; max. 4 mm, l ≤ 25 mm	nem megengedett	nem megengedett							
9c)	Elégtelen áthegesz- tés (402)	l ≤ 25 mm ref. hossz = 100 mm	Megengedett, feltéve ha mindkét oldal hegesztett és nem a felületig I ≤ 25 mm	nem megengedett							
10	Végkráter repedés (104)	nem megengedett	nem megengedett	nem megengedett							
11a	Átmenő beégési barázdák (5011)	Lágy átmenet szük- séges h ≤ 0,2 t; max. 1,0 mm	Lágy átmenet szük- séges h ≤ 0,1 t; max. 0,5 mm	nem megengedett							
11b	Megszakított beégési barázdák (5012)	Lágy átmenet szük- séges	Lágy átmenet szük- séges h ≤ 0,1 t; max. 0,5 mm	Lágy átmenet szükséges h ≤ 0,05 t; max. 0,5 mm							
12	Gyökkiemelkedés (504)	h ≤ 5,0 mm	h ≤ 4,0 mm	h ≤ 3,0 mm							
13	Gyökvisszaszívódás (515)	h ≤ 0,2 t; max. 1,5 mm I ≤ 25 mm	h ≤ 0,1 t; max. 1,0 mm I ≤ 25 mm	h ≤ 0,05 t; max. 0,5 mm I ≤ 25 mm							
14	14Gyökbarázdák $h \le 0,2 \text{ t}; \text{ max. } 1,5$ $\text{mm I} \le 25 \text{ mm}$ $h \le 0,1 \text{ t}; \text{ max. } 1,0$ $\text{mm I} \le 25 \text{ mm}$ $h \le 0,05 \text{ t}; \text{ max. } 0,5$ $\text{mm I} \le 25 \text{ mm}$										
 a. A 3. és 2. megengedhetőségi határnál X is szerepelhet, ami azt jelenti, hogy minden 25 mm-nél nagyobb megjelenített hiba nem elfogadható b. A szomszédos eltérésektől való távolságnak nagyobbnak kell lennie a két eltérés közül a kisebbnél. 											



4.2.10 Kiértékelési jegyzőkönyv

Charlen Charlen Charlen and Charlen Ch					20.000 110				A 1714 A 1714																		
Varrat- szakasz	101	102	103	104	2011	2012	2013	2014	2015	2016	301	3011	304	3041	401	4011	4013	402	5012	5013	507	511	515	517	További	kategóriasz	Osztályozá
101 Ke 102 Cs 103 Vé 104 Re 105 Ela 106	reszt illagf gkrát pedé ágazó	repec rep ter re shaln repe	lés edés pedé nozó edés	2/ 2/ s 2/ dás2/ 2/	012 I 013 I 014 I 015 0 02 L	Poróz Pórus Pórus Gáze: 2 unke:	stészo ssor sator 2016 r	g ek na Salal	3011 304] 3041 3041 V-va	Sala Bez. Vol Is rrat	aksor Id. fe frám D-V 402	ém zárv. 7-var 1 Ele	40 40 40 rat	11 Él 13 Gy 2 Elé en áth	kötés yökk gtele 50 1eg.	si h. ötési n áth 41 C	5 h. 5 ieg.5 iyöka 5	013 (02 K 04 G csepp 07 Él	Gyök idom yökk ettol	bará: b. va ieme 501 C ódás	zda urrat elk. Əyújt	515 517 ási h 602	Gyök Megl elyek Heg.	cvissz közelí fröcs	aszív tési l kölés	7. niba s	
Értéke	elés	al	арј	а				Kö	vet	elr	né	ny					Te (r	elje nt)	sít	i (t	:) /	ne	em	telj	esi	íti	

Megjegyzések:

4.3 ÖNTVÉNYEK ELTÉRÉSEINEK ÉRTÉKELÉSE

4.3.1 Öntési hibák

Öntési hibák nagyjából az alábbi két csoportba sorolhatók:

4.3.1.1 Külső öntési hibák

- alakeltérések,
- varasodás,
- beégett formázóanyag,
- porózus felület,
- felületi repedések.

Az ebbe a csoportba tartozó hibák mindegyike kiválóan megállapítható szemrevételezéses vizsgálattal.



4.3.1.2 Belső öntési hibák

- gázzárványok, pórusok,
- nemfémes zárványok, például salak, homok, oxidok,
- lunker: különféle fajta zsugorodási üregek,
- hidegrepedés: a dermedés után,
- melegrepedés: kristályközi, a dermedés közben,
- magtámaszok,
- dúsulások: az ötvözőanyagok szétválási jelenségei.

Az öntési hibák hegesztési varratok hibáihoz hasonló besorolása az ASTM öntésihiba-katalógusban található. Ez jelenti az öntési hibák osztályozásának (fajta, méret és gyakoriság szerinti besorolás) alapját is.

4.3.2 A hibák keletkezését befolyásoló tényezők

Itt ismertetjük az eljárás fontosabb jellemzőit és a hiba keletkezésére gyakorolt hatásukat.

4.3.2.1 Légtelenítő rendszer, gázok és porózusság

Az öntvény porózusságának különböző okai lehetnek, többek között az olvadékban a magas hőmérséklet hatására nagyobb mennyiségben oldott gázok, ill. levegő, plusz gázfelvétel az öntési folyamat közben (turbulens áramlás, a leválasztóanyag párolgása, elégtelen légtelenítés).

Az olvadt fém a nyomókamrába jut, amelynek illeszkednie kell a fém térfogatához, hogy a lehető legkevesebb gázt vigye magával az öntőformába.

Első lépésként a présdugattyú az öntőjáraton és a bevágáson keresztül lassan és egyenletesen a formába préseli a fémet. Ennek során a levegőnek távoznia kell a forma üregén keresztül. A második lépésben a betöltés nagy sebességgel, az utánsűrítés pedig nagy nyomással történik.

Légtelenítési lehetőségként a formaosztásban kialakított légtelenítő csatornák, az illesztési felületeken keresztüli légtelenítés, ill. a hézagok kihasználása jöhet szóba.

Az olvadékba bezárt levegő turbulens áramlásának levezetésére ún. túlfolyókat ("légzsákokat") alkalmaznak az olvadék által utolsóként kitöltött részeken, ezek külső légtelenítő csatornákkal vannak összekapcsolva.

A légtelenítő csatornákat szabadon kell tartani, például minden egyes öntés után ki kell fúvatni. Kerülni kell, hogy a leválasztóanyag vagy az idő előtt megdermedt olvadék elzárja ezeket a járatokat.

A gázzárványok kiküszöbölésére irányuló, speciális intézkedésként az öntőforma evakuálását, valamint oxigénnel való átmosását említhetjük meg. Az így gyártott munkadarabok porózussága csekély, ezért hegeszthetők és hőkezelhetők (nincs hólyagképződés), ráadásul a felületi kinézetük is jobb.



4.3.2.2 Hőháztartás a formában

A forma és az olvadék célirányos hővezetésének meghatározó szerepe van az öntvény minősége szempontjából.

Különösen bonyolult, erőteljes keresztmetszet-változásokat tartalmazó geometriák esetében lehet szükség arra, hogy a forma bizonyos részeit hűteni, míg más részeket adott körülmények között melegíteni kell.

Gondoskodni kell arról, hogy a munkadarab a ciklusidő alatt egyenletesen hűljön le az olvadási hőmérsékletről a kidobási hőmérsékletre, ami a forma állandó üzemi hőmérsékletével érhető el. Ha a formahőmérséklet túl alacsony, annak az alábbiak lehetnek a következményei:

- repedések a formában túl magas hőmérsékleti gradiensek miatt, az öntvényen érhálózatként jelentkeznek,
- hiányos formakitöltés, azaz az öntés megszakadása, ill. hideghegesztés,
- a formakibontás akadályoztatása a munkadarab magra történő rázsugorodása, melegtörés miatt.

Ha a formahőmérséklet túl magas, annak az alábbiak lehetnek a következményei:

- fokozott hólyagosodás,
- leválasztóanyag párolgása,
- a munkadarabok ragadásra való hajlamosságának növekedése,
- a munkadarabok alakváltozása túl magas hőmérsékleten való kidobáskor.

4.3.2.3 Az öntőforma igénybevétele

A forma nagyon erős hőmérsékleti igénybevételnek és a fém sebessége miatt nagyfokú eróziónak van kitéve.

Ez különösen az illesztési zónákat, valamint az éles peremeket és sarkokat érinti. Ezáltal a forma ezen részein ún. égési repedések és kinövések jönnek létre, amelyek érhálózatként és érdességként jelentkeznek az öntvényen. Ezenkívül fokozódik az odaragadásra való hajlam ("ráforradás").

Ezeket a jelenségeket többek között bevágás kialakításával próbálják meg kiküszöbölni, melynek célja, hogy egyenletes legyen a formakitöltés, és ne keletkezzenek a leválasztófilmet zavaró turbulenciák.

További intézkedések:

- kopásálló felületi bevonatok felvitele a formára,
- módosított leválasztóanyag,
- elővigyázatos munkavégzés a forma sérülésének elkerülésére,
- öntőfém adalékok (pl. Al-ötvözetek esetén Fe) hozzáadása,
- a forma időközi feszültségcsökkentése hőkezeléssel.





4.3.3 Öntvények eltérései a pozitív radiográfiai felvételeken

4.3.4 Szabályzat szerinti értékelés

A vizsgált tárgyakon emberi szemmel érzékelt hibákat sok esetben értékelésnek és osztályozásnak is alá kell vetni. Ehhez rendszerint az értékelés menetét előíró referenciákat használnak. Alumíniumöntvények esetében ez az amerikai ASTM E155 szabvány.

4.3.4.1 Az ASTM E155

Az ASTM az amerikai szabványügyi szervezet, amely eljárásokra és folyamatokra vonatkozó irányelveket és szabályokat dolgoz ki, például az NDT-re vonatkozóan is (E07 csoport). Az E155 jelű irányelv a '60-as évekből származik, és a következőket kell tudni róla:

- Nyolc hibaosztályt határoz meg az alumínium, valamint hat hibaosztályt a magnézium öntvényekre.
- Egyenként nyolc szintre bontja a hibaosztályokat, ezekből a Level 1 (1. szint) a legszigorúbb.
- Az egyes hibák szintekbe való besorolása számos szakértő filmfelvételek alapján alkotott véleménye szerint történt.
- A szabvány 1/4"-os és 3/4"-os vastagságra vonatkozik (az 1/2"-os méretig az 1/4"-os, a felett pedig a 3/4"-os méret érvényes; 1 col = 25,4 mm).



Az ASTM 13x8 2"x2" méretű filmfelvételekből összeállított készletet árul, melyek fizikai referenciaként használhatók. Magukat a lemezeket a Parker cég őrzi a Connecticut állambeli Hartfordban. ASTM E155 referencialemezek. Filmről készült kép (pozitív).

4.6. ábra. Hibaosztályozás az E155 szerint



Az újabb számítógépes programok már úgy készülnek, hogy képesek legyenek a referenciaképek megjelenítésére is. A méret vagy a szürkeskála módosítását a referenciaképre is alkalmazzák, így a vizsgáló könnyebben láthatja, mi hová tartozik.

4.4 CSÖVEK MSZ EN ISO 20769-1 SZERINTI KORRÓZIÓVIZSGÁLATA

4.4.1 Szigetelt és nem szigetelt csővezetékek károsodásai

Használat közben a csővezetékek a bennük áramló közeg okozta igénybevétel vagy külső korrózió – időjárás okozta korrózió vagy a bilincseknél és a tartóknál jelentkező kontaktkorrózió – miatt idővel károsodhatnak. A csőhidakon lévő csővezetékeknél jelentkező kártípusok a következőképpen foglalhatók össze:

4.7. ábra. Korróziós károk csövekben





4.4.1.1 Belső korrózió

- üzemi körülmények között jelentkező korrózió,
- a közegben lévő szilárd anyagok miatti erózió,
- mechanikus erőhatások miatt bekövetkező károsodások.

4.8. ábra. Korrozív lerakódások a cső belsejében



4.9. ábra. Korrózió a cső belsejében (pitting, gödrösödés)



4.10. ábra. Eróziós károk





4.4.1.2 Külső korrózió

- időjárás okozta korrózió (nedvesség a szigetelés alatt),
- kontaktkorrózió a bilincseknél,
- erózió az alátámasztási pontokon.

4.4.1.3 Mechanikai károsodás

- külső erőhatások, például a tágulás akadályoztatása,
- gyorselzáráskor jelentkező nyomáslökések,
- kifáradási törések rezgésre hajlamos vezetékszakaszoknál,
- hibás kezelés, például "felmászási károk",
- mechanikus erőhatások, súrlódási pontok miatt bekövetkező károsodások.

A közegtől, az üzemi adatoktól és a cső szerkezeti anyagától függően a korrózió számos különböző formában jelentkezhet, például egyenletes kopás, vájat- és lyukszerű korrózió vagy különleges esetekben repedésképződés. A szigetelt csővezetékeknél a cső külső felületén is keletkezhet korrózió, ha nedvesség kerül a szigetelés alá.

A nyomástartó edényekre vonatkozó rendelet értelmében a csővezetékeken rendszeres időközönként (szakértői hatáskörbe tartozó csöveknél minimum 5 évente, szakemberi hatáskörbe tartozó csöveknél pedig az üzemi tapasztalatok alapján meghatározott időközönként) külső tényleges állapotfelmérést és ezzel együtt nyomáspróbát kell végezni.



4.11. ábra. Roncsolásmentes vizsgálat alkalmazása csövek vizsgálatakor



A külső tényleges állapotfelmérés végrehajtása általában problémamentes, ezzel szemben a nyomáspróba alkalmanként problémás lehet. Ilyen esetekben a nyomásellenőrzés roncsolásmentes vizsgálatokkal támogatható.

- szemrevételezéses vizsgálat ultrahangos falvastagságméréssel az állapot leírásához,
- egyenletes felületi kopás kimutatása ultrahangos falvastagságméréssel,
- vájatszerű vagy lyukkorrózió okozta egyenetlen felületi kopás kimutatása ultrahangos falvastagságméréssel; sűrűn elhelyezkedő mérési pontok esetében is véletlenszerű,
- érintőleges radiográfiai ellenőrzés (árnyékfelvétel) útján nyert eredmények.

4.4.2 A vetítéses radiográfiai (tangenciális technika)

A vetítéses radiográfiáról ún. on-stream vizsgálatként beszélhetünk. A folyadékkal teli, 100 mm-nél nagyobb névleges átmérőjű csővezetékeknél már nem elhanyagolható a közeg gyengítő hatása, ezért vizsgálat előtt a csövet le kell üríteni. A csővezetéken lévő szigetelést nem kell eltávolítani.



4.12. ábra. A vetítéses radiográfia működési elve

A 4.12. ábrán a projekciós radiográfia működési elve látható. A csővezetéktől megfelelő távolságra elhelyezünk egy sugárforrást (pl. Ir192-t). Átvilágításkor a csővezeték mögött síkban elhelyezett detek-



toron jön létre az érintett csőszakasz ún. árnyékképe, amelyből mind az oldalirányba kivetülő falvastagság, mind pedig a köpenyfelület állapota értékelhető.

A 4.13. ábrán egy jellemző radiográfiai szituáció látható. Gyakran előfordul, hogy nehezen lehet hozzáférni a kívánt mérési területhez. Ez azt jelenti, hogy már maguknak a képminőségjelzőknek a felhelyezése is rendkívül nehezen oldható meg. Ennek ellenére be kell tartani a felvételi feltételeket – például az SDD-, PDD-távolságot, a detektor és a sugárforrás egymáshoz viszonyított irányát, valamint a besugárzási pozíciót –, és mindent rögzíteni kell a jegyzőkönyvben.

4.13. ábra. Tangenciális felvétel készítése egy csőrendszeren



4.4.3 MSZ EN ISO20769-1 szerinti érintőleges (tangenciális) felvétel készítése

4.4.3.1 Vizsgálati osztályok

A tangenciális radiográfiai technikák az alábbi két kategóriába sorolhatók:

- TA-alaptechnika.
- TB-továbbfejlesztett vizsgálati technika.

A TA-alaptechnikák a például erózió vagy markáns korrózió miatti általános falvastagság-csökkenés kimutatására szolgáló tangenciális radiográfiai eljárások.

A TB-továbbfejlesztett vizsgálati technikák aprólékosabb tangenciális radiográfiára, például helyi korróziós vájatok megtalálására használhatók.

4.4.3.2 A felvételi elrendezés kiválasztása

A felvételi elrendezés kiválasztásához négy jellemző helyzet választható:







Bármelyik technikát is választjuk, a filmet vagy a digitális detektort a csőhöz a lehető legközelebb kell elhelyezni.

4.4.3.3 A sugárforrás kiválasztása

A sugárforrás kiválasztása az átvilágított anyagtól és a vizsgálati tartományban a maximális falvastagságtól, azaz a csőárnyékon megjelenő falvastagságtól függ. Fontos, hogy az energiának megfelelően nagynak kell lennie ahhoz, hogy képes legyen áthatolni a wmax-vastagságon.





Ahhoz, hogy ki lehessen választani a csőhöz megfelelő sugárforrás(oka)t, először meg kell határoznunk a cső legnagyobb átsugárzott vastagságát, a wmax-vastagságot, amit azután összes kell ha-



sonlítani a *4.3. táblázatban* megadott értékekkel. A *4.3. táblázat* a különböző sugárforrások legnagyobb átsugárzott vastagsághoz tartozó, ajánlott határértékeit tartalmazza.

Mivel ezek a határértékek alapvetően a filmes radiográfiára érvényesek és a digitális detektorok a legtöbb esetben nagyobb dinamikájúak, kissé nagyobb falvastagságok is alkalmazhatók.

4.3. táblázat: A wmax legnagyobb átsugárzott vastagsághoz ajánlott határértékek (mm-ben)

Sugárforrás	w _{max} TA alaptechnika, egyenletes falvastagság csökkenés	W _{max} TB továbbfejlesztett vizsgálati technika korróziós vájatok esetén
Röntgensugár (100 kV)	≤ 10	≤ 7
Röntgensugár (200 kV)	≤ 30	≤ 20
Röntgensugár (300 kV)	≤ 40	≤ 30
Röntgensugár (400 kV)	≤ 50	≤ 35
Se ₇₅	≤ 55	≤ 40
Ir ₁₉₂	≤ 80	≤ 60
Co ₆₀	≤ 120	≤ 85

A hőszigetelések egyes fajtái (például a nagyobb elnyelőképességűek) a wmax legnagyobb átsugárzott vastagság-csökkenését okozhatják.

A szerződő felek a fentiektől eltérő értékekben is megállapodhatnak, amennyiben a belső átmérő helyzete a radiográfiai képen megfelelő pontossággal mérhető.

4.4.3.4 A digitális detektor kiválasztása

A digitális detektor kiválasztásánál elsősorban annak alapvető térbeli felbontása a fontos. Ezért először is figyelembe kell venni a képminőségre vonatkozó követelményeket.

4.4. táblázat. A képminőségre vonatkozó határértékek

	S	R _b	GW _{max} su	szabad gár	SNR _N sza SR _b ^{det}	bad sugár ^{ektor} -ral	SNRN csőközép SR _b ^{detektor} -ral		
	TA	ТВ	TA	ТВ	TA	ТВ	TA	ТВ	
CR-fólia (IP)	100	μm	90 % digitalizálási mélység		≥ 70	≥ 100	≥ 50	≥ 80	



Mátrix- detektor 200 (DDA)	m 130 µm	90 % digitalizálási mélység	≥70	≥ 100	≥ 50	≥ 80
----------------------------------	----------	--------------------------------	-----	-------	------	------

A mátrixdetektor alap térbeli felbontásának és a nagyításnak (M = SDD/SPD) a hányadosa a TA kategóriában nem lehet nagyobb 200 µm-nél, a TB kategóriában pedig 130 µm-nél. A térbeli felbontás nem lehet nagyobb a t névleges falvastagság 5 százalékánál.

Képtároló lemez alkalmazása esetén a szkenner pixelmérete nem lehet nagyobb 100 µm-nél. Bizonyos radiográfiai átvilágításnál a nagyítás, a nyereség vagy a CR-szkenner érzékenysége magasabb szürkeértékeket eredményez, ami azonban elhanyagolható mértékben befolyásolja a képminőséget.

Mivel még a TB vizsgálati kategória sem támaszt olyan extrém szigorú követelményeket, mint az MSZ EN ISO 17636-2 a hegesztési varratok vizsgálatakor, a felvétel a gyors, normál IP-fóliával vagy normál DDA-kkal is készülhet.

4.4.3.5 -Detektor-fémfólia kombináció

Fémből készült előtétfóliák alkalmazása esetén jó érintkezésre van szükség az érzékeny detektorréteg és a fólia között. Az IP-vel nem szorosan érintkező ólomfólia életlen képet eredményezhet. Az ólomfóliával érintkező képtároló lemezek alkalmazásával nyert erősítés észrevehetően kisebb, mint a filmeknél. Az ólomfólia és az IP érzékeny rétege közötti védőréteg jelentősen csökkenti az elektronok erősítő hatását, ezért az csak magasabb energiák mellett jelentkezik. A sugárzás energiájától és a védőréteg kivitelétől függően ez az erősítő hatás mindössze 1,2 és 2 között mozog.

4.4.3.6 Szűrők és blendék

A szórt sugárzás hatásának csökkentéséhez a közvetlen sugárzást a lehető legnagyobb mértékben a vizsgálati szakaszra kell korlátozni blendék, kollimátorok alkalmazásával.

Köztes szűrők:

A képtároló lemezes és DDA-s radiográfiában Ir192, Co60 és más MeV-os sugárforrások használata esetén a cső és a DDA vagy a CR-kazetta közé helyezett plusz ólomárnyékoló használható az alacsony energiájú szórt sugárzás kiszűrésére. Az árnyékoló vastagsága az átvilágított vastagság függvényében 0,5 mm és 2 mm között lehet.

Az ólmon kívül más anyagok – pl. ón, vörösréz, volfrám vagy acél – is szóba jöhetnek szűrőként. Ólomszűrők esetén az ólomszűrő és a detektor közé egy acélból vagy vörösrézből készült, 0,3 mm – 1,0 mm vastag plusz szűrőt ajánlott használni. A szűrőt a képtároló lemezhez a lehető legközelebb érdemes elhelyezni.



4.4.3.7 A visszaverődés elkerülése

A visszaverődés hatását minden új felvételi elrendezésnél ellenőrizni kell egy közvetlenül a CRkazetta vagy a DDA mögé helyezett, ólomból készült "B" betűvel (legalább 10 mm magas és legalább 1,5 mm vastag legyen). Ha a betű megjelenik a képen, akkor a felvétel nem használható.

4.4.3.8 A sugárforrás és a detektor távolsága

A sugárforrás és a detektor minimális távolsága (SDD) függ a sugárforrás d méretétől, a cső De külső átmérőjétől, valamint a csőtengely és a detektor távolságától (PDD).

Az olyan tangenciális átvilágításnál, ahol a sugárforrás egy magasságban van a csőtengellyel, a sugárforrás és a csőtengely távolságának (SDD) – amennyiben kivitelezhető – meg kell egyeznie az alábbi értékekkel:



4.16. ábra. Sugárforrás – detektortávolság

Annál a tangenciális átvilágításnál, ahol a sugárforrás magassága nem esik egybe a csőtengellyel (c) és d) felvételi elrendezés) a TA alapvető technika esetében a 2. egyenletet kell használni a minimális SDD meghatározásához.

4.4.3.9 Az axiális érzékelési tartomány és az átfedések

A csövek radiográfiai vizsgálatakor a felvétel legnagyobb axiális érzékelési tartományának alapja a vizsgált tartomány átsugárzott vastagságának 20 százalékos növekedése.



Az egyes filmeknek vagy digitális képeknek megfelelő átfedéssel kell garantálniuk, hogy az alkatrész minden területe vizsgálható legyen. Egyéb kikötés hiányában a sugárforrás oldalán mért minimális axiális átfedés a vizsgált tartomány mindkét oldalán 25 mm legyen.





Az L_p egyenlete a cső átvilágítási intervallumainak meghatározására használható. Ha a gammasugárforrás blendéje vagy a röntgensugárforrás ablakblendéje kisebb, mint ± 35°, akkor az L_p és az L_d értékét a sugárforrás sugárkúpjának megengedett maximális nyílásszögével kell csökkenteni.

4.4.3.10 Méretkomparátorok

A maradék falvastagság digitális képfeldolgozással történő méréséhez – a sugárforrás, a cső és a detektor geometriai elrendezéséből adódó geometriai nagyítás korrekciójához – kalibrálni kell a képfeldolgozó rendszert.

Erre egy komparátort használnak, amely a sugárzás számára áthatolhatatlan, ismert méretű tárgy (általában ólomgolyó), melyet szorosan a csőre helyeznek a csőfal érintőjével azonos síkban.



4.18. ábra. A komparátor elhelyezése



Ha mégsem lehet a komparátort a cső érintőjének közvetlen közelében elhelyezni (például mert hőszigetelt a cső külső fala), akkor a sugárforrást a csőfallal egy vonalban ajánlott elhelyezni.



4.19. ábra. A komparátor elhelyezése szigetelt csővezetékek esetében

4.4.3.11 A képminőség kiértékelése

A tangenciális radiográfiához nem alkalmazhatók közvetlenül a szokásos huzalos képminőségjelzők, mert nem helyezhetők el közvetlenül a tangenciális csőpozícióban. Az átvilágított vastagság gyors változása a radiográfiai kép ezen részén teljességgel kizárja a képminőségjelző felismerhetőségének értékelését.

Azonban hasonló eredmények eléréséhez a következő eljárás alkalmazásával kell elvégezni a képminőség értékelését.

Maximális szürkeérték a szabad sugárban

A megvilágítási időt és/vagy a rendszer érzékenységét úgy kell beállítani, hogy a csőfalon kívüli, zavartalan sugár ne lépje túl a képalkotó rendszer telítettségének 90 százalékát.

Legkisebb normalizált jel-zaj viszony

Ha nem optimálisak a vizsgálati feltételek, akkor a digitális radiográfiai képek "zajosak" lesznek (például a rövid megvilágítási idő miatt). A túl nagy arányú képzaj jelentősen akadályozhatja az elfogadható kimutathatósági érzékenységű mérések elvégzését.

Ahhoz, hogy elfogadható legyen a CR- és DDA-rendszerrel létrehozott képek zajszintje, az SNRN normalizált jel-zaj viszonyt megfelelő szoftverrel és eljárással egy legalább 20x55 pixel méretű ablakban kell mérni. A középértéket legalább négy, különböző helyeken mért SNRN-érték alapján kell meghatá-rozni.

A normalizált SNRN-érték meghatározásához meg kell mérni a képalkotó rendszer SRb alap térbeli felbontását a kéthuzalos képminőségjelző segítségével. A detektor alap térbeli felbontásának méréséhez a kéthuzalos képminőségjelzőt közvetlenül a képtároló lemezre vagy a DDA-ra kell helyezni.



Ha nem minden besugárzásnál lehet elhelyezni a kéthuzalos képminőségjelzőt, akkor az alap térbeli felbontás előre is meghatározható ugyanarra a képalkotó rendszerre vonatkozóan, amennyiben pontosan azonos rendszerbeállításokat alkalmazunk.

Ez a CR-rendszer esetében a következőket jelenti:

Ugyanazon CR-szkenner, ugyanazon képtároló lemez, ugyanazon pixelméret, ugyanazon letapogatási sebesség és ugyanazon lézerintenzitás használata.

A csövön kívüli, nem telített, szabad sugárral meghatározott, átlagos SNRN-értéknek a TA osztály esetén el kell érnie legalább a 70, a TB osztály esetén pedig legalább a 100 értéket.

Ha az SNRN-érték méréséhez rendelkezésre áll a cső középvonala, akkor a minimális SNRN-érték a TA osztály esetén legalább 50, a TB osztály esetében pedig legalább 80 legyen.

Vegyük figyelembe, hogy az SNRN minden méréséhez a képnek olyan formában kell rendelkezésre állnia, hogy a kép szürkeértékei egyenesen arányosak legyenek a sugárzás intenzitásával, ellenkező esetben nem lehet pontosan meghatározni az SNRN értékét.

4.4.4 Falvastagság mérése digitális radiográfiai felvételeken

4.4.4.1 Egyszerű, interaktív mérések a képernyőn

Alapvető feltétel egy olyan szoftveres opció megléte, amely lehetővé teszi, hogy a méreteket interaktív módon, a képernyőn megjelenő digitális képen a kurzorral lehessen elvégezni. Ebben az esetben a vizsgáló vizuálisan ellenőrzi a csőfal leképezett belső és külső szélének mindenkori pozícióját.

Ennél az eljárásnál szignifikáns hibák fordulhatnak elő, mivel a látható falvastagság a kép megjelenítésére használt kontraszt- és fényerőbeállítástól függ. Ezek a hibák annál nagyobbak, minél jobban megközelíti a wmax átsugárzott vastagság a használt sugárforráshoz ajánlott maximális falvastagságot.

4.4.4.2 Interaktív vizsgálat a szürkeárnyalat-profil kiértékelésével

A falvastagság meghatározására szolgáló automatikus programok alternatívájaként a vizsgáló interaktív eszközöket is használhat a szürkeértékprofil kiértékelésére. Nagyobb wmax értékű csövek esetében javítható a pontosság, ha a digitális képek logaritmikus érzékenységet mutatnak és felüláteresztő szűrővel vannak ellátva.

A 4.20 ábrán a falvastagság interaktív mérésére láthatunk példát: a mérés a csőfalra merőlegesen létrehozott szürkeértékprofilon, kurzorok segítségével történik úgy, hogy a CR-képen logaritmikus értéktáblázatot és a részletesség javítására felüláteresztő szűrőt alkalmazunk. A külső átmérő pozíciója megfelel egy egyértelmű profilcsúcsnak, míg a belső átmérő pozícióját a minimum és a profilgradiens határozott változása jelzi.



Ez az eljárás a kép vizuális értékelésével kombinálva egyes esetekben jobb mérésbiztonságot képes nyújtani, mint az automatikus programok segítségével végzett kiértékelés.

A mérési eljárások pontossága annál jobban csökken, minél közelebb van a tangenciálisan átvilágított wmax vastagság a használt radioizotóphoz ajánlott maximális értékhez. A hiányzó kontraszt és a megnövekedett zaj miatt ugyanis egyre nehezebben lehet pontosan meghatározni a belső fal helyzetét.





4.4.4.3 Automatikus programok

A mért falvastagság értékének megbízhatósága automatikus kiértékelő programokkal növelhető, amennyiben a legnagyobb tangenciálisan átvilágított wmax vastagság nem közelíti meg a használt sugárforrás esetében lehetséges maximális vastagságot. Ezeknek az automatikus programoknak a pontosságát egyéb tényezők is befolyásolják, például külső reve, korróziós termékek vagy egyenetlen belső/külső korrózió jelenléte.

llyen esetekben bizonytalanság lép fel az automatikus programokoknál, ezért a vizsgálónak ellenőriznie kell, hogy a meghatározott értékek összhangban vannak-e az intenzitásprofillal és a digitális radiográfiai képpel.

4.4.4.4 Vizsgálati jegyzőkönyv

Minden csőszakaszhoz külön vizsgálati jegyzőkönyvet kell készíteni. Fontos, hogy mindig pontosan feltüntessük benne a felvétel készítésének paramétereit.



DIGITÁLIS RADIOGRÁFIAI ANYAGVIZSGÁLAT

Vizsgálat tárgya:	Anyag:	Vizsgálati előírások: Vizsgálati osztály:						
Méretek: De = t _{előírt} = mm	mm		w _{max} : feltöltve/közeg: ige	n 🗆 nem 🗆 /				
Felvételi elrendez	zés	🗆 1a 🗆]1b □2a □2b					
Komparátor		🗆 igen	□ nem	típus, Ø				
Felvétel jelölése								
Fájl: név/formátu	m/mentés helye							
Sugárforrás								
Fókuszpont mére	te d [mm]							
			🗆 CR-fólia					
Detektor megnev	ezése							
Méretek	Pixel area							
CR-szkenner	Frame time							
Szkennelési mód	Integráció							
Gw-felbontás	Gain							
SR _b Detektor								
Csőfeszültség								
Csőáram [mA]/A	[GBq]							
Megvilágítási idő	[min]							
Előszűrő/köztes s	zűrő							
Előtét-/mögéhely vastagság/anyag	ezett fólia							
Kiértékelhető hos	ssz L _P /felv.							
PDD	SDD _{min}							
SDDválasztott								
1)SNR _N = SNR \cdot 8	$88,6 \ \mu m/SR_b^{Detektor}$	megköv	etelt	elért				
max. Gw _{szabad} sugá	r							
SNR _N szabad sug	ár SRb ^{Detektor} -ral							
SNR _N csőközép S	SRb ^{Detektor} -ral							
t _{meas}	t _{act}							
telőírt,min								
Megjegyzések:				·				



VIZSGÁLATI KÖRÜLMÉNYEK, KÉPALKOTÓ RENDSZER HARDVER, SZOFTVER

5.1 A FELVÉTEL KIÉRTÉKELŐJÉVEL SZEMBENI FIZIOLÓGIAI KÖVETELMÉNYEK

5

Magának a vizsgáló személynek jó látással kell rendelkeznie (1-es látásélesség).

A látást a többi roncsolásmentes vizsgálati eljárásnál hasonlóan évente ellenőrizni kell. Az érvényes látásteszt az MSZ EN ISO 9712 szerinti 1-es, 2-es vagy 3-as szint megtartásához is szükséges. A látásteszt érvényessége mindig egy év.

Gondolni kell arra, hogy kiértékelés előtt a vizsgáló szemei hozzászokjanak a vizsgálati körülményekhez. Ehhez legalább öt perces adaptálódási időre van szükség.

A kiértékelés maximális időtartama naponta 4 óra lehet, amit rendszeres szünetekkel kell megszakítani, és nem szabad túllépni.

A helyiség világossága a képernyő mögött kb. 30–50 lux legyen. A teljes elsötétítés gyors kifáradáshoz és dekoncentráltsághoz vezetne.

A kiértékelő helyiség (hely) elhelyezkedése ugyancsak nagyban befolyásolja a vizsgáló koncentrálóképességét (például a zajterhelés miatt).

A kiértékelést ülő helyzetben, a monitor síkját lehetőleg merőlegesen szemlélve, a monitor közepén kell elvégezni.

A monitor vakításmentes fényereje megfelelő világítással, valamint a monitor szögének beállításával biztosítható.



5.1. ábra. A monitor dőlésszöge a visszatükröződések okozta elvakítás kiküszöbölésére

A monitor merőleges nézését lehetővé tevő, kényelmes ülőhelyzet a szék helyes magasságának beállításával érhető el. A szem és a monitor közötti távolság ne legyen kisebb 50 cm-nél (50 év felettiek esetében 70 cm-nél).

A tükröződés miatti elvakítás miatt matt felületű monitort érdemes használni. Az oldalirányból beeső nappali fény segít elkerülni a vakító hatást és a kontrasztcsökkenést. A színes képernyőkön legfeljebb öt előtérszínt szabad használni, és kerülni kell a színspektrum határtartományában lévő színek – a piros



és a kék – használatát, mivel a szem itt a legkevésbé érzékeny, és nem képes egyszerre élesen látni ezeket a színeket. JÓ megoldást jelent a fekete-fehér monitorok használata.

Természetesen az is feltétel, hogy a kiértékelőnek rendelkeznie kell egyrészt megfelelő radiográfiai alapismeretekkel, másrészt pedig ismernie kell a digitális képfeldolgozás használatát.

5.2 RADIOGRÁFIAI KÉPEK MEGJELENÍTÉSE

A felhasználó és a számítógép közötti interakció különböző eszközök – például monitor, billentyűzett és egér – segítségével valósul meg. A felhasználó a monitoron keresztül kap visszajelzést a rendszertől a billentyűzettel vagy az egérrel végzett bevitelekre. A modern képfeldolgozó rendszerek esetében ez a monitor szolgál a szerkesztett kép megjelenítésére is. Ez a közös használat lehetővé teszi, hogy mind a megjelenített kép, mind pedig a kezelőelemek a kezelő közvetlen látóterében legyenek. A kezelőelemek általában a képernyő szélén helyezkednek el, hogy minél nagyobb hely álljon rendelkezésre középen a kép számára. A mostanra már elavultnak számító, analóg képcsöves monitorok helyett szinte kizárólag (digitális) TFT-kijelzőket használunk, mert torzításmentes képet, nagyobb kontrasztot és tisztán fekete-fehér monitorként nagyobb fénysűrűséget is adnak. Ráadásul a képerősítős vagy mátrixdetektoros rendszerek esetében a digitalizált és szerkesztett kép mellett még a szerkesztetlen jel (élőkép) is közvetlenül megjeleníthető a monitoron. A legtöbb monitoron 8 biten történik a kép megjelenítése. A 12 vagy 16 bittel felvett képeket a képfeldolgozó rendszer átalakítja a hozzárendelt 8 bites szürkeárnyalatokra (LUT, mapping).

5.2.1 A monitorral szemben támasztott minimális követelmények

A képkiértékelésre használt monitornak az alábbi minimális követelményeket kell teljesítenie:

- a) minimális fényerősség 250 cd/m²;
- b) legalább 256 szürkeárnyalat megjelenítésének képessége;
- c) minimálisan megjeleníthető fényintenzitási arány 250:1;
- d) legalább 1 Megapixel (1000x1000 képpont) megjelenítése, pixelméret < 0,3 mm.

5.2.2 Minimális fényerősség (luminancia)

A luminancia (Y) vagy fényerősség az egységnyi felületre jutó fényerőt jelenti, mértékegysége a kandela/m².

A magas luminanciájú képernyő megakadályozza a képernyőn való visszatükröződéseket.

A modern síkképernyők luminanciája > 500 cd/m².

A minimális fényerő fénysűrűségmérő készülékkel mérhető. A fénysűrűség méréséhez fehér (világos) hátteret kell megjeleníteni.



5.2.2.1 SMPTE RP133-1991 szerinti tesztkép

A monitor kontrasztjának és fényerejének beállítása tesztkép vagy egy lépcsős ék képének megjelenítésével végezhető el optimálisan. A *5.2. ábrán* az SMPTE RP133-1991 szerinti tesztképre láthatunk példát.

(SMPTE = society of motion pictures and television engineers)

i 							
20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	
10%			I			90%	
0%						100%	
5%/ 0%						95% <i> </i> 100%	

5.2. ábra. Példa a monitorbeállítások ellenőrzésére szolgáló tesztképre

5.2.3 Fényintenzitási arány (kontrasztarány)

A kontrasztarány a fekete és a fehér közötti fényerőbeli különbséget jelenti. Tehát a képernyő kontrasztdús és ezáltal valósághű kép létrehozásához szükséges teljesítményének mennyiségi kifejezése.

Minél nagyobb ez az arány, annál nagyobb a kontraszt és annál élesebb a kép.

Minél alacsonyabb ez az arány, annál mattabbak és életlenebbek lesznek a megjelenített képek. A feketét gyakran sötétszürkének érzékeljük.

A jó kontrasztarány 300:1-nél kezdődik.



- 5.3 DIGITÁLIS RADIOGRÁFIAI RENDSZEREK MEGFELELŐSÉGI VIZSGÁLATA CR-FANTOM-ESZKÖZÖKKEL
- 5.3.1 A vizsgálat célja, szükségessége
- A digitális radiográfiai felvételeknek képminőségi követelményeknek kell megfelelni, pl:
- MSZ EN ISO 17636-2:2013 (hegesztési varratok).
- MSZ EN 12681-2:2018 (öntvények). szabványoknak.

A szükséges képminőség elérésének egyik feltétele a megfelelő minőségű képlemez és szkenner használata.

Vonatkozó szabványok

- MSZ EN 14784-1:2006.
- ◆ ISO 16371-1:2011.
- ASTM E 2445 és E 2446.

A gyártók ezen szabványok alapján minősítik vagy minősíttetik a készülékeket.

A felhasználónak túl sok és komplikált mérést, vizsgálatot kellene végezni, ami nem kivitelezhető. A rendszeres felhasználói ellenőrzésre úgynevezett fantomokat lehet használni, melyek segítségével gyorsan, megismételhetően és dokumentálhatóan ellenőrizhető a digitális radiográfiai rendszer minősége.

5.3.2 Hosszútávú stabilitás vizsgálat CR-fantommal

A fantomok használatának előnyei:

- Csak néhány vizsgálatot kell elvégezni.
- A vizsgálatokat meghatározott időnként meg kell ismételni (szkenner típus, használati mód).
- Egyetlen felvétel elegendő egy adott képlemez szkenner kombinációhoz.
- Az expozíciós dózis a szkenner pixelméret képlemez kombináció függvénye.

5.3. ábra. A CR fantom felépítése



A tesztfelvételek sugárzási és geometriai feltételei:

- ◆ U = 90 kV,
- mA·min : képlemez érzékenység függő,
- SFD >= 1 m (2 m),
- Szűrés : 1,5 mm Cu.

5.4. ábra. A CR fantomról készült felvétel





5.3.2.1 A tesztfelvételek kiértékelése:

5.5. ábra. A sugárzás középvonalának illeszkedése és merőlegessége (C)



5.6. ábra. Geometriai torzítás (I)



5.7. ábra. A feketedés egyenletessége (EL, EC, ER) max. 15% eltérés engedhető meg





5.8. ábra. A kiolvasó lézersugár egyenletessége (jitter) (A)



5.9. ábra. A képlemez továbbítás egyenletessége (G)



5.10. ábra. Az alap térbeli felbontás, SRb (B)





5.11. ábra. Normalizált jel-zaj viszony SNRN



5.12. ábra. Kontraszt érzékenység (J) (csak az alu blokk) 4-3-2-1 %





Az eredmények dokumentálására az alábbi ábrán láthatunk példát:

5.13. ábra. A hosszútávú stabilitásvizsgálatok jegyzőkönyve

5		1			1							
ilitásvizsgálato	k jegyzőkönyve											
CRxFlex												
		_										
2014												
2017.október												
IPS												
ntja:			2014.10.29		2015.10.29	í	2016.10.27		2017.10.25		2018.10.22	
			Eredmény	Megjegyzés	Eredmény	Megjegyzés	Eredmény	Megjegyzés	Eredmény	Megjegyzés	Eredmény	Megjegyzés
BSR	Duplex EN 19232-5	Slow scan	130 µm		130 µm		130 µm		130 µm		130 µm	
		Fast scan	130 µm		130 µm		130 µm		130 µm		130 µm	
	SNR _N	Slow scan	210	BAM csiga mellett	205	BAM csiga mellett	208	BAM csiga mellett	210	BAM csiga mellett	212	BAM csiga mellett
		Fast scan	220		210		215		215		218	
	Intenzitás		55850	BAM csiga mellett	55810	BAM csiga mellett	55795	BAM csiga mellett	55840	BAM csiga mellett	55829	BAM csiga mellett
	Geometriai torzítás		nincs		nincs		nincs		nincs		nincs	
	Lézer jitter		ok		ok		ok		ok		ok	
	IP továbbítás		ok		ok		ok		ok		ok	
	Feketedés egyenlete	sség	6%		6%	5	6%		7%		7%	
Kontraszt	AI		1%		1%	5	1%		1%		1%	
	90 kV, 4.5 mA, 4											
	perc, SDD= 1000											
	mm, Rtg: Eresco											
	42MF											
	2014 CRoFlex 2014 2017 október IPS BSR BSR BSR Kontraszt	CRxFlex CRxFlex CRxFlex CRxFlex CRxFlex CRxFlex CRxFlex CRxFlex CD12-cktober UPS UD20-cktober UPS UD20-cktober UPS SNR, BSR Duplex EN 19232-5 SNR, SNR, SNR, SNR, SNR, SNR, SNR, SNR,	CRuFlex CRuFlex CRuFlex CRuFlex CRuFlex CRuFlex CRuFlex CRuFlex CO11 CRUFLex CO12 CRuFlex CO12 CRUFLex CO12 CRUFLex CO12 CRUFLex CO12 CRUFLex	Ilitávizgálatok jegyzőkönyve Ilitávizgálatok jegyzőkönyve CRuFlex 2014 2014 Ilitávizgálatok jegyzőkönyve 2014 Ilitávizgálatok jegyzőkönyve IPS Ilitávizgálatok jegyzőkönyve BSR Duplex EN 19232-5 SIN SIN SIN SIN SIN SIN scan SIN SIN scan Geometrial torzítás nincs Intenzitás ok IP továbítás ok Kontraszt Al 90 kV, 4.5 mA, 4 90 kV, 4.5 mA, 4 90 kV, 4.5 mA, 4 200 aver scan	Source CRAFlex CRAFlex 2014	CRAFIEX CRAFIEX CRAFIEX 2014	CRaFlex Image: constraint of the second se	Italitávizsgálatok jegyzőkönyve Italitávitávissgálatok jegyzőkönyve Italitávissgálatok jegyzőkönyve	CRAFIEX CRAFIEX <t< td=""><td>Litávizgálatok jegyzőkönyve Image: Several algorithm of the several algorithm of</td><td>Intervise Intervise <t< td=""><td>CRAFIEX CRAFIEX Image: Constraint of the second of the se</td></t<></td></t<>	Litávizgálatok jegyzőkönyve Image: Several algorithm of the several algorithm of	Intervise Intervise <t< td=""><td>CRAFIEX CRAFIEX Image: Constraint of the second of the se</td></t<>	CRAFIEX CRAFIEX Image: Constraint of the second of the se

