# *Roncsolásmentes hibakereső anyagvizsgálati eljárások*

***Dr. Mészáros István***
***egyetemi tanár***

***BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék***

***2017.***

Az ipar nagymértékű fejlődése és a nagy tömegű gépalkatrészek sorozatos ellenőrzésének igénye, lehetőleg roncsolásmentes, gyors, pontos és a gyártástechnológiai folyamatokat követni tudó vizsgálati lehetőségeket kíván meg. A roncsolásmentes anyagvizsgálat (NDE ill. NDT) célja lehet hibakeresés, ill. a szerkezeti tulajdonságok tanulmányozása. Ezek a vizsgálatok nem okozzák a vizsgált darab sérülését, ill. roncsolódását, minőségcsökkentő változásokat nem okoznak, a vizsgált alkatrészek nem vállnak használhatatlanná, esetleg értéktelenné. Összefoglalónkban kizárólag a roncsolásmentes hibakereső vizsgálatokkal, ill. ezek közül az ipari alkalmazásokban leginkább elterjedt vizsgálati módszerekkel foglalkozunk.

A roncsolásmentes anyagvizsgálat hagyományos szerepe repedések, zárványok, illetve egyéb olyan *anyaghibák kimutatása*, amelyek a berendezés vagy szerkezet használhatóságát és biztonságát veszélyeztetik. Mindemellett terjednek azok a vizsgálati módszerek, amelyek a termékek *mechanikai és egyéb tulajdonságainak meghatározására* szolgálnak. A vizsgálatokat általában a termék végellenőrzésére alkalmazzák, bár a már említett szigorú követelmények miatt egyre jobban beépülnek a gyártási folyamat mind több fázisába, az alkalmazott gyártástechnológia optimalizálása, valamint a hibás darabok kiszűrése érdekében. Az egyes alkatrészeken végzett vizsgálatokkal a tervezők, a technológusok betekintést kaphatnak a megmunkálási folyamatok hatásmechanizmusába, ellenőrizhetik az üzemeltetés során előálló igénybevétel következményeit, amely alapján javíthatnak a gyártmány minőségén, csökkentve ezzel a fejlesztések költségeit. A roncsolásmentes anyagvizsgálat tehát ma már nemcsak a minőségbiztosítás eszköze, hanem segíti a fejlesztési tevékenységet is.

Az eltérő fizikai elven működő roncsolásmentes vizsgálati módszerek nem egyformán használhatók a hibák detektálásra vagy anyagtulajdonságok jellemzésére, ezért azok teljesítőképességét, alkalmazási lehetőségeit mindig szem előtt kell tartani. A különböző eljárások sokoldalúan használhatók, de mindegyiknek meg vannak a maga korlátai.

A vizsgálati eljárás kiválasztásának számos szempontja lehet. Meghatározó a vizsgálandó anyag fizikai és kémiai tulajdonsága, alakja, mérete, felületi kiképzése. További meggondolást igényel az a körülmény, hogy a vizsgálat elvégezhető-e közvetlenül a tárgyon, vagy pedig csak attól bizonyos távolságban. Előfordulhat olyan eset is, hogy a tárgynak csak egyik oldala megközelíthető, míg a másik oldal beépítési vagy egyéb okból nem hozzáférhető. Figyelembe kell venni azt is, hogy helyszínen kell-e vizsgálni, gyártósorban vagy laboratóriumban, kis, illetve nagy sorozatban. A hibakereső vizsgálatok megválasztásának fontos szempontja a kimutatni kívánt hiba jellege, alakja, mérete is.

Fejezetünkben az ún. *defektoszkópiai*, azaz hibakereső vizsgálatokkal foglalkozunk, melyek célja a belső és felületi anyaghibák (rejtett hibák) kimutatása. Az ilyen rejtett hibák az anyag tulajdonságait és felhasználhatóságát nagymértékben befolyásolják, sőt adott esetben a szerkezet rendeltetésszerű felhasználására alkalmatlanná tehetik.

*A hibák a szerkezeti anyagokra két okból jelentenek veszélyt. Egyrészt a* teherhordó keresztmetszetet a hibák csökkentik, tehát az anyag terhelhetősége csökken. Másrészt a hibák körül kialakult heterogén feszültségtér következtében ridegítő hatásúak, amely elsősorban fárasztóterhelésnek vagy dinamikus igénybevételnek kitett alkatrészek esetén veszélyes.

A hibák megjelenési formájukat tekintve lehetnek *felületszerűek* (repedések, rálapolódások, rétegességi hibák, stb.), valamint *térfogati hibák* (üregek, gáz-, és salakzárványok, stb.). A felsorolt hibák közül a közel gömb alakú gázzárványok a legkevésbé veszélyesek. Veszélyesebbek a szabálytalan alakú salak- és egyéb nemfémes anyagokból álló zárványok. A repedések, amelyek éles bemetszéseket jelentenek. Ezek a legveszélyesebbek, így repedést teherhordó szerkezetekben egyáltalán nem engednek meg.

*Az anyaghibák keletkezésük alapján az alábbi két csoportra oszthatók. Beszélhetünk* gyártástechnológiai- ill. üzemeltetési hibákról.

A gyártástechnológiai hibák az alkatrészek különböző gyártási fázisai során keletkezhetnek egészen az alapanyaggyártástól a késztermék utolsó technológiai folyamatáig. Egyaránt lehetnek síkszerű és térfogati hibák is. Ilyenek a különböző öntési, meleg-, és hidegalakítási, hőkezelési, hegesztési, köszörülési stb. hibák.

Az üzemeltetés során keletkezett hibák általában anyaghibára (esetleg elcserélt anyagminőségre, anyagkeveredésre) illetve túlterhelésre vezethetőek vissza. Az így keletkezett hibák túlnyomórészt repedések.

A hibák keletkezésének alapján a hibakereső roncsolásmentes vizsgálatokat a gyakorlatban két fő területen alkalmazzák:

- Új munkadaraboknál, amikor olyan hibákat kell feltárni, amelyek valamilyen gyártástechnológiai folyamat során keletkeztek.
- Olyan munkadaraboknál, amelyek hosszabb ideje vannak üzemben és tartósan nagy igénybevételnek vannak kitéve.

Kiegészítve a roncsolásmentes vizsgálat megválasztásának szempontjait, a hibakimutatás módszerének elsősorban a hiba helyzetéhez kell igazodnia. Más-más módszert kell alkalmazni a felületi, a felület alatti vagy a mélyebben fekvő hibák esetében. Ugyancsak figyelembe kell venni, hogy síkszerű vagy térfogati hibáról van-e szó. Térfogati hibánál meghatározó a hibát kitöltő anyag kémiai és fizikai jellemzői. Figyelembe kell venni az adott eljárással detektálható minimális hibaméretet is.

A roncsolásmentes vizsgálatok jelentős része kis-, és nagyfrekvenciás mechanikai rezgések (akusztikus és ultrahangos módszerek), valamint különböző hullámhosszúságú elektromágneses sugárzások (röntgen-, és gamma sugarak) felhasználásán alapulnak. További módszerek a vizsgált anyag villamos és mágneses tulajdonságainak és szerkezetének kapcsolatát használják ki. Kiegészül a sor még a folyadékbehatolásos (penetrációs) és a vizuális vizsgálattal.

Napjainkban a leggyakrabban használt roncsolásmentes hibakereső vizsgálatok a következők:

- • Szemrevételezés (vizuális vizsgálat, VT)
- • Folyadékbehatolásos vizsgálat (PT)
- • Mágnesezhető poros vizsgálat (MT)
- • Örvényáramos hibakereső vizsgálat (ET)
- • Ultrahangos vizsgálat (UT)
- • Radiográfiai vizsgálat (RT)
- • Tömörségi vizsgálat (LT)

***Vizuális vizsgálatok***

A felületi hibák kimutatására alkalmas legegyszerűbb vizsgálati módszer. A szemrevételezéses vizsgálatot gyakran más vizsgálati módszerekkel kombinálva ill. azok kiegészítőjeként alkalmazzuk.

A vizsgálat során a darab felületét szabad szemmel vagy segédeszközzel tanulmányozzuk az esetleges folytonossági hiányok (repedések, felnyílt üregek stb.) ill. felületi hibák (kopási-, kavitációs-, korróziós nyomok stb.) kimutatása céljából. Ennek megfelelően beszélhetünk közvetlen vagy közvetett szemrevételezéses vizsgálatról. A vizsgálati darab felületének azon helyeit, amelyek az emberi szem által jól láthatóak, közvetlen szemrevételezéssel ellenőrizzük. Amennyiben a feltételezett hiba helye nem vagy rosszul látható akkor közvetett vagy endoszkópos vizsgálatot végzünk.

A vizsgálat során alapvető fontosságú a felület megfelelő megvilágítása. Szabadban végzett vizsgálatoknál a természetes megvilágítás, fedett helyen mesterséges megvilágítást kell alkalmazni, amely nem lehet vakító, szórt fényt ad és kell érnie legalább 500 lux fényerőt. A hibakimutathatóság érdekében lényeges a fém tiszta, lerakódásoktól mentes vizsgálati felület biztosítása.

Az eljárás kevésbé érzékeny a kisméretű összezáródott repedések kimutatására és a csekély mértékű geometriai eltérések detektálására. Érzékeny a viszonylag nagyobb méretű térfogatos hibák és az elnyílt repedés jellegű hibák, valamint a durvább geometriai eltérések kimutatására. A hibakimutathatóság korlátja az emberi szem, illetve az alkalmazott segédeszköz felbontó képessége.

A felhasználható segédeszközök a következők lehetnek:

Közvetlen hozzáférést biztosító eszközök: tolómérő, mikrométer, szögmérők, varratmérő, idomszerek, egyszerű és binokuláris nagyítók, mikroszkópok, fém mikroszkópok, projektorok, fényképezőgép.

Közvetett hozzáférést biztosító eszközök: tükrök, merev-száras endoszkópok, üvegszálas endoszkópok, chip-kamerával egybeépített üvegszálas endoszkópok.

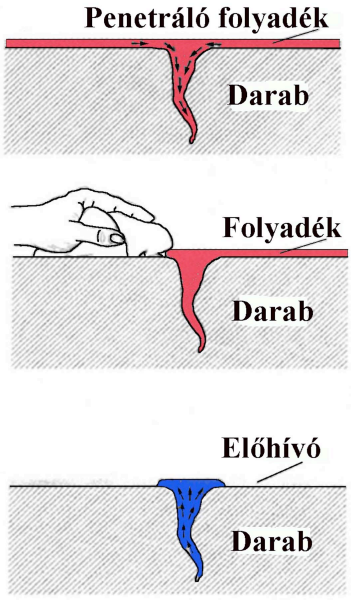
A szemrevételezéses vizsgálat sokszor alapvető fontosságú információkat ad, fotók készítésével jól dokumentálható és a további vizsgálatok kijelölésében segítséget ad. Azonban a vizsgálat kiértékelése kétségtelenül részben szubjektív. A hibakimutatás és a hibák megítélése az ellenőrzést végző személy szakmai tapasztalatától, pillanatnyi értékelő képességétől is függ.

***Folyadékbehatolásos anyagvizsgálati eljárások***

A folyadékbehatolásos (ún. *penetrációs*) módszer egyike a legrégebbi roncsolás nélküli vizsgálati eljárásoknak. A vizsgálati eljárás alapja, hogy ha a folyadékok a kapilláris hatás alapján, a felületen lévő folytonossági hiányokba behatolnak, hajlamosak arra, hogy hosszabb rövidebb idő után azokból kiszivárogjanak. A hatás fokozható nagy szívóhatású kontrasztanyag felvitelével, amely a behatolt folyadék anyagot, vagy annak egy részét a felületre hozza, és a kiszivárgást gyorsítja.

*A vizsgálati eljárás lényegében az alábbi műveletekből áll (1. ábra):*

1. A felület előzetes tisztítása, zsírtalanítása.
2. A jelzőfolyadék felvitele az előzőleg megtisztított és megszárított felületre (penetrálás). Ez után kellő időt hagyunk arra, hogy a felületre kiérő valamennyi folytonossági hiányba a folyadék behatoljon.
3. A jelzőfolyadék feleslegének eltávolítása a felületről.
4. Az előhívóanyag felvitele a felületre, ezáltal a hiányokba, repedésekbe behatolt jelzőfolyadékot a felületre hozzuk.
5. Szabad szemmel megvizsgáljuk a felületet, kiértékelés.




1. ábra. A folyadékbehatolásos vizsgálat elve és végrehajtása

Az alkalmazott *jelzőfolyadékok* lehetnek fluoreszkálóak, színezettek (általában piros), illetve kombináltak. Jelzőfolyadékon olyan folyadékot kell érteni, amely fizikai tulajdonságai alapján szűk résekbe vagy szilárd testek repedéseibe behatol (akár egy fáradásos repedésbe is, melynek szélessége 0,002 mm is lehet). Eltávolításuk a folyadék típusától függően történhet folyékony oldószerrel, gáz-halmazállapotú oldószerrel, vízzel vagy vízben oldható oldószerrel.

Az *előhívó* általában fehér kontraszt anyag, amely lehet por, vagy szuszpenzió. Az előhívó kontraszt anyagának nagy szívóhatásúnak kell lennie, hogy a vizsgálati darab folytonossági hiányaiba behatolt jelzőfolyadék egy részét ismét a felületre hozza (1.ábra).

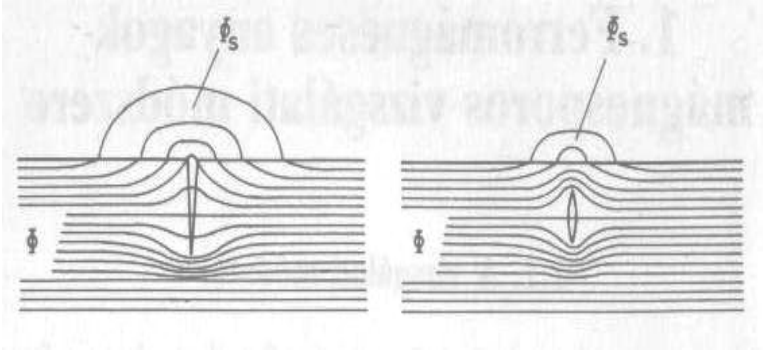
A penetrációs vizsgálat repedések, gyűrődések, pórusosság roncsolás nélküli kimutatására alkalmas. Feltétel, hogy a hibás helyek a felületre érjenek, vagy azzal közvetlen kapcsolatban legyenek. A módszer előnye elsősorban abban nyilvánul meg, hogy nem mágnesezhető anyagok (műanyag, üveg, stb.) vizsgálatára is alkalmas, nincs különleges helyigénye, nem igényel költséges beruházást, bárhol helyszínen is elvégezhető.

### *Mágneses repedésvizsgálat (mágnesezhető-poros vizsgálat)*

A mágneses vizsgálat alapja, hogy a ferromágneses anyagokon átmenő mágneses fluxust az útjukba eső folytonossági hiányok eltérítik. A hibahelyeket kitöltő levegő, gáz vagy zárvány mágneses permeabilitása lényegesen kisebb a vizsgált anyagéhoz képest, ezért az erővonalak ezeken, a helyeken nem tudnak átjutni, hanem megkerülik azokat. Ha a folytonossági hiány a felületen, vagy a felület közelében van, az a fluxust a levegőbe is kikényszerítheti (*szórt fluxus*). Ilyenkor a felületre vitt ferromágneses por az eltérítés (a hiba) helyén feldúsul, és a folytonossági hiány láthatóvá válik (2. ábra).

A szórt fluxus kialakulásának feltétele, hogy a hiba a mágneses fluxus irányára merőleges legyen. A mágneses fluxussal párhuzamosan elhelyezkedő hibák ugyanis nem létesítenek szórt fluxust, így ezek a hibák nem kimutathatók. (2. ábra). A hibák biztonságos kimutatásának érdekében az alkatrészeket mindig két egymásra merőleges irányban kell mágnesezni.

A hibák kimutatására használt vizsgálóanyagoktól függően megkülönböztetünk *száraz-, és nedves-eljárást.* A szárazeljárás esetén vizsgálóanyag por (pl. $Fe_3O_4$ azaz magnetit), nedves-eljárás esetén a vizsgáló port hordozó folyadékban (pl. olaj) szuszpendálják. Mind a száraz-, mind a nedves-eljárás elvégezhető színes vagy fluoreszkáló anyagokkal is. Fluoreszkáló anyaggal történő vizsgálatkor ultraibolya sugárzással kell a jelzőfolyadékban lévő anyagot gerjeszteni, hogy az látható fényt adjon.




2. ábra. A mágneses repedésvizsgálat elve, valamint a hibakimutathatóság lehetősége

A mágneses módszerrel történő vizsgálat után a vizsgált tárgy a mágnesezés hatásosságától függően mágneses marad. Ez bizonyos esetekben zavaró lehet (pl. fogaskerekeknél a felületre tapadó fémszemcsék berágódásokat okozhatnak, stb.), így a maradék mágnességet a vizsgálat után el kell tüntetni. A lemágnesezés történhet ellenmágnesezéssel (ellentétes mágneses tér létesítésével), vagy változó irányú és folyton csökkenő mértékű mágnesezéssel.

A mágneses vizsgálat megfelelő mágneses térben igen érzékeny módszer (akár 0,001 mm széles repedés is kimutatható). Hátránya azonban, hogy csak a felszíni, vagy a felszínhez közeli hibákat lehet kimutatni, továbbá csak ferromágneses anyagok esetén alkalmazható.

***Örvényáramos hibakereső vizsgálat***

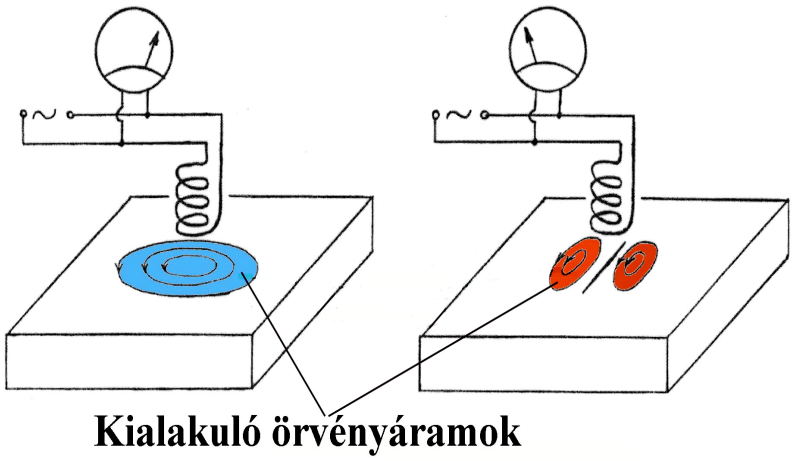
Az örvényáramos vizsgálat az elektromágneses indukción alapszik. A vizsgálat elve az, hogy egy váltakozó árammal táplált tekercs ún. primer mágneses tere a vizsgálati darabban (amelynek elektromosan vezetőnek kell lenni) örvényáramokat indukál. Ezek az örvényáramok szintén gerjesztenek egy szekunder mágneses teret, amely a tekercs primer terével ellentétes és arra szuperponálódik. A darabban létrejövő örvényáramokat és az általuk létrehozott szekunder mágneses teret - egy adott primer tér mellett - a vizsgálati darab elektromos vezetőképessége, mágneses permeabilitása, geometriai adatai, anyaghibái, és az alkalmazott frekvencia határozza meg. Az elektromos és mágneses tulajdonságok, viszont befolyásolja az anyag összetétele, keménysége, hőkezeltségi állapota, így e jellemzők detektálása is a módszerrel is elvégezhető. Az említett két mágneses erőtér által keltett eredő erőteret érzékelni, illetve mérni lehet, és ennek változásaiból következtetni az anyag hibáira vagy tulajdonságaira (3. ábra). Az örvényáramok visszahatásaként ugyanis megváltozik a gerjesztő tekercsben folyó áram nagysága és a gerjesztő jelgenerátor feszültségéhez képesti fázishelyzete. A változás érzékelésére több megoldás létezik, a legáltalánosabb az ún. impedancia (fázis) diagramok kiértékelése.

Mivel a mérést számos tényező befolyásolja, ezért egy tulajdonság mérésénél - a fent említett - tulajdonságoknak meg kell egyeznie az egyes munkadaraboknál.

Az örvényáramos mérési elrendezések egyik alapelrendezése az ún. gyűrűtekercses megoldás, amelynél a minta áthalad a vizsgálótekercsen. Az ún. tapintótekercses megoldásnál a tekercs a darabon kívül helyezkedik el. Ekkor a vizsgálat a tekercs szórt terében, míg az előző esetben a tekercs főfluxusában történik.

*Az örvényáramos vizsgálatok a következő területeken alkalmazhatók (2.10. ábra):*

- Anyagjellemzők ellenőrzése, mérése (pl. fémek hőkezeltségi állapotának ellenőrzése, ötvözőtartalom ellenőrzése, azonosítás, válogatás, vezetőképesség mérése, permeabilitás mérése, bevonatrétegek vastagságának mérése, keménységmérés stb.)
- Méretellenőrzés (pl. vastagságmérés, rétegvas-tagságmérés, geometriai eltérések kimutatása stb.)
- Hibakereső vizsgálat (kimutatás, elemzés hiba nagyságra stb.)
- Fémkeresés (eltakart fémtestek lokalizálása)




3. ábra. Az örvényáramos vizsgálat elvi elrendezése

Az örvényáramos vizsgálatok egyik legnagyobb előnye, hogy az alkatrész és a vizsgáló eszköz nem kell, hogy egymással érintkezzen, ezáltal a vizsgált darab nem igényel különös felület-előkészítést, és utólag sem kell tisztítani. További előny a jó automatizálhatóság, melynek következtében az eredmények gyorsan és pontosan kiértékelhetőek, a vizsgálati sebesség nagy, így tömegszerű vizsgálatoknál is alkalmazható.

Meg kell jegyezni azonban, hogy a vizsgálat csak a felület közeli tartományokról ad információt (az alkalmazott frekvencia függvényében maximum pár milliméter mélységig). A detektált jel számos paramétertől függ, így számos zavaró effektus léphet fel. Emiatt az optimális mérési paraméterek (szondatípus, frekvencia stb.) megválasztása és az eredmények kiértékelése sok esetben kvalifikált szakembert igényel.

Összefoglalva a vizsgálatokkal csak azokat a tulajdonságokat vagy hibákat tudjuk kimutatni, illetve mérni, amelyek egy hibátlan etalonhoz képest valamilyen vezetőképesség-, vagy mágneses permeabilitás változást eredményeznek, vagy az örvényáramok eloszlását módosítják.

### *Röntgen- és izotópvizsgálat*

Az ún. durvaszerkezeti radiológiai vizsgálatok (röntgen- és izotópvizsgálatok) a roncsolásmentes hibakereső anyagvizsgálatok egyik legfontosabb és ezért legelterjedtebb területe. Alapvető feladatuk az anyagban lévő belső inhomogenitások (anyaghibák) feltárása.

A vizsgálatok közös alapja az, hogy az alkalmazott röntgen vagy gamma sugárzás intenzitása a vizsgált tárgyon áthatolva az átsugárzott anyagvastagságtól függően változik (csökken). Az intenzitás változás érzékelésének módja szerint különböző radiológiai módszerek léteznek:

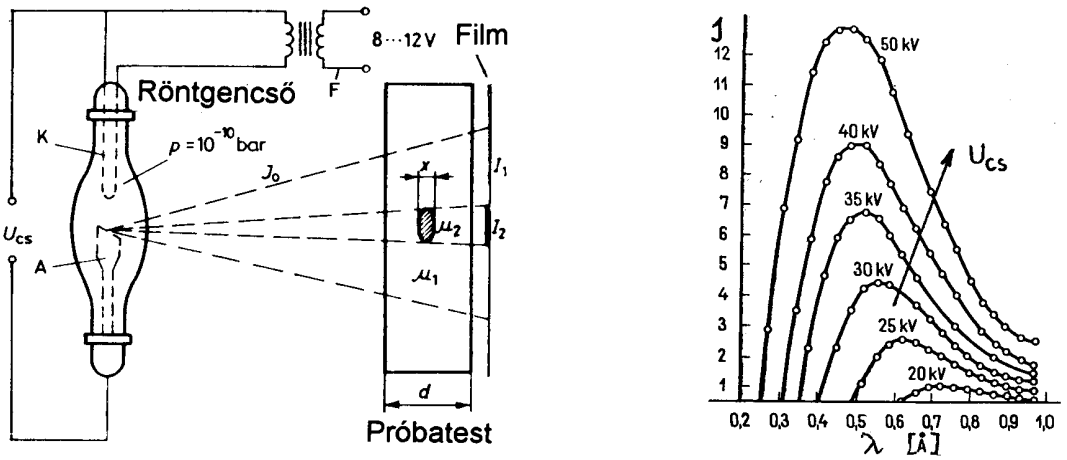
- Radiográfia: A legelterjedtebb eljárás, az iparban használt röntgenvizsgálatok több mint 90%-át adja. A tárgy belső, szemmel nem látható hibáit fényérzékeny filmre készített felvétellel tesszük láthatóvá. Így az alkalmazott sugárzás fotokémiai hatását használjuk fel a felvétel elkészítéséhez.
- Radioszkópia: Ennél a módszernél az anyag belső képe fluoreszkáló ernyőn jelenik meg és közvetlenül szemmel érzékelhető. A módszer ipari alkalmazási területe a könnyűfémek és kisebb falvastagságú acélok vizsgálata. A vizsgálatról közvetlenül bizonylatolható kép nem marad, ezért a radiográfiával szemben háttérbe szorul.
- Radiometria: Ez esetben a radioaktív sugárzás intenzitás változását sugárzásmérő készülékkel (pl. Geiger-Müller-féle csővel) mérik úgy, hogy a vizsgálandó anyag felületét pontról-pontra letapogatják a sugárzásmérő érzékelőjével. Ezt a módszert az ipari gyakorlatban ritkán alkalmazzák.

### *A röntgensugárzás keltése és fizikai tulajdonságai*

Röntgensugárzás akkor keletkezik, ha nagy sebességgel haladó elektronok szilárd testbe ütköznek és azon lefékeződnek. A nagy sebességgel haladó elektronok létrehozása vákuumban izzított huzal elektron emissziója révén gáztöltésű vagy ioncsövekben, illetve elektron vagy izzókatódos csövekben történhet.

A katódot 8-12 V fűtőfeszültségű árammal izzítják, míg a katód és az anód közé nagy feszültségű, ún. gyorsító feszültséget kapcsolnak (4. ábra). A kisfeszültségű izzókatódból kilépő elektronok a nagyfeszültség hatására felgyorsulnak és nagy sebességgel a katódba

ütköznek, ahol lefékeződnek és kinetikus energiájuk túlnyomó része hővé, és mindössze kb. 1%-a röntgensugárzássá alakul át.




4. ábra. A röntgenvizsgálat vázlata

Az ilyen módon keltett ún. folytonos sugárzás különböző hullámhosszúságú sugarak keveréke, miután az elektronok lefékeződése az anódon nem egyenletes lépcsőben történik. Az összes sugárzásban résztvevő legrövidebb hullámhosszúságú sugárzás hullámhossza és az $U_{cs}$ gyorsító feszültség (csőfeszültség) között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$\lambda_{\min} = \frac{12{,}396}{U_{cs}[kV]}[mm]$$

A röntgensugarakat áthatoló képességüktől függően két csoportra szokás felosztani, bár a két csoport között éles határt vonni nem lehet. A hosszabb hullámhossz-tartományba tartozó sugarakat *lágy*, míg a rövidebb hullámhosszúakat *kemény* sugaraknak nevezik. A lágy sugaraknak fémeken való áthatoló képessége kisebb, míg a kemény sugarakat nagy áthatoló képesség jellemzi. A röntgensugarak hullámhossztartománya 0,01-1 nm.

A röntgensugárzás szilárd, folyékony vagy gáznemű anyagokon áthaladva veszít intenzitásából. Ez az intenzitás csökkenés egyrészt abszorpcióból, azaz elnyelődésből, valamint szóródásból tevődik össze. Ha egy röntgensugárnyalábot egy "d" vastagságú fémtárgyon keresztülbocsátunk, az $I_0$ intenzitású, a sugárforrást elhagyó sugárzás a tárgyon való áthaladás után I intenzitásúra csökken. Értékét a "*sugárzás gyengülés exponenciális törvénye*" írja le.

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

ahol μ a gyengülési együttható, amelynek értéke a μ' elnyelődési és σ szórási együttható összege.

$$\mu = \mu' + \sigma$$

A μ' értéke függ egyrészt a hullámhosszúságtól, másrészt az abszorbeáló anyag kémiai összetételétől és a sűrűségtől, vagyis a következőképpen írható fel:

$$\mu' = C\rho\lambda^3 Z^3$$

ahol: C: állandó

ρ: a vizsgált anyag sűrűsége

λ: az alkalmazott sugárzás hullámhossza

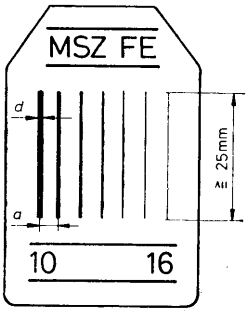
Z: az anyag rendszáma

A szórt sugárzás együtthatója (σ) elég tág határok között független a beeső sugár hullámhosszától és az anyag rendszámától is.

A hibakimutatás alapja, hogy a sugárzás intenzitása levegővel, gázzal vagy nemfémes zárványokkal telt üregeken át kevésbé csökken, mint a tömör anyagban. Ezt az intenzitás különbséget a már említett módszerekkel (radiográfia stb.) érzékelni tudjuk. A kisebb mértékben gyengített sugárzás természetesen a filmet jobban "megvilágítja", azaz a hiba helyén, a filmen erősebb feketedést okoz. Így jönnek létre a fényérzékeny filmen azok a feketedési különbségek, amelyekből a belső anyaghiba alakját és körülbelüli nagyságát is megállapíthatjuk.

A röntgenfelvételek készítésénél arra kell törekedni, hogy a szomszédos képrészletek között nagy legyen a feketedés különbség, azaz minél kontraszt dúsabb legyen a kép. A röntgenkészülék csőfeszültségének csökkentésével növelhetjük a sugárzás hullámhosszát, vagyis "lágyíthatjuk" a sugárzást. Ezáltal azonos anyagvastagság esetén "kontraszt dúsabb" felvételt tudunk készíteni, figyelembe véve az áthatolóképesség és a gazdaságos megvilágítás szempontjait. A lágy sugárzás azonban hosszabb expozíciós időt igényel. Ha a csőfeszültség növelésével a sugárzást "keményítjük", akkor kontrasztszegényebb felvételt kapunk, de megnövelhetjük az átvilágítható anyagvastagságot. Ezért a gyakorlati röntgenvizsgálatnál az ellentétes követelmények között kompromisszumot kell kötni. A röntgenvizsgálat eredményességét és a hibakimutatás lehetőségét nagymértékben befolyásolja a helyes *expozíciós idő* megválasztása.

A kimutatható hibaméret és egyben a képminőség megítélésére leggyakrabban az ún. huzalsorozatokat szokás alkalmazni (5. ábra). A huzalsorozatok gumi vagy műanyag tokba vannak beágyazva, a huzalok anyaga a vizsgált anyaggal megegyezik. Egy-egy sorozat hét huzalt tartalmaz, amelyek átmérői csökkenő sorrendben követik egymást. Különböző méretű huzalsorozatok léteznek, amelyek közül a vizsgált anyag vastagságának függvényében kell választani. A tokot a felvétel tárgyára a filmmel ellentétes oldalon kell elhelyezni és vele együtt lefényképezni. A felvételen látható legkisebb huzal átmérője alapján a kérdéses felvételt minősíteni lehet. A felvételen kivehető legkisebb hiba mérete a még látható legvékonyabb huzal átmérőjének felel meg. A filmek utólagos azonosíthatósága érdekében a huzalsorok mellett ólom számok, illetve betűk is elhelyezhetők. A felvételen ezek a jelölések láthatóak lesznek.




5. ábra. A képminőség ellenőrzésére használt huzalsor

### *Radioaktív izotópos vizsgálatok*

A radiográfiai vizsgálatokhoz a röntgensugárzáson kívül egyre kiterjedtebb mértékben használják még a gamma sugárzást is. Az ún. *izotópos vizsgálat* elveiben megegyezik a röntgenvizsgálatokkal. Ilyen gamma sugárzás keletkezik természetes radioaktív anyagok pl. rádium stabilabb állapotba történő átmenete közben. Az izotóp vizsgálatokhoz azonban mindig *mesterséges radioaktív anyagokat* használnak. Ilyen izotópokat úgy állítanak elő, hogy az elemet atomreaktorban neutronsugárzásba helyezik, amely során az atommag neutronokat vesz fel. Az így keletkezett izotóp instabil állapotba kerül, és a stabil állapotba történő törekvés közben fölös energiáját sugárzás alakjában adja le. Az anyagvizsgálatnál leggyakrabban használt izotópok a *Co-60* és az *Ir-192.* A különböző izotópokra jellemző az az idő, mialatt az energiájuk felére csökken (*felezési idő*). A Co-60 esetében ez 5,3 év, az Ir-192-nél 74 nap. Ez azt jelenti, hogy az izotópok használat nélkül, pusztán tárolás alatt veszítenek energiájukból, amelyet felvételkészítéskor az expozíciós idő megállapításánál figyelembe kell venni.

Az izotópok által keltett gamma sugárzás hullámhossza lényegesen kisebb, mint a röntgensugaraké (mintegy 1 pm), ez magyarázza rendkívüli áthatoló képességüket (kemény sugárzás). Ebből következően a vizsgálati technika abban különbözik a röntgenvizsgálattól, hogy nagy energiájú kemény sugárzásra érzékeny filmeket használnak és hosszabb expozíciós időket alkalmaznak.

*Az izotóp vizsgálat előnyei a röntgenvizsgálattal szemben:*

- kisebb helyszükséglet, könnyebb hordozhatóság,
- nagyobb az átsugárzó képessége (acéloknál kb. 300 mm),
- nem igényel energiaforrást,
- ún. panoráma felvételek készítésére alkalmas (pl. egy cső teljes körvarratáról a cső középpontjába helyezett izotóppal).

*Lényegesebb hátrányai a következők:*

- nagyobb a külső, illetve belső életlenség,
- hosszabb expozíciós idő,
- rosszabb hibafelismerhetőség,
- változó a sugárzás intenzitása (felezési idő),
- folytonos sugárzás (nem kikapcsolható).

Ez utóbbi megállapítás annyit jelent, hogy az izotóp akkor is sugárzik, amikor vizsgálatot nem végzünk (tárolás, szállítás, mozgatás stb.), így fokozott sugárvédelmet követel.

### *Ultrahangos vizsgálat*

Az ultrahangvizsgálat nyomáshullámok terjedését és a közeg határfelületeiről való visszaverődését használja fel belső folytonossági hiányok repedések, zárványok stb. felderítésére. A vizsgált tárgyba juttatott ultrahanghullámok számára a darabban lévő folytonossági hiányok olyan nagy akadályt jelentenek, hogy azok felületéről részben vagy egészben visszaverődnek. Ez a magyarázata, hogy a röntgenvizsgálattal ellentétben a hangnyalábra merőleges irányban elhelyezkedő legvékonyabb repedés is érzékelhető.

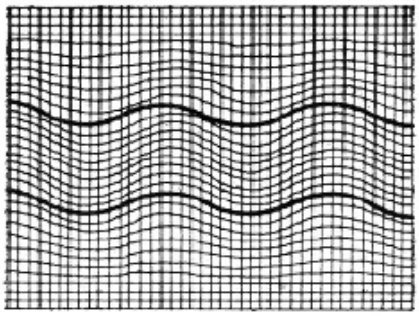
Az ultrahangok a mechanikai rezgések csoportjába tartoznak, frekvenciájuk a hallható hang frekvenciájánál nagyobb (16 kHz - 100 MHz). A korszerű ultrahangos berendezéseknél, az anyagvizsgálatnál alkalmazott frekvencia 0.25 - 14 MHz között van. Az ultrahang keltésének különböző módszerei vannak, az anyagvizsgálatban általában az ún. piezoelektromos és az elektrostrikciós rezgéskeltőket használják.

A létrehozott ultrahangok igen jól terjednek a fémekben, a longitudinális hullám sebessége például acélban mintegy 5920 m/s. A vizsgáló hullámhosszúság ismerete lényeges, ugyanis az ultrahangos vizsgálattal csak a legalább $\lambda/2$ esetleg ideális esetben $\lambda/3$ nagyságú hibák mutathatóak ki.

***Akusztikus hullámterjedési módok szilárd testekben***

*Gázokban és folyadékokban csak longitudinális hullámok, szilárd testekben valamennyi hullámfajta keletkezhet.*

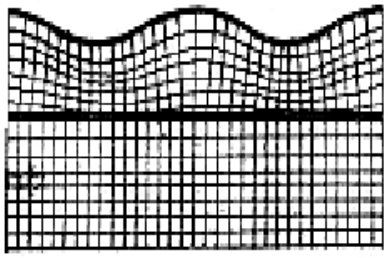
*Az anyagrészecskék rezgésének és terjedésének azonos iránya esetén, longitudinális hullámok keletkeznek. Ilyen esetben az anyagrészecskék tovaterjedése közben sűrűbb és ritkább helyek keletkeznek. A hullám hosszát ez esetben két sűrűsödési vagy két ritkult hely egymástól mért távolsága adja. A következő ábrán látható lengéskép áll elő, ha az anyagrészecskék rezgésének és terjedésének irányai egymásra merőlegesek. Ezek a transzverzális hullámok.*



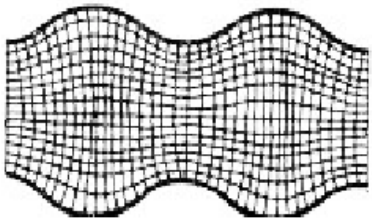
*Ez esetben a rezgés tovaterjedésének haladási iránya szinusz vonalnak megfelelő mozgású.*

*A mozgás úgy képzelhető el, mintha a részecskék mozgása egy periodikusan változó nyíróerő hatására menne végbe. Ezért nevezik a hullámokat nyíróhullámoknak. A hullámhossz ez esetben két hullámhegy vagy két hullámvölgy egymástól való távolsága. Ilyen hullámok gázokban és folyadékokban nem keletkezhetnek.*

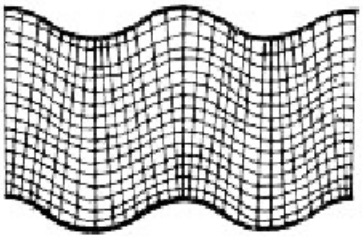
*A következőkben felületi vagy Rayleigh-hullámok egy pillanatnyi helyzete látható, a legfelső részecskesor mozgásmenetét ábrázolva. A deformáció tehát nem szinuszos alakú. Hasonló a vízhullámokhoz, azzal a különbséggel, hogy míg a vízhullámok esetén a részecskék kör alakú rezgést végeznek, addig a felületi hullámoknál elliptikus rezgésekről van szó. A felületi hullámok a mélységben oly kis mértékben terjednek, hogy egy hullámhossznyi mélységben a részecskék már gyakorlatilag nyugalomban maradnak.*



*A lemez- vagy Lamb-féle hullámok keletkezése akkor várható, ha a felületi hullámok hullámhossza nagyobb a lemez vastagságánál. Ilyen esetben különféle alakú lemezhullámok jönnek létre. Létrejöhetnek tiszta transzverzális hullámok is. Ezeknek azonban gyakorlati jelentőségük az anyagvizsgálatban egyelőre nincs. Jelentősége ennek a hullám fajtának akkor van, ha a felületére merőleges irányú rezgéskomponense is van. A Lamb-féle hullámoknak két alaptípusa ismeretes. Az egyik szimmetrikus vagy tágulási.*



*A másik az aszimmetrikus vagy hajlítási hullám:*



*A két hullámtípus közötti különbség az, hogy a szimmetrikus hullámoknál a semleges szálban levő részecskék longitudinális rezgésűek, az antiszimmetrikus hullámoknál transzverzálisak. A többi részecske rezgése mindkét esetben elliptikus.*

*A felsorolt főbb hullámféleségek közül az anyagvizsgálatban jelentősége elsősorban a longitudinális és transzverzális hullámoknak van. Az eltérő hullámfajták terjedési sebességei azonos közegben eltérőek, ezért a hullámhosszuk is különböző. Meg kell jegyezni, hogy a leggyakrabban használatos frekvencia, acélvizsgálat esetén, 2 MHz, amelyhez longitudinális hullámok esetén 3 mm hullámhossz tartozik. Ezzel jó összehasonlítási alapot kaphatunk a hiba méretét illetően, amely még ezzel a frekvenciával kimutatható.*

*A hullámok erősíthetik, ill. ki is olthatják egymást. Az interferencia két vagy több azonos frekvenciájú hullám találkozásakor fellépő jelenség. A találkozás során hullám szuperpozíció következik be. Az egy irányban haladó hullámok 0° fáziskülönbség esetén erősítik, 180° fáziskülönbség esetén gyengítik egymást. Ellentétes irányban haladó két azonos frekvenciájú*

*és amplitúdójú hullám állóhullámot hoz létre. Ennek ismérve, hogy fél hullámhossznyi távolságokban nyugalomban levő csomópontok és a maximális kitérés esetén duzzadó pontok váltják egymást.*

*A Huygens-elv szerint egy hullámfelület minden egyes pontjából elemi hullámok indulnak ki. Az új hullámfelület az elemi hullámok burkoló felülete. Ez ott észlelhető leginkább, ahol elemi hullámok interferencia révén erősítik egymást.*

*Az interferencia és a Huygens-elv segítségével magyarázható, hogy egy ultrahang rezgőkörében interferencia tér alakul ki, ahol helyi nyomás maximumok, és nyomás minimumok váltják egymást. A rezgő felület minden pontját elemi hullámforrásnak foghatjuk fel. Az egyes elemi hullámforrásokból kialakuló elemi gömbhullámok a hangtérben más-más útkülönbséggel találkoznak, interferálnak, így különböző mértékben gyengítik vagy erősítik egymást.*

*Az ultrahangos anyagvizsgálatban az impulzushullámok alkalmazása is elterjedt. Az impulzushullám tulajdonképpen néhány rezgésből álló, ezért néhány hullámhossznyi hosszúságú hullámvonulat, amit hullámcsomagnak is nevezünk. Az impulzusszám vagy ultrahang impulzus több, közel azonos frekvenciájú szinuszos hullám szuperpozíciója.*

*Amikor a hanghullámok érkeznek a felületre, a felület simaságától függően vagy visszaverődnek, vagy szóródnak. Más a helyzet, ha a hanghullámok két különböző sűrűségű közeg határfelületére érkeznek. A sugárnyaláb egy része a határfelületről visszaverődik, más része irányváltoztatással tovább halad, szóródik, esetleg abszorbeálódik. Az eltérő akusztikai közegek határán történő törés törvényét az érintett közegekben érvényes hang terjedési sebességek határozzák meg.*

*Az eltérő akusztikai közegbe történő belépéskor a hullám rezgésének modusa is megváltozhat. Súrlódó beesésről beszélünk, ha a longitudinális hullámok egy határfelület közvetlen közelében a határfelülettel közel párhuzamosan haladnak. Ilyen esetben a beeséskor a longitudinális hullámok egy része transzverzális hullámmá alakul és az anyagtól függő szög alatt leválik.*

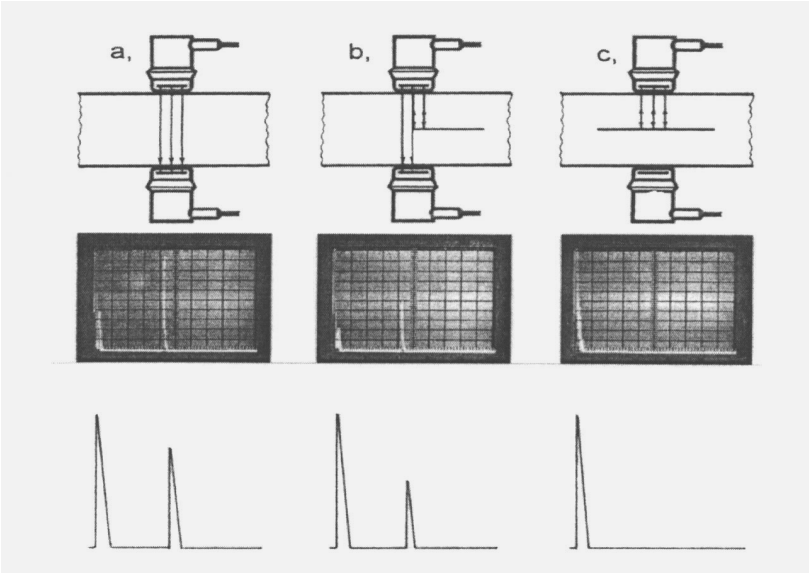
### *Ultrahangos anyagvizsgálat elve és módszerei*

Az általában piezoelektromos kristállyal létrehozott rezgést megfelelő csatoló közeg (víz, olaj stb.) közvetítésével átadjuk a vizsgálandó tárgynak, melyben a longitudinális ultrahanghullámok majdnem párhuzamos irányban terjednek. Az ultrahanghullámok minden olyan felületről visszaverődnek, amelyek különböző ún. akusztikai keménységű közegeket határolnak. Ilyen a vizsgálati darab hátfala vagy a darabban lévő folytonossági hiányok (hibák). A vizsgált anyagon áthaladó vagy visszaverődő hullámokat *vevőfejjel* foghatjuk fel, melynek elrendezése azonos az ulrahang-rezgéseket keltő *adófejjel*. A vevőfej kristálya az anyagtól átvett mechanikus rezgéseket nagyfrekvenciás elektromos rezgésekké alakítja, amelyek elektronikus erősítő útján egy katódsugárcsőbe vezetve érzékelhetők, illetve láthatóvá tehetők.

*Az ultrahangvizsgálatoknak az alábbi két alapvető eljárása fejlődött ki, az* átsugárzásos, ill. az impulzus-visszhang módszer.

Az *átsugárzásos módszernél* az ultrahang keltése és érzékelése külön vizsgálófejekkel történik (külön adófej, külön vevőfej). Ez esetben feltétlenül szükséges, hogy a vizsgált tárgy mindkét oldalról hozzáférhető legyen. A darab egyik oldalán helyezkedik el az adófej, vele szemben a vevőfej. Az ultrahang hullámokat keltő adófejből a vizsgált anyagba belépő ultrahanghullámok a berendezés katódsugárcsövének képernyőjén egy bemenő jelet adnak

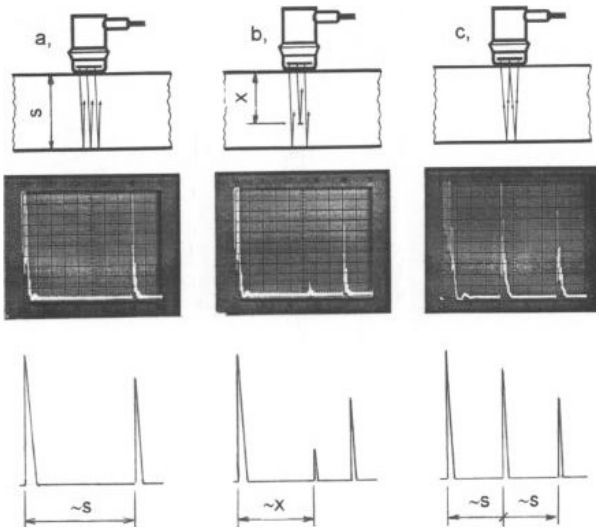
(*adójel*). A tárgyból akadálytalan áthaladás után kilépő hullámok a vevőfejbe belépve ott ismét villamos rezgésekké alakulnak és egy végjelet (*vevőjel*) adnak a képernyőn (6/a. ábra).




6. ábra. Az átsugárzásos ultrahangvizsgálat

Ha a tárgyban haladó ultrahanghullámok útjába valamilyen hiba kerül, amely a hullámok egy részét visszaveri, akkor a képernyőn jelentkező végjel kisebb lesz, mert a vevőfej kevesebb ultrahang energiát kap. (6/b. ábra). Ha a hiba olyan nagy, hogy az ultrahangnyaláb útját teljesen elállja, akkor a vevőfej nem kapva energiát, a végjel eltűnik (6/c. ábra). Ezt a vizsgálati módszert csak akkor alkalmazhatjuk, ha a vizsgálandó darab mindkét oldaláról hozzáférhető. További feltétel a két fej mozgatásának, valamint a darab határoló felületeinek párhuzamossága. Az eljárás további nagy hátránya, hogy a hiba darabon belüli helyzete (hibamélység) nem állapítható meg.

Az *impulzus-visszhang eljárás* esetén a besugárzás az anyag egyik felületéről történik, és ugyanoda érkezik vissza. A besugárzás és a visszhangérzékelés történhet ugyanazzal a vizsgálófejjel (közös adó-vevő üzemmód), de történhet külön adó/vevő vizsgálófejjel is. Az ultrahangimpulzus kétszer teszi meg az anyagvastagságnak megfelelő utat, mivel a darab ellentétes oldala, azaz a hátfal hozza létre a visszhangot (7/a. ábra). Mivel az *adójel* és az ún. *hátfal-visszhangjel* közötti idő adott anyag esetén csak a falvastagságtól függ, a készülékek képernyőjén a két jel közötti távolság arányos a vizsgált anyag vastagságával. A képernyő vízszintes tengelye tehát az anyag hosszkiterjedését jelenti. Mivel a hátfalvisszhang helyzete a képernyőn tetszőlegesen állítható, gyakorlatilag bármilyen léptékre beállítható az ernyő vízszintes tengelye. Amennyiben a vizsgált darabban hiba található, a hibáról visszaverődő ultrahangok egy ún. *hibajelet* hoznak létre (7/b. ábra). A hibajel elhelyezkedéséből a hiba pozíciója a darabon belül (hibamélység) megállapítható.




7. ábra. Az impulzus-visszhang ultrahangos vizsgálati eljárás

Ha a hiba mérete olyan nagy, hogy a teljes ultrahang nyalábot visszaveri a hátfal-visszhangjel teljesen el is tűnhet. Az eljárás elvéből következik, hogy hibakeresés mellett kiválóan alkalmazható falvastagságok meghatározására is (csövek, tartályok stb. esetén).

Ma erre már speciálisan kialakított készülékeket alkalmaznak (*falvastagságmérők*), amelyek azonnal számszerűen kiírják az eredményt (nincs katódsugárcsöves képernyő). Ezek a műszerek nagyon egyszerűen működnek, hiszen tulajdonképpen az ultrahang kibocsátásától a hang megérkezéséig eltelt időt mérik. A terjedési sebesség ismeretében az ultrahang által megtett út (falvastagság) számítható.

Az impulzus-visszhang eljárás előnye, hogy egyetlen fej elég a vizsgálathoz, tehát csak az egyik oldali hozzáférést igényli, továbbá a hiba mélysége (elhelyezkedése) megállapítható. Hátránya viszont, hogy a hullámokra nem merőleges felületekről visszavert hullámok nem foghatók fel (legalábbis ugyanazzal a fejjel), továbbá ismerni kell a vizsgált darab geometriai alakját, a hibalehetőségek fajtáját, a helyes értékelés érdekében.

Az ultrahangos vizsgálat előtt a felületet feltétlenül meg kell tisztítani (revétlenítés, rozsdátlanítás stb.). A felületre az ultrahang biztos bejuttatása érdekében a már említett *csatoló folyadékot* fel kell vinni, ezután végezhető a vizsgálat. Leggyakoribb alkalmazási területe különböző gépszerkezetek (tengelyek, rudak, csövek, csapágyak stb.), valamint a hegesztett kötések vizsgálata. Az ultrahangvizsgálat korszerű eljárása a hibakereső anyagvizsgálatoknak, így napjainkban alkalmazásuk egyre bővül. A berendezések általában kicsik, könnyűek, hordozhatók, akkumulátorról működtethetők, így a helyszíni vizsgálatokkor nagyon jól használhatók. Az ultrahang az élőlényekre nem veszélyes. A vizsgálat legnagyobb hátránya, hogy az érzékelt jelek helyes kiértékeléséhez nagyon nagy gyakorlatra van szükség, így az sok zavar, tévedés és ellentmondás forrása lehet. Továbbá a vizsgálat dokumentálása nagyon nehéz (nincs film stb.), amely elsősorban a régebbi, illetve az egyszerűbb berendezéseknél gondot okozhat. Korszerű berendezéseknél a számítástechnika bevezetése, lehetővé teszi a vizsgálatok kiértékelésének egyszerűsítését, valamint az adatok tárolását (pl. ún. hibatérkép készítés stb.).

A vizsgálatokat olyan anyagok esetén lehet alkalmazni, ahol a hanghullámok gyengülése, illetve szóródása kicsi (acélok, könnyűfémek, keményfémek stb.). Rosszul vizsgálható az öntöttvas, az ausztenites acél, a réz és rézötvözetek.