Bodolai Tamás FUTÁSIDŐ-SZÓRÓDÁSOS ULTRAHANGOS VIZSGÁLAT

© Dunaújvárosi Egyetem–Ecotech Nonprofit Zrt., 2022.

© Bodolai Tamás, 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 **Bodolai Tamás**

FUTÁSIDŐ-SZÓRÓDÁSOS ULTRAHANGOS VIZSGÁLAT

DUE Press Dunaújváros, 2022

TARTALOM

1. ÁLTALÁNOS BEVEZETŐ A RONCSOLÁSMENTES	
ANYAGVIZSGÁLATBA	9
1.1. MI A RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLAT?	9
1.2. MIÉRT FONTOS A RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLAT?	10
1.3. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS	11
1.4. TERMINOLÓGIA	12
1.5. ALKALMAZÁSOK	13
1.5.1. DEFEKTOLÓGIA (DEFEKTOSZKÓPIA, HIBAKIMUTATÁS)	13
1.5.2. ANYAGJELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA	13
1.5.3. MÉRETELLENŐRZÉS	14
1.5.4. IPARI SZEKTOROK	14
1.5.5. A RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLAT ÉSSZERŰ	
ALKALMAZÁSA	14
1.6. A VIZSGÁLATOK FŐ LÉPÉSEI	15
1.6.1. A MEGFELELŐ MÓDSZEREK ÉS TECHNIKÁK	
KIVÁLASZTÁSA	15
1.6.2. INDIKÁCIÓK GYŰJTÉSE	15
1.6.3. AZ INDIKÁCIÓ ÉRTELMEZÉSE	16
1.6.4. ÉRTÉKELÉS	16
1.7. HAGYOMÁNYOS RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI ELJÁRÁSOK	16
1.7.1. VIZUÁLIS VIZSGÁLAT	16
1.7.2. FOLYADÉKBEHATOLÁSOS VIZSGÁLAT	17
1.7.3. MÁGNESEZHETŐ POROS VIZSGÁLAT	18
1.7.4. ÖRVÉNYÁRAMOS VIZSGÁLAT	20
1.7.5. RADIOGRÁFIAI VIZSGÁLAT	20



1.7.6. ULTRAHANGOS VIZSGÁLAT		22
1.8. EGYÉB ELJÁRÁSOK		23
1.8.1. INFRAVÖRÖS TERMOGRÁFIA		23
1.8.2. AKUSZTIKUS EMISSZIÓS VIZSGÁLAT		24
1.8.3. TÖMÖRSÉGVIZSGÁLAT		24
1.8.4. NYÚLÁSMÉRÉS		25
1.9. FEJLETT TECHNIKÁK		25
1.9.1. VALÓS IDEJŰ RADIOGRÁFIA		26
1.9.1.1 FLUOROSZKÓPIA		26
1.9.1.2. KOMPUTER-RADIOGRÁFIA (CR)		26
1.9.1.3. DIGITÁLIS RADIOGRÁFIA (DR)		26
1.9.2. KORSZERŰ ULTRAHANGOS MÓDSZEREK		27
1.9.2.1. FÁZISVEZÉRELT VIZSGÁLAT		27
1.9.2.2. FUTÁSIDŐ SZÓRÓDÁSOS (TOFD) MÓDSZER		28
1.9.2.3. RÁNYÍTOTT HULLÁMOK		29
1.10. ALKALMASSÁG ÉS KORLÁTOK		29
1.11. BEVEZETÉS AZ ULTRAHANGOS VIZSGÁLATOKBA		31
1.11.1. HALLHATÓ ÉS NEM HALLHATÓ HANGOK		31
1.11.2. AZ ULTRAHANG ÉRZÉKELÉSE ÉS ALKALMAZÁSA		35
1.12. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS		36
1.13 AZ ELJÁRÁS ALKALMAZÁSA, ELŐNYÖK ÉS KORLÁTOK		37
1.14. FOGALOMMEGHATÁROZÁSOK	38	
2. FIZIKAI ALAPOK 32		
2.1. FIZIKAI DEFINÍCIÓK ÉS JELLEMZŐ PARAMÉTEREK		39
2.1.1 A HANG TERJEDÉSE		39
2.2. IZOTRÓP ÉS ANIZOTRÓP ANYAGOK		45
2.2.1. IZOTRÓP ANYAGOK		46
2.2.2. ANIZOTRÓP ANYAGOK		50
2.3. HULLÁMOKKAL KAPCSOLATOS FOGALMAK – HULLÁMFAJTÁK		52
2.3.1. HULLÁMKIBOCSÁTÁS		52
2.3.2. LONGITUDINÁLIS HULLÁMOK		
(KOMPRESSZIÓ/NYOMÁS/SŰRŰSÉG)		53
2.3.3. TRANSZVERZÁLIS HULLÁMOK (NYÍRÓHULLÁMOK)		54



2.3.4. FELÜLETI, LEMEZ- ÉS A KÚSZÓHULLÁMOK	55
2.3.5. AZ IRÁNYÍTOTT HULLÁM TERJEDÉSI ELVE	57
2.4. TÖRÉS ÉS VISSZAVERŐDÉS	60
2.4.1. MERŐLEGES BEESÉS	60
2.4.2. FERDESZÖGŰ BEESÉS	64
2.4.3. HULLÁMOK VISSZAVERŐDÉSE ÉS TÖRÉSE,	
A HUYGENS-ELV	69
2.4.4. HULLÁMOK TALÁLKOZÁSA, INTERFERENCIA	71
2.4.5. HULLÁMELHAJLÁS, A HUYGENS–FRESNEL-ELV	73
3. A FUTÁSIDŐ-SZÓRÓDÁSOS (TOFD) ULTRAHANGOS VIZSGÁLAT	
ALAPELVEI	75
3.1. BEVEZETÉS	75
3.2. A TOFD ELŐNYEI	77
3.3. A TOFD KORLÁTAI	77
3.4. ALTERNATÍV BEÁLLÍTÁSOK LEHASADÓ HULLÁMOKRA	78
3.5. HIBAMÉLYSÉG-MÉRÉS	79
3.6. TOFD PÉLDÁK	81
3.7. JELLEGZETES TOFD SZKENNELÉSI PROBLÉMÁK	88
4. HEGESZTETT KÖTÉSEK VIZSGÁLATA FUTÁSIDŐ-SZÓRÓDÁSOS	
ELJÁRÁSSAL	89
4.1. MSZ EN ISO 10863 HEGESZTETT KÖTÉSEK	
RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATA	89
4.2. HEGESZTETT KÖTÉSEK INDIKÁCIÓINAK ÉRTÉKELÉSE	90
5. ÖSSZEFOGLALÁS	93



Általános bevezető a roncsolásmentes anyagvizsgálatba

1.1. MI A RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLAT?

1.

Roncsolásmentes vizsgálat (angolból származó rövidítéssel: NDT, magyarul RMV) alatt azon eljárások összességét értjük, amelyek olyan módon szolgáltatnak információkat a vizsgált tárgyról, hogy azt sem a vizsgálat során, sem azt követően nem károsítják. Ennek köszönhetően az RMV hatékonyan alkalmazható a termelési folyamat bármely fázisában és a vizsgálandó alkatrész vagy munkadarab hasznos, üzemi élettartamának teljes ideje alatt. A roncsolásos vizsgálattal ellentétben – amellyel csak bizonyos minta vizsgálata lehetséges (mintavételes vizsgálat) –, roncsolásmentes vizsgálat során a teljes anyagmennyiség ellenőrizhető, ami javítja a termékek biztonságát, minőségét és megbízhatóságát.

A roncsolásmentes vizsgálati eljárásokat, módszereket üzemi vizsgálatok és ellenőrzések során alkalmazzák. Használhatók különféle alkatrészek méretének (például vastagságának) meghatározására, fizikai és mechanikai tulajdonságok (például vezetőképesség, keménység vagy belső feszültség) mérésére, folytonossági hiányok (például repedések, zárványok) kimutatására, akár automatizált termelési folyamatokban, akár egyedi munkadarabok esetében. A vizsgált darab – például öntött, hegesztett vagy kovácsolt termék, illetve szerkezeti elem – vizsgálat után is használható, mivel az eljárás során semmiféle károsodás nem éri. Az objektumok vizsgálhatók gyártás közben, üzembe helyezés vagy öszszeszerelés előtt vagy akár működés közben is.

Az RMV-eljárások és módszerek különböző fizikai alapelveken nyugszanak, felhasználva más tudományterületek (kémia, matematika, stb.) ismereteit is. Az egyes fizikai alapelvek bizonyos fizikai jelenségeket írnak le, ideértve a jelenségekre vonatkozó, matematikai képletek vagy egyenletek formájában megfogalmazott törvényszerűségeket is. A vizsgálatokkal az anyagok valamilyen tulajdonságát vagy annak megváltozását határozzuk meg. Tekintve, hogy ezek a tulajdonságok sok esetben közvetlenül nem mérhetők vagy nem figyelhetők meg, közvetett mérési-vizsgálati módszerekhez kell fordulni, amelyek ily módon lehetővé teszik az anyag jellemzését vagy folytonossági hiányainak azonosítását.

A roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel végzett mérések vagy vizsgálatok közvetett jellege miatt a kapott jeleket – gyakori kifejezéssel: indikációkat – és azok számszerűen meghatározott paramétereit értelmezni kell, azaz mérési vagy vizsgálati eredményekké kell átalakítani azokat. Ez az átalakítás az alábbi tényezők tekintetében minden módszer esetében egyedi:

- az eljárás fizikai alapelvei és eszközei.
- a vizsgált anyag.
- a gyártási folyamat.

Következésképpen, adott vizsgálati eljárás vagy módszer új problémára történő alkalmazása előzetes próbákat igényel, melyek során az anyagvizsgáló szakembernek egyértelműen meg kell állapítania a jelzések és a kiváltó okok között fennálló összefüggéseket, valamint azok technológiai jelentését.



Az előzetes próbákra annyi időt kell hagyni, amennyi alatt – roncsolásos vizsgálat segítségével, a minta vizsgálat közbeni viselkedése alapján – megállapítható az említett kapcsolat és esetenként elemezhető az anyagban meglévő folytonossági hiány.

A roncsolásmentes vizsgálat anyagok, alkatrészek, munkadarabok olyan fizikai eljárások segítségével végzett vizsgálatát jelenti, amely eljárások nem okoznak károsodást. Bár az RMV területe és célja igencsak eltér az orvosi diagnosztikáétól, mégis érdemes párhuzamot vonni a kettő között. Ugyanis, a roncsolásmentes vizsgálatot végző szakember munkája hasonlóságot mutat az orvosi diagnosztikával foglalkozó szakemberekéhez:

A anyagvizsgálónak ugyanúgy meg kell találnia a folytonossági hiányt, mint ahogyan az orvosnak meg kell állapítania a páciens betegségét.

Az anyagvizsgálónak úgy kell megvizsgálnia a munkadarabot – akárcsak az orvosnak a diagnózis felállítása során a pácienst –, hogy azzal ne okozzon károsodást.

Végül pedig a roncsolásmentes anyagvizsgálónak is jelentést kell írnia – csakúgy, mint az orvosnak – a vizsgálat eredményéről, ami egyes termékek selejtezésének, valamint egyes berendezéselemek, alkatrészek esetleges javításának vagy cseréjének – illetve a páciens kezelésének, gyógyításának – alapdokumentuma.

1.2. MIÉRT FONTOS A RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLAT?

A roncsolásmentes vizsgálatok számos ipari területen nélkülözhetetlenek a szerkezetek integritásának ellenőrzéséhez, például repülőgépek, vonatok, gázvezetékek, csővezetékek, hidak, nyomástartó berendezések esetében. Ugyancsak fontos szerepet játszanak különféle termékek minőségének ellenőrzésében, azok gyártása során.

A roncsolásmentes vizsgálatok céljai és hasznai a következők:

- szerkezetek integritásának és megbízhatóságának megállapítása,
- balesetek megelőzése és az emberi élet védelme,
- üzemelő berendezések működőképességének biztosítása,
- gyártási folyamatok ellenőrzése,
- terméktervezés támogatása,
- gyártási költségek csökkentése,
- egységes minőségi szint fenntartása,
- ügyfél-elégedettség biztosítása és a gyártó hírnevének fenntartása.



MÓDSZER	FIZIKAI JELENSÉG
Vizuális vizsgálat (VT)	Látható fény visszaverődése, törése
Folyadékbehatolásos vizsgálat (PT)	Kapilláris hatás
Mágnesezhető poros vizsgálat (MT)	Mágneses mező szóródása
Örvényáramos vizsgálat (ET)	Elektromágneses indukció
Ipari radiográfiai vizsgálat (RT)	Elektromágneses hullám áthatolása
Ultrahangos vizsgálat (UT)	Rugalmas hullámok visszaverődése

1.1. táblázat. A leggyakrabban alkalmazott RMV (NDT) eljárások

1.3. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

A roncsolásmentes vizsgálat egyidős az emberiséggel. Az ember már a történelem kezdete óta összehasonlítja a tárgyakat és a folyamat eredményeként dönt azok felhasználásról. Az ősember például tárolta a vadászott állatok húsát, hogy azt egy későbbi időpontban fogyaszthassa el. Mielőtt megette volna, megszagolta és összehasonlította az illatát a friss hús illatával, amelyről tudta, hogy fogyasztásra a legalkalmasabb, majd a vizsgálatot követően döntött arról, hogy ehető-e a hús vagy sem. Ez a művelet kétségkívül a roncsolásmentes vizsgálatok közé tartozik.

A tárgyak vizsgálatára, az anyagok és alkatrészek olyan ellenőrzésére való törekvés, amely nem befolyásolja, korlátozza vagy akadályozza későbbi felhasználásukat, valamint megőrzi eredeti állapotukat – vagyis a roncsolásmentes vizsgálat –, egyidős az emberiség azon képességével, hogy megváltoztatja az anyagokat és tárgyakat készít.

A roncsolásmentes vizsgálat jelenlegi formája a 19. század utolsó harmadától, végétől eredeztethető, amikor különböző gyártók – a fizikai alapelvek ismeretében – már alkalmaztak kezdetleges módszereket termékeik állapotának megismerése céljából.

Ezek a vállalatok a két világháború között érték el virágkorukat. A háborúkban érintett országoknak hatalmas mennyiségű nyersanyagra volt szükségük hadseregeik eszközeinek pótlására, amelyek a csaták során elvesztek vagy használhatatlanná váltak. Emiatt úgy döntöttek, hogy a lehető legnagyobb mennyiségű anyag megőrzése érdekében megvizsgálják, mely darabok hasznosíthatók újra és melyek szorulnak javításra. Mivel ezeket az ellenőrzéseket olyan eljárásokkal kellett elvégezni, amelyek nem befolyásolják az anyagokat, roncsolásmentes módszereket alkalmaztak.

A roncsolásmentes vizsgálatokat 1945 óta egyre szélesebb körben kezdték el használni a gyártóiparban, új technikákat fejlesztettek ki az egyes eljárásokon belül, és újabb eljárásokat is kipróbáltak. Mindezek következtében e tevékenység rohamosan fejlődött és fejlődik, és jelentősége ma már megkérdőjelezhetetlen a gyártási folyamatok minőség-ellenőrzésében csakúgy, mint az ipari üzemek karbantartásaihoz kapcsolódó ellenőrzések során.

A roncsolásmentes vizsgálat csaknem minden ipari ágazatban a minőség-ellenőrzés és biztonság nélkülözhetetlen eszközévé vált. Ezen felül fontos szerepet játszik a termelési költségek csökkentésében



és az alkatrészek működésének biztosításában. Az embereket, az anyagokat és a környezetet érintő károsodásokkal járó balesetek elkerülése érdekében különböző vizsgálati eljárásokat alkalmaznak, például radiográfia, ultrahangos vizsgálat, termográfia, valamint optikai, elektromos és mágneses módszerek. A repülőgépek felszállása, a nagysebességű vonatok közlekedése, a biztonságos autók gyártása, hidak megépítése, vagy egy ipari üzem teljes körű üzemeltetése lehetetlen lenne roncsolásmentes vizsgálatok nélkül.

Az "új megközelítésű" direktívák, vagyis azok az Európai Uniós irányelvek, amelyek meghatározzák az EU területén értékesített termékek biztonságát, ma már megkövetelik a roncsolásmentes vizsgálat képzett szakemberek által történő alkalmazását. Ide tartozik például a nyomástartó edényekre vonatkozó irányelv. A követelményt rövidesen további, EU-szintű, egyes mechanikai eszközökre vonatkozó irányelvekbe is átemelik (munkagépek, gázzal működő szerkezetek, stb.).

1.4. TERMINOLÓGIA

A szakkifejezések helyes használata érdekében feltétlenül javasolt az alábbi szabványok elolvasása és alkalmazása:

MSZ EN 1330 Roncsolásmentes vizsgálat. Fogalommeghatározások

- Az általános fogalmak listája.
- A roncsolásmentes vizsgálati eljárások közös fogalmai.
- Az ipari radiográfiai vizsgálat fogalmai.
- Ultrahangos vizsgálatok szakkifejezései.
- Örvényáramos vizsgálat fogalmai (visszavont).
- A mágnesezhető poros vizsgálatban használt fogalmak.
- A tömörségvizsgálat fogalmai.
- Az akusztikus emissziós vizsgálatok szakkifejezései.
- A szemrevételezéses vizsgálat fogalmai.
- A sokkristályos és amorf anyagok röntgen-diffrakciójának fogalmai.

MSZ EN ISO 12706	Roncsolásmentes vizsgálatok. Folyadékbehatolásos vizsgálatok.
	Szak-szótár
MSZ EN ISO 12718	Roncsolásmentes vizsgálat. Örvényáramos vizsgálat. Szakszótár
MSZ EN 16018	Roncsolásmentes vizsgálat. Terminológia.
	A fázisvezérelt ultrahangos vizsgálatok szakkifejezései.



1.5. Alkalmazások

Az alkalmazási kör tekintetében a roncsolásmentes vizsgálat általában három nagy területre terjed ki:

1.5.1. Defektológia (Defektoszkópia, Hibakimutatás)

A heterogén anyagtartományok, folytonossági hiányok, stb. felderítése megfelelő ellenőrzés segítségével a termékek gyártása folyamán, a további költséges eljárások elkerülése érdekében. A potenciális hibák előjeleinek kiszűrése üzemelés közben, azok tényleges bekövetkezését megelőzően.

A javítások végrehajtása érdekében nagyon fontos ismerni a folytonossági hiányok eredetét a műszaki, gyártási, felhasználási és üzemeltetési területen. Nagy jelentőségű a hatékony együttműködés a kutatást végző metallurgiai szakemberek, a hibák felderítéséért felelős roncsolásmentes anyagvizsgálók és a munkadarab megfelelő működését biztosító műszaki szakemberek között.

A roncsolásmentes vizsgálati eljárások időszakos ellenőrzésén keresztül a minőségbiztosítás szintén kapcsolódik a defektológiához. Statisztikai elemzésekkel, szakértők segítségével kell megerősíteni, hogy a detektált eltérések, folytonossági hiányok valóban reálisak, és nem hamis indikációkból származó eredmények.

1.5.2. Anyagjellemzők meghatározása

A cél az anyagok kémiai, szerkezeti, mechanikai, stb. tulajdonságainak azonosítása.

Az anyagok tulajdonságai bizonyos esetekben RMV-módszerekkel is megállapíthatók, azonban figyelembe kell venni azt, hogy a szóba jövő módszerek összehasonlító jellegűek, ezért megfontolást és gondos előkészítést igényel az alkalmazásuk. Az alábbi két példa ad magyarázatot erre:

Anyagok osztályozása keménység szerint: Ha Rockwell- vagy Brinell-féle keménység pontos értékére van szükség, akkor legcélszerűbb a hagyományos keménységi vizsgálat elvégzése. Ha azonban azt kívánjuk igazolni, hogy a hőkezelés két meghatározott határérték közötti keménységet eredményez, akkor egy RMV-módszer, pl. kisfrekvenciájú örvényáramú jelek harmonikus elemzésén alapuló, bizonyulhat a leghatékonyabbnak, amely a vizsgálat gyorsaságának köszönhetően kisebb költséggel jár. Azonban néhány referenciamintán ellenőrizni kell a vizsgálati technika alkalmasságát, illetve kalibrációt kell végezni.

Anyagok osztályozása az elektromos vezetőképesség mérésével: Az örvényáramú elven működő vezetőképesség-mérő készülék – megfelelő kalibrálást és beállítást követően – megbízható értékeket ad.



1.5.3. Méretellenőrzés

A méretellenőrzés biztosítja azt, hogy a termékek teljesek, méretüket és alakjukat tekintve megfelelőek legyenek, és összeszerelésük a tervezett sorrend szerint elvégezhető legyen.

1.5.4. Ipari szektorok

A roncsolásmentes vizsgálat alkalmazása az alábbi ipari területeken a legelterjedtebb:

- metallurgia (gyártás közbeni vizsgálatok),
- hegesztés,
- autóipar (motorok, karosszéria, különféle alkatrészek),
- repülőgépipar (szerkezetek, futóművek, propellerek, turbinák, rakéták),
- építőipar (szerkezetek, hidak, nyomástartó berendezések, tartályok, liftkábelek, drótkötélpályák, felvonók),
- vezetékek (gázvezetékek, olajvezetékek),
- vasút (sínek, kocsik tengelyei és kerekei),
- tengerészet (tengeralattjárók, hajók, offshore létesítmények),
- ipari üzemek (erőművek, petrolkémiai üzemek, vegyipari üzemek, papír- és cellulózipari üzemek, ásványfeldolgozó üzemek, turbinák, hőcserélők, kazánok, stb.),
- szabadidőparkok és vidámparkok,
- élelmiszeripar,
- művészet.

1.5.5. A roncsolásmentes vizsgálat észszerű alkalmazása

Mivel ezek a módszerek lehetővé teszik a munkadarab vagy termék teljes egészének vizsgálatát, és annak teljes térfogatáról vagy felületéről szolgáltatnak adatokat, hozzájárulnak a termékek és a gyártás egységes minőségi szintjének fenntartásához. Ezen felül, az üzemelő rendszerek működéséhez vagy karbantartásához kapcsolódó roncsolásmentes vizsgálatok hozzájárulnak a működőképesség megállapításához, valamint az üzemzavarok és balesetek megelőzéséhez. Másfelől, közvetlen és közvetett gazdasági profitot is termelnek. Csökkentik a gyártási költségeket azáltal, hogy a gyártási folyamat egyes lépései során kiválogatják azokat a termékeket, amelyek a folyamat végén biztosan selejtezésre kerülnének (közvetlen profit), továbbá segítséget adnak a tervezés fejlesztéséhez és gyártás közbeni ellenőrzéséhez (közvetett profit).

A roncsolásmentes vizsgálat alkalmazásának sikere főként az alábbi követelmények teljesülésének függvénye:

A vizsgálat tegye lehetővé a folyamat alapvető lépéseinek megfelelő fejlesztését.



 A gazdasági tényezők figyelembevételével a vizsgálatokat a maximális teljesítmény és profit kritériumai szerint tervezzék meg és hajtsák végre.

A fentiek érdekében speciális, az adott problémára kifejlesztett vizsgálóeszközök alkalmazására van szükség.

1.6. A VIZSGÁLATOK FŐ LÉPÉSEI

A defektológiai, anyagjellemzési és méretellenőrzési feladatok esetében az anyagok, elemek, stb. roncsolásmentes módszerrel történő vizsgálatának lényege a belső minőség biztosítása, amely az alábbi négy lépést foglalja magába:

- a megfelelő módszerek és technikák kiválasztása,
- indikációk gyűjtése (adatgyűjtés),
- indikációk értelmezése,
- indikációk értékelése.

1.6.1. A megfelelő módszerek és technikák kiválasztása

A helyes választás érdekében fontos figyelembe venni az anyag természetét, szerkezetét és a termék alakját, valamint ismerni kell a kimutatni kívánt heterogenitások típusait. Figyelembe kell venni, hogy minden módszernek vannak korlátjai az anyag természete és geometriája, a vizsgálati terület és a vizsgálat által lehetővé tett alkalmazási sebesség miatt.

Mivel minden módszer korlátozott érzékenységű, esetenként eltérő, hogy az adott vizsgálat elvégzésére alkalmasak-e vagy sem, ezért pontosan meg kell határozni a vizsgálathoz szükséges érzékenységi és tűréshatárokat, és a termékre vonatkozó minőségi és elfogadási követelményeket.

1.6.2. Indikációk gyűjtése

A roncsolásmentes vizsgálati módszerek általános jellemzője az, hogy közvetett eljárások, vagyis a munkadarabok keresett tulajdonságait más, kapcsolódó tulajdonságokon keresztül határozzák meg. A heterogenitások (inhomogenitások) felderítése, azaz a megfelelő indikáció észlelése függ a heterogenitás természetétől (folytonossági hiány, zárvány, stb.), alakjától (gömbszerű, egyenes vonalú, pontszerű, stb.), helyzetétől (felületi, belső), irányától és méretétől.

Az anyag heterogenitására vonatkozó indikáció létrehozásához minden módszer esetében ismerni kell a darab tulajdonságait, a potenciálisan megjelenő (várható) heterogenitásokat és a különböző technikák segítségével kimutatható heterogenitásokat.



1.6.3. Az indikáció értelmezése

Indikáció esetén alapvetően fontos. hogy azt pontosan értelmezzék, azaz ismerni kell a detektált jel és a különféle heterogenitások természete, alakja, helyzete, iránya és mérete közötti összefüggéseket. Ezeket az összefüggéseket (referencia) próbatesteken elvégzett előzetes vizsgálatokkal, illetve kalibrációval kell megállapítani.

1.6.4. Értékelés

Végül, az indikáció érzékelését és értelmezését követően kerül sor az értékelésre – más szóval a döntéshozatalra – azzal kapcsolatban, hogy az indikáció – lényegében a mögötte álló folytonossági hiány, eltérés – elfogadható-e vagy sem. Az indikációk értelmezése a roncsolásmentes anyagvizsgáló feladata, míg az értékelési kritériumok a műszaki osztály felelősségi körébe tartoznak. Ez a szakértői csoport analizálja az üzemi terhelésre és működési feltételekre vonatkozó adatokat és határozza meg a kritikus szakaszt, szerkezeti elemet, zónát – megbízhatósági szinteket rendelve mindegyikhez – és rögzíti a minőségi szintet, azaz az elfogadási, illetve elutasítási kritériumokat.

Annak érdekében, hogy az értékelés egyértelmű és hibátlan legyen, a vizsgálat eme lépését pontosan meg kell határozni és rögzíteni kell.

A következő alfejezet a klasszikus roncsolásmentes eljárásokba nyújt rövid betekintést.

1.7. HAGYOMÁNYOS RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI ELJÁRÁSOK

1.7.1. Vizuális vizsgálat

Ez a legelterjedtebb eljárás, bár sokszor nem is vagyunk tudatában, amikor alkalmazzuk. A vizuális vizsgálat (VT) a vizsgálati tárgy szabad szemmel, vagy egyszerű optikai eszközökkel történő szemrevételezését jelenti.

A vizuális vizsgálat számos probléma megoldását teszi lehetővé a legkülönbözőbb iparágakban és más roncsolásmentes eljárásokhoz kapcsolódva elsődleges szerepe van az adatgyűjtésben. Használható az anyag bármilyen vizsgálata előtt, ezáltal lehetővé teszi a nyilvánvalóan hibás darabok közvetlen kiselejtezését és a lényegtelen szabálytalanságok azonosítását, amelyek növelhetik a hamis indikációk számát.

Az eljárás az alábbiak alapos ismeretét igényli:

- a szem és a látás mechanizmusa,
- a látás pszichológiája, különös tekintettel a kifáradásra,
- az érzékelés és színlátás elmélete,



- megvilágítás mérése és értékelése az elvégzendő vizsgálat alapján,
- vizsgálati segédeszközök (nagyítók, endoszkópok, TV rendszerek, stb.).

A szemrevételezés tipikus célja, többek között, a felület állapotának felmérése, a kapcsolódó felületek illeszkedésének, a munkadarab felületi védelmének, a varrat megfelelőségének ellenőrzése, vagy az esetleges szivárgások észlelése.

1.7.2. Folyadékbehatolásos vizsgálat

A folyadékbehatolásos – idegen szóval folyadékpenetrációs – vizsgálat (PT) olyan folyadék alkalmazásán alapul, amely – speciális fizikai és kémiai tulajdonságainak köszönhetően – a vizsgálati felületet nedvesíti, azon szétterül. Ez lehetővé teszi, hogy érvényesüljön a kapilláris hatás, azaz a folyadék behatoljon a felületre nyitott folytonossági hiányokba, és azokban a felületen lévő, fölösleges folyadék eltávolításakor is benne maradjon. Csaknem minden esetben az előhívószer segítségével jelzi a felületen azokat a zónákat, ahol folytonossági hiányok találhatók.

A vizsgálathoz behatoló folyadékra (úgynevezett jelzőfolyadékra), a felesleges behatoló folyadék eltávolítására alkalmas lemosó szerre, valamint ultraibolya fényforrásra (fluoreszcens módszer) vagy előhívószerre (színkontrasztos módszer) – amelyek a felületre nyitott folytonossági hiányokról látható indikációkat szolgáltatnak – van szükség.

A behatoló folyadékok alkalmazási köre a gyártóipar és karbantartás minden olyan területére kiterjed, ahol fémes vagy nem fémes anyagok felületi repedéseit vagy pórusait kell detektálni. A repedésvizsgálat egyetlen feltétele az, hogy a felület ne legyen porózus.

Fontos meghatározni azokat a tényezőket, amelyek befolyásolják a jelzőfolyadéknak a repedésekbe történő bejutását. A legfontosabbak a következők:

- bármilyen típusú mechanikai akadály jelenléte (mivel ezek fizikailag korlátozzák a folyadék behatolását vagy megváltoztatják a repedés alakját, csökkentve annak méretét),
- felületi takarások és szennyező anyagok,
- a repedés alakja,
- a behatoló folyadék felületi feszültsége,
- adalékanyagok és szennyező anyagok a behatoló folyadékban,
- a vizsgálandó darab és a behatoló folyadék hőmérséklete,
- a vizsgálat helyszínén uralkodó légnyomás,
- a repedés belsejének érdessége.

Az 1.1. ábra az eljárás általános műveleti sorrendjét mutatja.







1.7.3. Mágnesezhető poros vizsgálat

A mágnesezhető poros vizsgálatnál (MT) a ferromágneses anyagon áthaladó mágneses mező szóródását használjuk ki. Ha a darabot (elektro)mágneses térbe helyezzük, és vastartalmú port szórunk rá, akkor a porszemcsék összegyűlnek azokban a zónákban, ahol folytonossági hiányok vannak, mintegy fémhidat alkotva az anyaghiány megszüntetése érdekében. A vizsgálat a következőkön alapul:

- Ha ferromágneses anyagot mágneses térbe helyezünk, illetve felmágnesezünk, akkor az anyagban jelen lévő folytonossági hiányok eltorzítják az erővonalakat.
- Ha a folytonossági hiány felületközeli vagy felületre nyitott, akkor az erővonalak egy része kilép a felszínen, ott úgynevezett szórt mágneses mező alakul ki.
- Ha a felületre mágnesezhető részecskéket helyezünk, akkor a szórt mágneses mező egy részüket vonzani fogja, létrejön az indikáció, ami követi a folytonossági hiány felületi rajzolatát.
- Ha a folytonossági hiány síkja párhuzamos az eredeti erővonalakkal, akkor nem lesz érzékelhető szórt mágneses mező, és nem jön létre indikáció.



A mágnesezhető poros vizsgálat a ferromágneses (mágnesezhető) anyagokban lévő, felületi vagy felület közeli folytonossági hiányok kimutatására szolgál. (Megjegyzés: Ferromágneses anyag például a vascsoport három eleme és azok ötvözeteinek nagy része, így a legfontosabb szerkezeti anyagok, az acélok többsége is.) Ez az egyik leggyorsabb és leggazdaságosabb roncsolásmentes eljárás, az előbb említett folytonossági hiányok detektálásának nagyon érzékeny eszköze. Az 1.2. ábra az eljárás általános műveleti sorrendjét mutatja.





Alkalmazható nyersanyagok (például bugák, rudak, profilok) és kész alkatrészek esetében, alakítási, hőkezelési, forgácsolási és galvántechnikai eljárások során az anyaghoz, gyártási folyamathoz és üzemeléshez kapcsolódó folytonossági hiányok feltárására.

A fejlesztéseknek köszönhetően a módszer alkalmazási köre napról napra növekszik. Kiterjed a hegesztési varratok és nyomástartó berendezések vizsgálatától kezdve a fémipari ágazatokban tömegesen vagy gépesítetten gyártott darabokig. Nélkülözhetetlen az autóipar nagy biztonsági követelményű termékei (szelepek, hajtórudak, befogók, fogaskerekek, stb.) ellenőrzéséhez, a hajóiparban (forgattyúk, szelepek, fogaskerekek), a repülőgépiparban (turbinatengelyek, futóművek, hajtórudak), a vasúti karbantartásban (tengelyek, kerekek) és egyéb ágazatokban.

1.7.4. Örvényáramos vizsgálat

Ha vezetőképes anyag közelében váltakozó áram folyik, akkor abban indukált áram keletkezik, amely az anyag minősége, vastagsága és homogenitása függvényében oszlik el. Ez az úgynevezett örvényáram-eloszlás maga is képes egy másik vezetőben (tekercsben) további áramot indukálni, amelynek jellemzőit a primer áram és az anyag paraméterei határozzák meg.

Az örvényáramos vizsgálat (ET) készüléke megfelelő frekvenciájú elektromos impulzusokat kibocsátó generátort tartalmaz, amelyhez egy vagy több, a vizsgált anyagban örvényáramot indukáló tekercs csatlakozik. Az örvényáram alapesetben további egy vagy két tekercsben kelt elektromos feszültséget, amit a készülék felerősít, így az oszcilloszkóp segítségével vagy digitális képernyőn megjeleníthető.

A tekercsek általában egyetlen egységet alkotnak, amit szondának neveznek, és amit az anyagra helyeznek, vagy bevezetik a cső belsejébe, vagy aminek a belsejébe helyezik az anyagot. A vizsgálat minden esetben összehasonlító jellegű, és ismert jelmintákat igényel, amelyekhez a szonda válaszjele hasonlítható.

Számos alkalmazása van, többek között:

- anyagok elektromos vezetőképességének mérése,
- fémek és ötvözetek jellemzőinek meghatározása,
- hőkezeléssel létrehozott anyagállapot ellenőrzése,
- fémes anyagok osztályozása kémiai elemzések nélkül, vashulladék válogatása,
- fémalapon lévő fémes és nem fémes bevonatok vastagságának mérése,
- hőkezeléssel kialakított réteg vastagságának mérése,
- nem fémes alapon lévő fémbevonatok vastagságának mérése,
- egyéb módszerekkel kimutatott repedések mélységének mérése,
- felületi és felület közeli folytonossági hiányok kimutatása.

1.7.5. Radiográfiai vizsgálat

A tárgyon lévő külső és belső szabálytalanságok által létrehozott árnyékkép fényérzékeny filmre rögzítése. Az árnyékkép létrehozásához három elem szükséges: sugárforrás, tárgy és film, amelyek elrendezése nem lehet véletlenszerű: a tárgynak a sugárforrás és a film között kell elhelyezkednie, amint azt az 1.3. ábra mutatja.



1.3. ábra. A radiográfiai eljárás működési elve



zonas oscuras = sötét zónák

A radiográfiai eljárás (RT) bizonyos elektromágneses – ionizálónak vagy áthatolónak is nevezett – sugárzások alábbi tulajdonságain alapul:

- képesek áthatolni a látható fény számára átlátszatlan tárgyakon,
- képesek kémiai reakciókat kiváltani fényérzékeny anyagokban,
- egyenes vonalban terjednek,
- ionizálják a gázokat,
- károsítják az élő anyagot.

Az ipari röntgensugárzás forrásai a röntgenberendezések és a radioaktív izotópok (192Ir, 60Co, stb.), amelyek 10 nm-nél kisebb hullámhosszúságú elektromágneses hullámokat bocsátanak ki.

A filmek átlátszó acetát fóliából és a rajta lévő fényérzékeny anyagemulzióból állnak. Ezeken a sugárzás hatására lenyomat képződik, ami kidolgozást igényel (előhívás és rögzítés), és ennek eredményeként a kép láthatóvá válik.

A filmet közvetlenül a vizsgálandó tárgyra kell illeszteni, vagy a tárgyat kell a filmre helyezni. Az átsugározni kívánt anyag vastagsága és fajtája, valamint a feltárandó folytonossági hiány típusa és mérete határozza meg az alkalmazandó vizsgálati technikát.

Az eljárásnak több változata létezik, amelyek közül a következőket érdemes kiemelni:

- Fluoroszkópia: A képalkotás egy sóréteggel bevont ernyőn történik, ami a kapott sugárzás függvényében fényt bocsát ki, és amely fény képerősítő segítségével valós időben egy TV képernyőn láthatóvá válik.
- Digitális radiográfiai: Ugyanazt az elvet követi, mint a hagyományos módszer, azzal a különbséggel, hogy ez esetben a képet elektronikus érzékelők – melyeket a sugárzás aktivál – pontonként (pixelenként) állítják össze. Ezek az érzékelők később törölhetők, lehetővé téve a többszörös felhasználást. A kép digitálisan tárolható és megfelelő szoftver segítségével kezelhető, akár elektronikus levél formájában is továbbítható, lehetővé téve a távoli kiértékelést.



A radiográfiai vizsgálat bármilyen típusú anyag (fémek, kerámiák, szövetek, műanyagok, kompozit anyagok, stb.) esetében alkalmazható. Felhasználható folytonossági hiányok felderítésére, összeszerelések ellenőrzésére, a belső állapot vizsgálatára és egyéb célokra.

1.7.6. Ultrahangos vizsgálat

Az ultrahang ugyanolyan jellegű akusztikus hullám, mint a hallható hang, a frekvenciája azonban 20 kHz feletti, így az emberi fül számára nem érzékelhető.

Az ultrahangos vizsgálat (UT) során a vizsgálandó anyagba rugalmas hullámot vezetnek és várják annak visszaverődését a darab hátsó faláról vagy valamilyen belső folytonossági hiány felületéről. A visszaverődő hangjelek, az echók, elemzése szolgáltatja a folytonossági hiányok helyének és méretének megállapításához szükséges információkat. Ez is összehasonlító jellegű vizsgálat, ami beállító testeket (ellenőrző testeket, referenciablokkokat) igényel. Az ezeken elvégzett, előzetes vizsgálatsorozat teszi lehetővé azt, hogy később a kapott jelekből a megfelelő következtetéseket vonhassuk le.

Az ultrahang echók tipikus megjelenési formája a vizsgálókészülék képernyőjén látható jel (1.4. ábra). A jelablak alapvonala – a képernyő alsó részén elhelyezkedő vízszintes vonal – a visszaverő felület (a reflektor) távolságát mutatja meg, míg a jel amplitúdója vagy magassága az adott reflektor okozta hangnyomásról ad információt.

A hagyományos vizsgálókészülék tehát képernyőn jeleníti meg az indikációt, és vizsgálófej csatlakozik hozzá. Ez a készülék olyan elektromos impulzusokat bocsát ki, amelyek aktiválják a fejben található, általában piezoelektromos, elemeket. A fejek érintkeznek a vizsgálati tárggyal (a levegőt valamilyen csatolóközeg, például gél, olaj, cellulóz paszta szorítja ki) és, az elektromos energiát mechanikai energiává alakítva, akusztikus hullámot bocsátanak ki. Amikor a visszaverődő hanghullám eléri az aktív elemet, a mechanikai energia villamos energiává alakul át, és a keletkező feszültség, a berendezés erősítőjén áthaladva, a képernyőn mint fénypont-kitérés válik láthatóvá. Jelenleg már léteznek olyan berendezések, amelyek másféle – a folytonossági hiány valós képéhez közelebb álló és darabbeli helyzetét érzékletesen bemutató – megjelenítést is lehetővé tesznek.



1.4. ábra. Az ultrahangos vizsgálat elvi alapja



Az ultrahangos vizsgálati technikák általában bármilyen anyag esetében (fém, műanyag, fa, üveg, kerámia, stb.) alkalmazhatók, azonban minden anyag más-más frekvenciát igényel, ami a vizsgálat elvárt érzékenységétől (a legkisebb kimutatandó folytonossági hiányok méreteitől) és az anyag tulajdonságaitól függ. Így nagykristályos szerkezetű anyagok esetén kis frekvencia szükséges, míg a finomszemcsés anyagok nagyobb frekvenciával is vizsgálhatók.

Ultrahang segítségével az alábbi vizsgálatok végezhetők el:

- méretellenőrzés például vastagság mérése nyomástartó berendezéseken, hajótesteken,
- anyagjellemzők meghatározása kihasználva, hogy kapcsolat van az ultrahang terjedési sebessége és a rugalmassági modulusz között,
- folytonossági hiányok kimutatása akár az anyag felszínén, akár a belsejében vannak a hiányok.

1.8. Egyéb eljárások

1.8.1. Infravörös termográfia

Infravörös termográfiával a vizsgált objektum felületén kialakult hőeloszlás képét hozzuk létre. Az eljárás lehetővé teszi valós idejű hőtérkép elkészítését, amely a vizsgált tárgy hőmérsékleteloszlását színek segítségével ábrázolja.

A termográfia a hőátadás egyik válfajára, a hőmérséklet függvényében változó hősugárzásra épül, ezért nincs szükség mechanikai kontaktusra a vizsgálandó objektum és a mérőeszköz között, és nem kell a hőmérséklet beállására sem várni. Tehát elvégezhető a mérés olyan helyzetekben is, amikor az hagyományos hőmérőkkel lehetetlen lenne.

A termográfiai érzékelőket úgy tervezik, hogy azok a felületről kibocsátott, 3 és 13 µm közötti hullámhosszúságú infravörös hullámokat nyeljék el. A vizsgálat azon a tényen alapul, hogy minden test bocsát ki úgynevezett hőmérsékleti sugárzást – ezen belül infravörös sugárzást is – amelynek intenzitása egyenesen arányos a testfelszín abszolút hőmérsékletének negyedik hatványával (Stefan-Boltzmann törvény).

A mérést befolyásoló tényezők a következők:

- a felület sugárzó képessége (emisszivitás).
- az aktuális környezeti hőmérséklet, a levegő hőmérséklete.
- a felület és az érzékelő közti távolság.
- relatív páratartalom.

A termográfia alkalmas berendezések hőforrásainak a kimutatására, például szigetelések hőszivárgásainak és elektromos zárlatok megtalálására, fűtési körök és forró víz helyének meghatározására, a páratartalom érzékelésére, hőenergia-veszteségek mennyiségének meghatározására, hőcserélők működésének elemzésére, üledékszint mérésére, motorok működésének elemzésére és jégtelenítő rendszerek hatékonyságának ellenőrzésére.



Aktív és passzív technika is használható. Az előbbinél fel kell melegíteni a vizsgált testet és monitorozni a lehűlést, azaz a betáplált hő eltűnését a felületen, amit a felületközeli tulajdonságok befolyásolnak. A passzív termográfia elnevezés azokra a vizsgálatokra utal, amelyekben nem alkalmaznak külső fűtést vagy hűtést ahhoz, hogy a vizsgált tárgyban hőáramlást idézzenek elő. Passzív termográfiát használnak például gyártási folyamatokban a termék ellenőrzésére, hegesztési eljárásokban, vagy az autók féktárcsáinak teljesítmény-ellenőrzése során. A megelőző karbantartásban szintén alkalmazható, például csapágyak, turbinák, kompresszorok, elektromos berendezések, földalatti csővezetékek vagy gázszivárgások vizsgálatára.

1.8.2. Akusztikus emissziós vizsgálat

A módszer alapelve az anyag által – helyi feszültség, alakváltozás, repedés keletkezése vagy terjedése következtében – kibocsátott akusztikus hullámok érzékelése.

Tranziens hanghullámokról van szó, amelyek akkor keletkeznek, ha az anyag belsejében gyors energiafelszabadulás zajlik le. Ezek a hangok átlagos rugalmasságú közegekben terjednek, a hallható hangokénál nagyobb frekvencián, és nagy érzékenységű, speciális piezoelektromos detektorokkal észlelhetők.

A jelenség alapja a vizsgálati darabon belüli feszültség eloszlásának megváltozása, ezért dinamikus vizsgálatról beszélhetünk, melynek során a szerkezeti elemeket az üzemelő rendszerben időszakosan fellépő terheléseknek vetik alá (például tartály próbanyomása).

Az energiaáramlást maga a vizsgálat alá helyezett anyag generálja, ezért ez az eljárás nagyon hasznos valós idejű jelenségek vizsgálatakor, mint például mikrorepedések keletkezése, repedések növekedése, stb. Több érzékelő együttes alkalmazásával, valamint háromszögelési algoritmussal és a kapott jelerősség elemzésével a hangforrások lokalizálhatók is.

1.8.3. Tömörségvizsgálat

Ha átmenő anyagfolytonossági hiány jön létre két különböző nyomású környezetet egymástól elválasztó tartály falán, akkor a nagyobb nyomású oldalról folyadék vagy gáz juthat át a kisebb nyomású környezetbe, a nyomáskülönbség négyzetgyökével arányos sebességgel.

A tömörségvizsgálat többféle technikával is elvégezhető, sok esetben a helyszínen, üzemi körülmények között hajtható végre, például nyomástartó berendezéseken és vákuumkamrákon. Az alkalmazott technikák a zárt vagy nyomás alatt tartott térrészből kiszivárgó gáz vagy folyadék észlelésén alapulnak. A vizsgálathoz felhasznált gáz lehet a tartályban lévő töltet vagy a tartályba bevezetett jelzőgáz (ami rendszerint hélium). Az észlelő eszköz lehet megfelelő gázdetektor, tömegspektrométer, valamint folyadékkal töltött edény, melyben buborékok jelenhetnek meg, vagy nyomásmérő, ami a tartály belső vagy külső felületére helyezett, szigetelt kamrában létrehozott vákuum esetleges romlását mutatja ki. Leürített tartály esetén jelzőfolyadék is használható. Ez a technika teljes egészében a folyadékbehatolásos el-



járásra épül. Folyadékkal feltöltött tartály esetén viszont, bizonyos körülmények között, a kiszivárgó folyadék turbulenciája szélessávú zajt kelt, ami speciális frekvenciákra hangolt jelátalakítóval érzékelhető.

A szivárgások helyei különböző módszerekkel határozhatók meg:

- víz alá merített darabból kilépő buborékok megfigyelésével,
- a felületre felvitt, a (jelző)gázra érzékeny, specifikus előhívószerrel,
- a (jelző)gázra érzékeny, specifikus detektor elektromos jeleit a felszín végigpásztázása közben elemző készülékkel.

1.8.4. Nyúlásmérés

Az MSZ EN ISO 9712 szabványban is említett nyúlásmérést (ST) úgynevezett nyúlásmérő bélyegek által adott elektromos feszültség megváltozásának mérésével végzik. Ha a tárgyat feszültségnek tesszük ki, az hatással van a tárgy felületére ragasztott nyúlásmérő bélyegre, megváltoztatja annak elektromos ellenállását, amelyet a hozzáillesztett mérőeszköz kimeneti feszültségváltozásként érzékel.

1.9. FEJLETT TECHNIKÁK

Számos tudományos munka születik új és hatékonyabb vizsgálati technikákkal kapcsolatban, nagy részük egyetemeken, kutatóközpontokban, vagy nemzetközi projektek keretein belül, különböző országok tudományos konzorciumaival együttműködésben. Sok olyan tanácsadó cég is működik, amely erre a területre specializálódott, és több fontos szervezet fejleszti a roncsolásmentes vizsgálati módszereket saját kutatásaival. Emellett a berendezések gyártói is folyamatosan fejlesztik technológiájukat és új alkalmazásokat vezetnek be a vizsgálatokba.

Egyes országok nemzeti RMV-szervezetei (pl. a magyar RMV-szervezet, a MAROVISZ), és azok nemzetközi testületei, mint az európai (EFNDT) és az egész világot átfogó nemzetközi szövetség (ICNDT) rendszeresen tartanak konferenciákat, ahol bemutatják az új fejlesztéseket. Hasonlóképpen, a nemzeti RMV szervezetek is rendszeresen jelentetnek meg szakcikkeket tartalmazó folyóiratokat.

Több új, nagy kapacitású ultrahangos vizsgálati módszer vált elérhetővé az utóbbi évtizedekben bekövetkezett informatikai fejlesztések révén. Néhány technológia – mint például a komputertomográfia (CT) –, nagymértékben az egészségügyi szektorhoz kötődik, míg mások – például az akusztikus mikroszkópia –, az elektronikai iparban a szilárdtestek állapot-vizsgálatánál terjedt el. Megfontolandó, hogy milyen ipari vizsgálati feladatoknál kell, illetve érdemes bevetni ezeket a technikákat, figyelembe véve, hogy könnyen használható, jó vizsgálati sebességet biztosító és elfogadható árú eszközökre van szükség.

Az alábbiakban néhány fejlett technika leírása következik, amelyek egyike-másika napjainkra már jelentős ipari alkalmazást nyert.



1.9.1. Valós idejű radiográfia

A valós idejű radiográfiai alapelve a sugárzás valós idejű átalakítása számítógép képernyőjén megjeleníthető képpé. A sugárzás által létrehozott kép megjelenítésének film előhívásán alapuló módszerét mára felváltotta egy új technika, amely szenzorok segítségével alakítja át a bejövő sugárzást képernyőn megjeleníthető és kezelhető elektromos jelekké.

1.9.1.1. Fluoroszkópia

A fluoroszkópiát jellemző alapvető különbség az, hogy a filmet egy speciális sóval bevont ernyő helyettesíti, amely fényt bocsát ki a beérkező sugárzás intenzitásának függvényében, és amely fényt egy képerősítő cső felerősíti, így a kép valós időben láthatóvá válik egy TV képernyőn. A leggyakrabban használt só a cinkszulfid (ZnS). A hagyományos radiográfiával ellentétében, a képernyőn pozitív kép jön létre. A sugárzás intenzitása és a fényerősség között széles tartományban egyenes arányosság áll fenn.

1.9.1.2 Komputerradiográfia (CR)

Az orvostudomány és a biológia területén már 20 éve alkalmazzák ezt a módszert, amelynél a filmet foszforlemezekkel helyettesítik. Az utóbbi időben a roncsolásmentes vizsgálatokban is használható rendszerek születtek. Jelenleg azonban ezek a technikák még nem képesek teljes mértékben helyettesíteni a hagyományos radiográfiát. Az új alkalmazási területek viszont egyre inkább elérhetővé válnak, mivel a nagy érzékenységű foszforlemezek jelentősen lerövidítik az expozíció idejét és az eredmények feldolgozása közvetlenül digitális formában történik.

A foszforlemezek – melyek már csak nevükben emlékeztetnek az eredetileg használt fényérzékeny anyagra –, rugalmas polimer filmre felvitt, sugárzásra érzékeny bárium-fluorobromid (BaFBr) rétegből állnak, amit egy, a mechanikai károsodásoktól védő réteggel borítanak be. A foszforlemezek expozíciója a radiográfiai filmekéhez hasonló. A felvételből nyert információkat lézerkészülék olvassa ki, az eredmény pedig számítógép képernyőjén jelenik meg. Nincs szükség kémiai beavatkozásra, és az eredmények azonnal rendelkezésre állnak. Egy-egy lemez kb. 1000 alkalommal használható jelentősebb minőségromlás nélkül.

1.9.1.3. Digitális radiográfia (DR)

A digitális radiográfia ugyanazt a technikát alkalmazza, mint a hagyományos, azzal a különbséggel, hogy a képalkotás módja más. Elektronikus elemek aktiválódnak a sugárzás hatására, melyek kiolvasás után többször újra használhatók. A képeket digitális adathordozó tárolja, amely informatikai rendszerrel kezelhető, így az adatok bármikor rendelkezésre állnak, e-levélben továbbíthatók, ezáltal lehetőség nyílik a távoli kiértékelésre.



A digitális radiográfiában használt technológiák, az érzékelők típusa szerint:

- CMOS-ra (komplementer fém-oxid félvezetőre) épülő,
- intrinszik foszforos,
- közvetlen fotokonduktoros (fényvezetős),
- szcintillációs.

1.9.2. Korszerű ultrahangos módszerek

1.9.2.1. Fázisvezérelt vizsgálat

A hagyományos ultrahangos berendezés egyetlen (vagy kettő) piezoelektromos elemet tartalmaz, míg a fázisvezérelt technika több elemet használ. Mindegyik piezoelektromos elemet elektromos impulzusok vezérelik egymástól függetlenül, eltérő fázisban, ezáltal az egyedi hullámok úgy vezérelhetők, hogy azok különböző irányú ultrahangnyalábot alkossanak. Az egyes elemek aktiválása közötti megfelelő késleltetés – az egyedi nyalábok között kialakuló interferencia következtében – lehetővé teszi a beesési szög változtatását és fókuszált hullámfront létrehozását.

Az egyes elemek gerjesztése közötti késleltetési idő határozza meg a fókusztávolságot. Míg hagyományos készülék esetében a fókusztávolság adott fejtípusnál állandó, addig a fázisvezérelt technika módot ad a nyaláb alakjának és fókuszpontjának változtatására Ezzel optimalizálható a vizsgálat, mert a mindenkori vizsgált zónába irányítható az akusztikus energia (1.5. ábra). A dinamikus fókuszálás segítségével az energia ugyanazon a vizsgálaton belül különböző mélységekre koncentrálható. Ugyancsak lehetővé válik a beesési szög változtatása és a különböző szögből történő letapogatás a fej helyzetének változtatása nélkül.

A fázisvezérelt technika segítségével csökkenthető a vizsgálati idő, mivel kiküszöböli a mechanikai letapogatást, vagyis a fej előre és hátrafelé mozgatását, amelyet ebben az esetben a különböző elemek elektronikus vezérlése helyettesít. Ez a megoldás növeli a vizsgálat megbízhatóságát, mert megszünteti a fej mozgatásával járó csatolási veszteségeket.

1.5 ábra. A hagyományos és a fázisvezérelt ultrahangnyaláb összehasonlítása





11.9.2.2. Futásidő szóródásos (TOFD) módszer

A hagyományos ultrahangos módszerek többé-kevésbé a folytonossági hiány sík felszínéről szabályosan visszaverődő hangot használják fel. A TOFD-technikával a síkszerű folytonossági hiányok csúcsairól érkező, kis intenzitású jeleket detektálják, ezért a módszer érzékenysége kevéssé függ a folytonossági hiány síkjának irányától, és lehetővé válik a méretének pontos meghatározása. (TOFD a módszer angol nevének – time of flight diffraction – rövidítése.)

A diffrakció jelensége a 17. századtól kezdve, Grimaldi óta ismert; ő fedezte fel ezt a fényjelenséget. Ezt követően 1818-ban Fresnel mutatta be a Huygens-elv alapján, hogy ez a jelenség a fény hullámtermészetének a következménye. Ebből következően más hullámok, így ultrahang esetén is megfigyelhető. (Megjegyzés: A diffrakció elhajlást jelent. A TOFD-módszer címbeli magyar elnevezése azonban elfogadható, mert az elhajlás – több más jelenséggel együtt – a hullám adott közegbeli szóródására mint alapjelenségre vezethető vissza.)

A diffrakciót a klasszikus, kézi ultrahang technikában már használták, főleg repedések mélységének meghatározására. Az ezen alapuló TOFD-technikát Dr. Maurice Silk fejlesztette ki az 1960-as –70-es években nukleáris ipari használatra. Ezen a területen ugyanis – az alkatrészek biztonságának, a berendezések biztonságos üzemeltetésének érdekében – olyan vizsgálatokra van szükség, melyekkel az esetleges repedések megbízhatóan kimutathatók, és méretük kis bizonytalansággal megállapítható.

A TOFD-technika két, különálló, longitudinális hullámot kibocsátó szögfejet használ, egymással szembe állítva. Az egyik adóként, a másik vevőként működik, és ily módon az anyag teljes vastagságára kiterjed a vizsgálati tartományuk. A vizsgálat elrendezése az *1.6. ábrán* látható.



1.6 ábra. TOFD-vizsgálat folytonossági hiány jelenlétében (MSZ EN 583-6))

Adó / 2. Vevő / a) Felületi hullám / b) Felső él X Amplitúdó / Y Idő
c) Alsó él / d) Hátfal-visszhang / e) Folytonossági hiány

Az ultrahang impulzus kibocsátását követően a vevő által kapott első jel (a) az úgynevezett felületi (laterális) hullám, amely az anyag felületén halad. A (b) és (c) jel a folytonossági hiány élein szóródó (elhajló) hullámok jele, amelyek közül elsőként a felülethez közelebb eső éltől származó jel érkezik meg. A két jel közötti időkülönbségből nagyon pontosan meghatározható a folytonossági hiány mélységirányú kiterjedése.

Általában a TOFD-technikát tartják a legprecízebb ultrahangos módszernek felületre merőleges, síkszerű folytonossági hiányok mélységirányú kiterjedésének mérésére, valamint hegesztési varratok



repedéseinek kimutatására és méretezésére. A módszert széles körben alkalmazzák a petrolkémiai és a nukleáris iparban nyomástartó berendezések és csövek tompavarratainak vizsgálatára és gyakran használják szerkezetek integritásának vizsgálata során a kritikus hibaméret szerinti értékeléshez szükséges adatok megszerzésre.

1.9.2.3. Irányított hullámok

Az irányított hullámokkal történő vizsgálat olyan új technika, amely kis frekvenciájú (20 és 30 kHz közötti sávban lévő), az anyagban Lamb-féle lemezhullámokként terjedő ultrahanghullámokat használ. Ezek több száz méterre juthatnak el például egy csőfal mentén. A hagyományos ultrahanghoz képest alapvető különbséget jelent az, hogy míg annak nyalábja csak longitudinális vagy transzverzális hullá-mokból áll, addig az irányított hullámok terjedési módja sokféle lehet. Gerjesztésükhöz általában piezoelektromos fejet vagy EMAT-ot (elektromágneses akusztikus átalakítót) alkalmaznak. Ezeket a fejeket a vizsgálandó cső köré helyezik, így a cső nagyon hosszú szakasza megvizsgálható egyetlen pozícióból.

A cél olyan, gyors vizsgálat kifejlesztése volt, amellyel számszerűen meghatározható az anyag vastagságának eróziós vagy korróziós folyamatok következtében kialakult csökkenése. Az irányított hullámok alkalmazása lehetővé teszi a nem hozzáférhető részek vizsgálatát is gáz- és szénhidrogén vezetékekben, kábelekben, sínekben, pillérekben, stb. A módszert hosszú távú ultrahangos vizsgálatként (angol rövidítése LRUT) emlegetik.

1.10. Alkalmasság és korlátok

Általánosan elfogadott a különböző eljárások és módszerek összehasonlítása és egyesek kedvezőbb megítélése, illetve az előnyeik és hátrányaik számba vétele. A leghelyesebb, ha azt mondjuk, hogy minden eljárásnak, illetve módszernek megvan a maga specifikus alkalmazási területe, a hozzá tartozó előnyökkel és korlátokkal. Egyes módszerek kiegészítenek másokat. A roncsolásmentes anyagvizsgáló felelőssége eldönteni azt, hogy melyik módszert vagy különböző eljárások milyen kombinációját a legcélszerűbb alkalmazni az adott esetben.

Ha ugyanarra a problémára két vagy több módszer is alkalmazható, akkor azokat egyenrangúnak vagy redundánsnak nevezzük. Ha a módszerek önmagukban csak rész-információkat adnak, és a megoldás érdekében több módszert kell bevetni, akkor azokat kiegészítő módszereknek nevezzük. Az egyenrangú módszerek alkalmazása nyilvánvalóan növeli a vizsgálat biztonságát (igaz a költségét és idejét is), míg a kiegészítő módszerekkel kiterjeszthetjük a kimutatható folytonossági hiányok és eltérések körét.

A különböző eljárások előnyeit és korlátjait az 1.2. táblázat tartalmazza:





Atomerőműi Képzési Bázis

1.2. táblázat. Roncsolásmentes vizsgálati eljárások előnyei és korlátai

VIZUÁLIS VIZSGÁLAT		
ELŐNYÖK	KORLÁTOK	
Könnyen hozzáférhető Viszonylag egyszerű Bármilyen anyag esetén alkalmazható Lehetővé teszi a folytonossági hiányok pontos lokalizálását	Csak a felületi folytonossági hiányokat mutatja ki Képzett operátorokat igényel A folytonossági hiány mélységének megállapítá- sát nem teszi lehetővé	
FOLYADÉKBEHATO	DLÁSOS VIZSGÁLAT	
ELŐNYÖK	KORLÁTOK	
Gyors Alkalmazása könnyű Nagy érzékenységű Hordozható Sokféle anyag esetén alkalmazható, a nagyon porózus anyagok kivételével	Csak a felületi folytonossági hiányokat mutatja ki Fennáll a szennyeződés kockázata A folytonossági hiány mélységének megállapítá- sát nem teszi lehetővé	
MÁGNESEZHETŐ POROS VIZSGÁLAT		
ELŐNYÖK	KORLÁTOK	
Gyors Alkalmazása könnyű Nagy érzékenységű Könnyedén mozgatható Pontosan meghatározza a folytonossági hiány hosszúságát	Csak ferromágneses anyagoknál alkalmazható Csak felületi és felületközeli folytonossági hiányo- kat mutat ki Fennáll a szennyeződés kockázata Remanens mágnesezettség marad vissza A folytonossági hiány mélységének megállapítá- sát nem teszi lehetővé	
ÖRVÉNYÁRAM	OS VIZSGÁLAT	
ELŐNYÖK	KORLÁTOK	
Nagy érzékenységű Nagyon sokoldalú Könnyedén mozgatható Nem igényel csatolóközeget Nagy vizsgálati sebesség érhető el	Csak felületi és felületközeli folytonossági hiányo- kat mutat ki Csak elektromosan vezető anyagok esetén alkal- mazható Sok paraméter változhat egyszerre Ferromágneses anyagoknál nehéz alkalmazni Referencia próbatesteket igényel	
IPARI RADIOGRÁFIA		
ELŐNYÖK	KORLÁTOK	
Dokumentált eredményt ad Értelmezése viszonylag egyszerű Az operátor alig befolyásolja Bármilyen anyag esetében alkalmazható Nagyon érzékeny a háromdimenziós folytonossá- gi hiányokra Többféle speciális technika létezik	Kétoldali hozzáférés szükséges Sík folytonossági hiányok kimutatására nem al- kalmas Fennáll a sugárzás kockázata Nagy vastagság esetén nehézségek A berendezések és a biztonság nagymértékű be- fektetést igényel	



ULTRAHANGOS VIZSGÁLAT		
ELŐNYÖK	KORLÁTOK	
Nagy áthatoló képességű Nagy érzékenységű A reflektor helyzetének pontos meghatározása	Alkalmazása nagy gyakorlatot igényel A vizsgálati technikák széleskörű ismerete szük- séges hozzá Durva, vékony vagy szabálytalan felületű darabo-	
Azonnali eredmény	kon nehezen használható	
Automatizálható	A felszínhez közeli folytonossági hiányokat nehe-	
A teljes térfogatot vizsgálja	zen érzékeli	
Nincs sugarzasi kockazat	Csatolóközeget igényel	
	Ellenőrző testeket igényel	

Az ipari anyagvizsgálatok köre nem korlátozódik a roncsolásmentes eljárásokra. Jól ismertek a sok helyütt alkalmazott mechanikai és az ugyancsak fontos szerepet betöltő kémiai analitikai – elsősorban spektroszkópiai – vizsgálatok. Bár ezek mind roncsolásos jellegűek és emiatt, magától értetődően, csak bizonyos számú, kivett mintán – azaz szúrópróbaként – végezhetők el, ugyanúgy nélkülözhetetlenek a gyártási folyamatok minőségbiztosításához és az üzemelő berendezések állapotának ellenőrzéséhez, mint a roncsolásmentes vizsgálatok.

1.11. Bevezetés az ultrahangos vizsgálatokba

1.11.1. Hallható és nem hallható hangok

A hang a részecskék rezgésének rugalmas (szilárd, folyékony vagy gáznemű) közegekben való továbbterjedése térben és időben. A hang vákuumban nem terjed, csak alakváltozásra képes, rugalmas közegben. A hanghullámok gyorsabban terjednek szilárd közegben, mint folyadékban és gázokban.

A hangvilla a két rezgő szára közötti levegőrészecskéket is rezgésbe hozza, ezáltal hallható hangot kelt (1.6. ábra).





1.6. ábra. Hanghullám – azaz térben és időben periódikus nyomásingadozás – keltése

A keletkező hullám frekvenciája (f) egyenlő az időegység alatti rezgések számával. A frekvencia mértékegysége a hertz (Hz). A hang frekvenciája meghatározza a hang magasságát, így különbséget teszünk kis frekvenciájú, mély hangok és nagy frekvenciájú, magas hangok között.



1.7. ábra. Hangfrekvencia – hangmagasság

Az emberi fül a levegő periodikus nyomásváltozását hangként érzékeli. Mint minden hullámot, így a hangot is két alapvető mennyiség jellemez: a frekvencia és az amplitúdó. Az emberi füllel érzékelhető hangok frekvenciatartománya: 20 Hz és 20 kHz között van. Az ennél kisebb frekvenciájú (f < 20 Hz) hanghullámokat infrahangnak, az ennél nagyobb frekvenciájú (f > 20 kHz) hangokat pedig ultrahangnak nevezzük.





1.8. ábra. Hallható és nem hallható hangok (balra) – Hangintenzitások (jobbra)

A hang intenzitását (a hanghullám amplitúdóját) – mivel nyomás jellegű mennyiség – pascalban (Pa = N/m²) mérjük. Az ultrahangos vizsgálatok esetében (és általában a hanghatásokkal foglalkozó tudományág, az akusztika területén) a hangintenzitások összehasonlítására a decibel-skálát használják. A decibel-értéket a következő képlet adja meg: dB = -20·log (I_1/I_2), amelyben az I-k az egyes intenzitásokat jelölik.

Az emberi fül sajátosságai miatt a hangérzékelés intenzitása mind a frekvenciától, mind a hangnyomás szintjétől függ. A fül úgy érzékeli a hanghullámokat, hogy azok megrezegtetik a dobhártyát, ami megmozgatja a középfülben lévő hallócsontokat (kalapács, üllő és járom), amelyek rezgését a belső fülben lévő, csontos csiga nevű hallószerv felerősíti. Ez a felerősített rezgés a belső fülben elektromos impulzusokká alakul, melyet a hallóidegek továbbítanak az agy felé (1.9. ábra).



1.9. ábra. Az emberi fül hallószervei



Az emberi fül érzékenysége csekély a nagyon kicsi és a nagyon nagy frekvenciájú hangokkal szemben. Azonban az 500 Hz és 3000 Hz közötti tartományban (az emberi beszédhangok frekvenciái) lényegesen nagyobb érzékenységet mutat. Így az emberi füllel nem hallható például a 70 dB akusztikus nyomású, 30 Hz-es hang, de az azonos akusztikus nyomású, 1000 Hz-es hang érzékelése nem okoz problémát (*1.10. ábra*).



1.10. ábra. Az emberi fül hallásküszöbje (zöld görbe) és fájdalomküszöbje (piros görbe)



Az ábrán két görbe látható: a hallásküszöbé és a fájdalomküszöbé. Hallásküszöb alatt a még éppen érzékelhető hangok minimális intenzitását értjük, fájdalomküszöb alatt pedig már nem elviselhető intenzitást. A görbék megadják a frekvencia függvényében azokat hangnyomás-szinteket, amelyeket az emberi fül azonos intenzitásúnak érzékel.

1.11.2. Az ultrahang érzékelése és alkalmazása

Az ember megtalálta a módját, hogy miként érzékelje a füllel nem hallható, nagy frekvenciájú ultrahangokat. Ma már léteznek olyan eszközök, melyekkel képesek vagyunk előállítani, szabályozni és detektálni ezeket a hanghullámokat: az úgynevezett piezoelektromos kristályok nagyfrekvenciás elektromos feszültség hatására mechanikai rezgést végeznek, azaz bennük hanghullámok keletkeznek, amelyek a környező közegben továbbterjednek, és ennek fordítottjaként, a kristályok a mechanikai nyomásváltozások sorozatát (a hanghullámokat) elektromos jellé tudják alakítani. Ezek a jelek aztán megfelelő elektromos berendezés segítségével megjeleníthetők. Így válik érzékelhetővé az ultrahang az ember számára is.

Amikor az előbb leírt módon keltett ultrahanghullámokat bevezetjük a vizsgálandó darabba, akkor a hang a munkadarab túlsó határfelületéről vagy egy belső anyagfolytonossági hiányról visszaverődik a piezoelektromos kristály felé, ami ezt a visszavert hullámot elektromos feszültséggé, feszültséget pedig a készülék elektronikája látható jellé alakítja. A visszaverődő hang tulajdonságait elemezve lehetőség van a hangot visszaverő anyagfolytonossági hiány (gyakori kifejezéssel: reflektor) jellemzésére is.



1.11. ábra. Az ultrahang visszaverődése a munkadarab hátfaláról (balra) és belső folytonossági hiányáról (jobbra)

Ezzel meg is mondtuk az ultrahang legfontosabb ipari alkalmazását. Lehetővé vált ugyanis az anyagok, alkatrészek belsejének vizsgálata szerkezetük megváltoztatása nélkül. Ahogy azt a további



fejezetek részletezik, az ilyen típusú vizsgálatok elvégzéséhez speciális elektronikus berendezésre, megfelelően képzett személyzetre és speciális – a vizsgálandó anyag, illetve alkatrész fajtájához illeszkedő – eljárások kidolgozására van szükség.

1.12. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

Ultrahangok előállításának módszerét először James Prescott Joule fejlesztette ki, miután 1847ben felfedezte a magnetostrikció jelenséget. Pierre Curie és testvére, Paul Jacques Curie 1880-ban, a piezoelektromosság felfedezésével újabb lehetőséget teremtettek. A Titanic 1912. évi katasztrófája után Richardson, angol matematikus és időjáráskutató professzor javasolta először, hogy a jéghegyek érzékélésére az ultrahangos technikát alkalmazzák. A II. világháború idején Franciaországban Chilowski és Langevin tengeralattjárók felderítésének céljára ultrahangos berendezéseket kezdtek kifejleszteni.

S. Y. Szokolov orosz fizikus elsőként javasolta az ultrahanghullámok használatát a fémekben lévő folytonossági hiányok detektálására. 1929-ben leírta néhány kísérletét, amelyek során fémes anyagokon, többek között öntöttvas és acél mintadarabokon is átmenő ultrahanghullámokat keltett. 1935-ben piezoelektromos átalakítókat tervezett ultrahanghullámok folyamatos keltésére és érzékelésére, valamint kifejlesztette azt a módszert, mellyel az ultrahangot be tudta vezetni a fémtestekbe. Piezoelektromos elemként kvarckristályt, a hangátvezetést biztosító csatoló közegként pedig higanyt használt.

A két világháború között főként Németországban és a Szovjetunióban alkalmazták ezt a módszert, de az akkori körülmények között kapott eredmények nem voltak kielégítőek. A II. világháború idején a folyamatos hullám által okozott probléma megoldására a kutatók mindkét oldalon az ún. impulzusvisszhang módszert vezették be, amelyet már alkalmaztak a szonárok esetében is. E rendszerben szabályos időközökben rövid idejű hangimpulzusokat bocsátanak ki, és a visszaverődő hangot ugyanilyen ritmusban érzékelik. Ezt a módszert 1942-ben D. O. Sproule fejlesztette ki Nagy-Britanniában és F. Firestone az USA-ban. Mindkét kutatást összehasonlították a Németországban folytatott tanulmányokkal.

Később C. Abrahams Nagy-Britanniában és a Krautkrämer fivérek – Josef és Herbert – Németországban kifejlesztette a TEN (Távolság–Erősítés–Nagyság) módszert. Ennek révén a folytonossági hiányok nagyságát úgy határozták meg, hogy jelüket ismert méretű reflektorok jeleivel hasonlították össze. Az USA-ban a reflektorokról érkező visszhangjelek értelmezésére a Távolság–Amplitúdó görbét (angol rövidítése: DAC) alkalmazták, ami szintén ismert reflektorok visszhangjeleivel való összehasonlításon alapul. Ezt tükrözi a magyarországi szaknyelvben meghonosodott elnevezése is: ÖRG, azaz Összehasonlító Reflektor Görbe.

1975-ben M. G. Silk publikálta először a futásidő szóródás mérésén alapuló (angol rövidítéssel: TOFD) módszert. Ehhez a munkadarab felületén elhelyezett, szögben sugárzó vizsgálófej-párt használnak, és mérik a reflektorok élein, csúcsain elhajló (idegen szóval: diffraktálódó) hang-hullámok kibocsátása és visszaérkezése között eltelt időt. Ez lehetővé teszi a reflektor alsó és felső szélének – s így mélység irányú kiterjedésének – pontos behatárolását.

Az 1970-es években az orvosi diagnosztikában, két évtizeddel később pedig az ipari anyagvizsgálatban megjelentek az első fáisvezérelt vizsgálóeszközök. Ezek több kristályból álló vizsgálófejekre és


az egyes kristályok által kibocsátott ultrahanghullámok interferenciájára épülnek. E technika jelentősen kitágította az ultrahangos vizsgálatok határait.

Napjainkra a digitális technológia, valamint az LCD képernyők alkalmazása számottevően csökkentette a vizsgáló berendezések méretét és súlyát.

1.13. Az eljárás alkalmazása, előnyök és korlátok

Egyik roncsolásmentes vizsgálati eljárás sem mindenható. Mindegyiknek megvannak az előnyei és a korlátjai. Ahhoz, hogy meg tudjuk állapítani, vajon az ultrahangos eljárás alkalmas-e egy adott munkadarab vizsgálatára, az alábbiakat kell figyelembe vennünk:

- a vizsgálandó darab geometriája,
- a darab anyagának minősége (kémiai összetétele, típusa),
- a vizsgálandó darab gyártási folyamata,
- a kimutatandó geometriai eltérések és folytonossági hiányok típusai,
- a folytonossági hiányok várható helye és orientációja,
- a vizsgálati terület hozzáférhetősége,
- a vizsgálandó darab felületének állapot,
- az alkalmazandó szabványok előírásai.

Az ultrahangos vizsgálatok előnyei az alábbiak:

- A vizsgálat egy alkalmasan megválasztott, hozzáférhető felületről elvégezhető.
- Kisebb eltérések, anyaghiányok is detektálhatók.
- A vizsgálat paraméterei szabályozhatók.
- A hullámfajták variálásával többféle módszer alkalmazására van lehetőség.
- Megfelelő eszközökkel magas hőmérsékletű darab is vizsgálható.
- Vastag és/vagy hosszú darabok vizsgálata is megoldható.
- Beszerelt alkatrészek, például tokozott csapágytengelyek, is vizsgálhatók.
- Van lehetőség az eltérések és anyaghiányok méretének a meghatározására.
- Mérhető a reflektorok mélységi elhelyezkedése is.
- Viszonylag gyors vizsgálat.
- lgen–nem jellegű vizsgálatokra is alkalmas.
- A vizsgálat reprodukálható.
- A vizsgálóeszköz legtöbb esetben könnyű és hordozható.
- Nem szükséges a munkaterület kiürítése (biztonsági szempontokból).



Meg kell említeni azonban az alábbi korlátokat is:

- Az anyagfolytonossági hiányok kimutathatóságánál döntő fontosságú azok orientációja.
- Az anyag szemcseméreténél kisebb hiányok kimutatására alkalmatlan.
- Vékony munkadarabok esetén előfordulhatnak zavaró tényezők.
- A munkadarab egyenetlen felülete csökkenti a vizsgálati érzékenységet.
- A vizsgálat eredményessége, gyorsasága nagy mértékben a vizsgáló gyakorlatán múlik.
- A vizsgálati eredmények értelmezéséhez elengedhetetlen a szakirányú képzettség és a vizsgálati gyakorlat.

1.14. Fogalommeghatározások

Azok részére, akik roncsolásmentes vizsgálatokkal foglalkoznak, az Európai Szabványügyi Bizottság (CEN) összeállított egy szabványsorozatot, ami – több nyelven – összefoglalja az ezen a területen leggyakrabban használt szakkifejezéseket. A sorozatból három szabvány tartozik ide:

- MSZ EN 1330-1: Roncsolásmentes vizsgálat. Fogalom-meghatározások.
 1. rész: Az általános fogalmak listája
- MSZ EN 13.30-2: Roncsolásmentes vizsgálat. Fogalommeghatározások.
 2. rész: A roncsolásmentes vizsgálati eljárások közös fogalmai
- MSZ EN 1330-4: Roncsolásmentes vizsgálat. Fogalommeghatározások.
 4. rész: Ultrahangos vizsgálatok szakkifejezései

A felsorolt szabványokat figyelembe kell venni a műszaki dokumentumok és az eljárásrendek (vizsgálati technológiák, illetve utasítások) kidolgozásakor, valamint a vizsgálati jegyzőkönyvek (jelentések) elkészítésekor.

 $\wedge \wedge$



Fizikai alapok

2.1. FIZIKAI DEFINÍCIÓK ÉS JELLEMZŐ PARAMÉTEREK

Bevezetés

2.

A hang nem más, mint anyagi részecskék mechanikai rezgésének rugalmas közegben való térbeli és időbeli továbbterjedése.

A közeg egyedi részecskéi helyzetváltoztatás nélkül egyénileg rezegnek, és ha kapcsolatuk a szomszédos részecskékkel elégségesen rugalmas, akkor azokat is rezgésbe hozzák. Ez lehetővé teszi a hangnak az adott közegben való továbbterjedését.

A közeg rugalmassági és mechanikai jellemzői, valamint a részecskék közötti kötés meghatározza az anyagban terjedő rezgés módjait. Nagy szilárdságú szerkezeti anyagokban, mint pl. az acélban, alumíniumötvözetekben, öntöttvasban, stb., jól terjed az ultrahang. A hangcsillapítás mértékének meghatározásában azonban az anyag metallurgiai állapota is fontos szerepet játszik [a szemcseeloszlást egy későbbi fejezet tárgyalja].

A hang négy jelentős jellemzővel definiálható:

- Frekvencia.
- Terjedési sebesség.
- Hullámhossz.
- Amplitudó (erősség).
 - Szinuszos mozgás, amplitúdó, periódusidő, frekvencia, hullámhossz, terjedési sebesség.



2.1. ábra



Az alább definiált kifejezések az egyenletes, csillapítatlan szinuszos hullámok leírására alkalmazhatók:

Amplitúdó (A)

Az egyensúlyi helyzetük körül rezgő anyagi részecskék maximális kitérésének mértéke.

Frekvencia (f)

A részecskék rezgésének másodpercenkénti ciklusszáma hangfrekvenciaként ismert, mely a hallható tartományban egy zenei hangjegy magasságát is meghatározza. Az ultrahang frekvenciája az emberi fül számára nem hallható tartományban van, általában 20000 ciklus/másodperc fölött.

A frekvencia egysége a Hertz (Hz). 1 Hz másodpercenként egy teljes rezgésciklussal egyenlő. A roncsolásmentes vizsgálatok nagy részében alkalmazott ultrahangok frekvenciája 0,5–20 MHz közötti frekvenciatartományban található.

A vizsgálófej rezgőjének frekvenciája változó. Ezt a frekvenciát az rezgő anyagára jellemző hangterjedési sebesség, valamint annak vastagsága határozza meg.

A rezgő frekvenciája: az alábbi képlet szerint az "e" aktív rezgőelem vastagságával arányos:

$$f = c / 2 x e$$

ahol:

c = a hang terjedési sebessége a rezgőben
 e = a rezgő vastagsági mérete.

A hang terjedési sebessége (c)

Ez a sebesség a közegen áthaladó hanghullámok (c) sebessége. A terjedési sebességet a rezgés módja is meghatározza, de függ magától a közegtől is. Az ultrahang sebessége általában a közeg sűrűségnek növekedésével együtt nő.

A sebesség egysége: 1 méter/másodperc (m/s).

A hang terjedési sebességének mérésével közvetett információt kaphatunk a vizsgált anyag belső tulajdonságairól. (szemcseméret, összetétel, stb.)

Maximális rezgési sebesség (v)

Az anyagi részecskék a rezgés során gyorsuló és lassuló mozgást végeznek egy adott hely körül. A rezgés során a rezgő anyag tömegelemeinek maximális sebességét maximális rezgési sebességnek nevezzük.



Hullámhossz (λ)

A hullámhossz a hang által egy teljes rezgési ciklus alatt megtett távolság.

A hullámhosszt tulajdonképpen az azonos fázisban lévő rezgő anyagrészecskék közötti távolság adja meg, mely egyben a detektálható legkisebb hangvisszaverő felületet is meghatározza. Általában elmondhatjuk, hogy a $\lambda/2$ legkisebb mérettel rendelkező (pl. a $\lambda/2$ átmérőjű körtárcsa alakú) reflektorokat már detektálhatjuk.

A hullámhosszt az ultrahang sebességének és frekvenciájának függvényeként, az alábbi képlettel fejezhetjük ki:

A hang terjedési sebessége = frekvencia × hullámhossz c = f x λ .

Példa: PVDF (polyvinil-diflourid) rezgővel gyártott merülőszonda esetében, ha az előírt frekvencia 10 MHz, akkor mennyinek kell lennie a rezgő vastagságának (e)?

$$f = C/2 x e$$

A PVDF-re jellemző hang-terjedési sebesség: 2,2 × 10⁶ mm/s.

 $f = 10 \times 10^6$ ciklus/s = 2,2 × 10⁶ mm/s/2 × e 2 x e = 0,22 mm e = 0,11 mm

Így a 10 MHz-es szondához szükséges rezgő vastagsága 0,11 mm.

Példa: Bárium-titanát rezgővel gyártott vizsgálófej esetében, ha az előírt frekvencia 4 MHz, akkor menynyinek kell lennie a rezgő vastagságának (e)?

f = C/2 x e

A bárium-titanátra jellemző hang-terjedési sebesség: 5,4 × 106 mm/s.

f = 4 × 106 ciklus/s = 5,4 × 106 mm/s/2 × e 2 x e = 1,35 mm e = 0,675 mm

Így a 10 MHz-es szondához szükséges rezgő vastagsága 0,675 mm.

Akusztikai impedancia, hangerősség, hangnyomás

Akusztikai impedancia (Z)

A hangnyomás és a tömegelemek maximális rezgési sebességének a hányadosa.

$$Z = \begin{pmatrix} p \\ v \end{pmatrix}$$

Az akusztikai impedancia a tömegelemek rezgése ellen hat, de a hullám terjedést nem akadályozza.

Vannak akusztikai szempontból kemény (nagy impedanciájú) és lágy (kis impedanciájú) anyagok.

Ezen felül, egy anyag akusztikai impedanciája függ az anyag (p) sűrűségétől és az ultrahang anyagra jellemző (c) terjedési sebességétől is.

$Z = \rho x c$

(kg/m².s-ban kifejezve)

Hangteljesítmény (I)

Egységnyi idő alatt egységnyi területre eső energiamennyiség (W/m²).

$$I = E \ x \ C = (\frac{1}{2} \ \rho \ v^2) \ x \ c = \frac{1}{2} \qquad \frac{p^2}{Z}$$

Így, az (I) hangteljesítmény egyenesen arányos a (p) hangnyomás négyzetével.

Hangnyomás (p)

A hangnyomás nem más, mint a rezgő részecskék közötti feszültségnek a részecskék mozgásával egy irányban mérhető része (N/m²).

Hosszirányú (longitudinális) hullámok esetében a hangnyomás a hullámfelületre merőleges, felületegységnyi, erő.

Keresztirányú (transzverzális) hullámok esetében a hangnyomás a hullámfelülettel párhuzamos felületegységnyi nyíróerő.

Az ultrahanggal végzett vizsgálatok során alkalmazott kijelzési módnál, a visszhangjel magassága arányos a visszaérkező hang nyomásával. . Éppen ezért mondhatjuk, hogy a hangnyomás az ultrahang-gal végzett vizsgálatok egyik legfontosabb paramétere.

Fogalmi szempontból, a hangnyomás egy adott pontban a hanghullámok által az atmoszferikus nyomáson felül okozott, az atomok közötti kapcsolatot torzító nyomás. A hullám közegen belüli terjedése ennek köszönhető.

A decibelskála

A Bel (B) két teljesítmény jellegű mennyiség összehasonlítására szolgáló mérőszám.

$$\Delta P = Ig P/P_0$$



Atomerőműi Képzési Bázis

A decibel (dB) a hangok és az ultrahangteljesítmény (intenzitás) változásainak összehasonlítására szolgáló mérőszám. 1 B = 10 dB. Adódik tehát, hogy: 1 dB = 10 lg P/P₀ = 10 dB

Ha az egyenletben szereplő "P" teljesítmény jellegű mennyiséget nyomásértékekkel helyettesítjük, akkor a következő összefüggéseket kapjuk:



Mivel a hangnyomás-arányos a (H) visszhangjelek magasságával, a fenti képlet a következőképpen is írható:

$$dB = 20 lg \left(\frac{H}{H_o} \right)$$

A képernyőn megjelenő visszhangjel-magasságok (amplitudók) összehasonlításával az azonos akusztikai tulajdonságú reflektorok mérete összehasonlítható, illetve az anyagban haladó ultrahang gyengülésének mértéke nyomonkövethető.

Például:

A képernyőn két visszhang látható. Az első hátfalvisszhang 80%, míg a második hátfalvisszhang 40% magasságú.

A két visszhang közötti dB különbség kiszámítása az alábbi egyenlettel lehetséges:

$$\Delta dB = 20 \times \log (80/40) = 20 \times \log 2 = 20 \times 0.3 = 6 dB.$$

Ennek oka, hogy a hang energiája (nyomása) az anyagban való terjedés közben – anyagszerkezeti és egyéb okokra visszavezethetően – gyengül.



Atomerőműi Képzési Bázis





2.1.1 A hang terjedése

2.2a. ábra

2.2b.ábra





Ha az "A" oszlopban lévő atomokra befelé irányuló erő (nyomóerő) hat, akkor az atomok síkja jobbra mozdul és nyomóerőt gyakorol az "A" és a "B" oszlopban lévő atomok közötti kötésre. A kötésben keletkező feszültség (egy erős rugóhoz hasonlóan) a "B" oszlopban lévő atomokat is eltolja.

Az "A" oszlopban lévő atomok visszatérnek eredeti helyzetükbe, míg a "B" oszlopban lévők most jobbra mozdulnak. Ez az elmozdulás nyomóerőt gyakorol a "C" oszlopban lévő atomokra és így a ciklus ismétlődik. A "B" oszlopban a mozgáshatár elérésekor az "A" és a "B" oszlop közötti kötés húzófeszültségnek van kitéve, ami a "B" oszlop atomjait az "A" oszlop felé húzza.

A hanghullámok közegben való továbbterjedését az atom oszlopok ezen váltakozó irányú mozgása – oszcillációja okozza.

A hang terjedésnek számos módja van, de mind az atomok szerkezeten belüli oszcillációjára alapul.

2.2. IZOTRÓP ÉS ANIZOTRÓP ANYAGOK

Hooke törvénye

Robert Hooke, aki 1676-ban megállapította, hogy "Bármely test alakváltozása az alakváltozást okozó (energiával) erővel arányos." Ezzel bevezette a rugalmasság fogalmát. Hook törvénye matematikailag kifejezve:

F = k u

ahol *F* az alkalmazott erő (de nem a Hooke által tévesen írt energia), u az *F* erőnek kitett elasztikus test alakváltozása, és k a rugóállandó (azaz az előbbi két paraméter hányadosa).

Ha a Hook-törvényt F/u húzófeszültséggel egy fémszálra alkalmazzuk, akkor ez a húzófeszültség a fémszál nyúlását és keresztmetszetének csökkenését eredményezi.



Feltételezhetően a nyúlás a domináns hatás, főleg hosszú és a kis keresztmetszetű szálak esetében.



Így, a szál rugalmas viselkedésében létezik egy, a szálra ható F erő és a ΔL hossznövekedés, vagy másképp: a feszültség σ =F/S és a (egységnyi alakváltozás) fajlagos nyúlás ϵ = $\Delta L / L_0$ közötti arányosság.

ahol: F a húzóerő, S a szál keresztmetszete (S = π r₂), I₀ a szál eredeti hossza, Δ I a megnyúlás.

E az egyes anyagok, rugalmassági modulusnak, vagy Young-modulusnak nevezett arányossági állandója. $E=\sigma/\epsilon$

A feszültség egységnyi alakváltozás függvényében való ábrázolásáva egy, az alábbi grafikonban bemutatotthoz hasonló karakterisztikájú görbét kapunk.



A görbe első része mentén a feszültség az egységnyi alakváltozással arányos. Ez a rugalmas szakasz.

A feszültség csökkenésekor az anyag az eredeti hosszát veszi fel. A vonal pontban végződő jobb oldali végének neve rugalmassági határ.

2.2.1. Izotróp anyagok

A fémötvözetek és keményített polimerek legnagyobb része izotrópikusnak tekinthető, azaz, az anyagjellemzők a terhelés irányától függetlenek. Az ilyen anyagok, az általános anizotrópikus anyagok 21 elasztikus állandójával szemben, csak két független változóval (rugalmassági tényezővel) rendelkeznek.

A rugalmassági modulus a rugalmassági tényezők egyik típusa, mely a húzófeszültség és az alakváltozás összefüggését adja.



Az izotrópikus rugalmas anyagok egy rugalmassági modulussal és egy rugalmassági együtthatóval (vagyis a két alakváltozás közötti viszonnyal) jellemezhetők. Azaz, mivel az egyik rugalmassági érték és a µ Poisson-együttható ismert, akkor a másik rugalmassági modulus meghatározható). Az ortotrop, vagy anizotróp anyagok esetében nagyobb számú rugalmassági állandó szükséges.

A rugalmassági modulus nevet viselő rugalmassági állandók az alábbiak:

- Young-modulus: A jele E. Közvetlen összefüggésben van a nyújtó, vagy nyomó igénybevételnek kitett kötél, huzal, rúd, stb. esetében tapasztalható hosszváltozással. Ezért hosszirányú rugalmassági modulusként is ismert.
- Nyomórugalmassági modulus: A jele: K. Összefüggésben van a felületre merőlegesen ható erők okozta (általában nyomó) feszültségek esetében tapasztalható térfogatváltozással. Alakváltozást nem, csak térfogatváltozást eredményez (köbös rugalmassági modulus).
- Keresztirányú rugalmassági modulus: A jele G: Összefüggésben van a nyírófeszültségnek kitett anyagok esetében tapasztalható változásokkal. Térfogatváltozást nem, csak alakváltozást eredményez. Tangenciális (érintőleges) rugalmassági modulusként és nyíró rugalmassági modulusként is ismert.

A Nemzetközi Mértékegység Rendszerben a modulusok mértékegysége Pascal (Newton/négyzetméter N/m²), míg az együttható dimenziómentes.

A Young-modulus, vagy hosszirányú rugalmassági modulus egy olyan paraméter, mely egy rugalmas anyagnak, a feszültség hatásirányának függvényében tanúsított viselkedését jellemzi. Ezt a viselkedést figyelte meg és tanulmányozta az angol tudós, Thomas Young.

A Young-modulus számításában két eset vehető figyelembe:

- Lineárisan rugalmas anyagok.
- Nem lineárisan rugalmas anyagok.

A lineárisan rugalmas anyagban (teljes mértékben reverzibilis alakváltozást okozó nyújtófeszültségek esetében) az E hosszirányú rugalmassági modulus állandó. Ebben az esetben a modulus értéke a nyújtófeszültség és a megfeszített egyenes rúdban megjelenő alakváltozás hányadosaként határozható meg:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F / S}{\Delta L / L_0}$$



ahol:

- E: a hosszirányú rugalmassági modulus,
- σ: a tárgy keresztmetszetére ható nyomás,
- €: egységnyi alakváltozás a rúd valamely pontjában.



Rugalmas és izotróp anyagok esetében a Young-modulus értéke a húzás esetében ugyanaz, mint nyomás esetében és feltéve, hogy nem haladja meg a rugalmassági határt, a feszültségtől függetlenül konstans, és mindig nagyobb, mint nulla; vagyis húzás esetén a próbatest hossza nő.

A különböző anyagokban a Young-modulus és a rugalmassági határ egyaránt eltérő. A rugalmassági modulus egy rugalmassági jellemző, mely a rugalmassági határhoz hasonlóan tapasztalati úton, az anyagok szakítóvizsgálatával határozható meg. Emellett, a hosszirányú rugalmassági modulusból az anyag keresztirányú rugalmassági modulusa is meghatározható.

A korábbi egyenlet úgy is felírható. hogy:

 $\sigma = E \in$

Ezért két, geometriai szempontból azonos, de különböző rugalmas anyagokból készített és azonos alakváltozásnak kitett rúd, vagy hasáb esetében annyival nagyobb húzófeszültségek keletkeznek, amennyivel a rugalmassági modulus nagyobb. Ugyanígy, azonos erők esetében a korábbi egyenlet úgy írható fel, hogy:



Ez azt mutatja, hogy nagyobb rugalmassági modulussal rendelkező rúd esetében az alakváltozás kisebb. Ebben az esetben kijelenthető, hogy a rúd nagyobb merevséggel rendelkezik.

Bizonyos anyagok, pl. a réz vizsgálata során, melyben a húzófeszültség okozta alakváltozás görbéjén semmilyen lineáris szakasz nincs, így az előző egyenlet nem alkalmazható. Az ilyen típusú, nem



lineárisan rugalmas anyagok esetében a Young-modulus nem határozható meg az előzőleg leírtakhoz hasonlóan, mivel a húzófeszültség és a létrejövő alakváltozás nem egyenesen arányosak.

Nem lineárisan rugalmas anyagok esetében bizonyos látszólagos Young-modulus határozható meg. Ennek általánosabban ismert változata a középsőértékrugalmassági modulus. Az anyagra jellemző feszültség növekmény, és a feszültség irányú egységnyi alakváltozás hányadosaként számíthatjuk ki.

$$E_{sec} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

ahol:

E_{sec} – a szekáns rugalmassági modulus

Δσ – az alkalmazott feszültség változása

∆c – az egységnyi alakváltozás változása

A másik mód a tangenciális rugalmassági modulus meghatározása

$$E_{tan} = \lim_{\Delta \in -\infty} \frac{\Delta \sigma}{\Delta E} = \frac{d \sigma}{d E}$$

A (μ) Poisson-tényező egy rugalmassági viszonyszám, ami egy húzó igénybevételnek kitett test (próbatest) húzás irányában és az arra merőleges irányban mért alakváltozásának arányát fejezi ki. Az együttható a francia fizikusról, Simeon Denis Poissonról kapta nevét.



A hossztengelye mentén nyomásnak kitett test keresztirányú méretének növekedését is a Poissontényező határozza meg, mely ezesetben 0,5.

A Poisson-tényező értéke 0 és 0,5 között lehet, de az anyagok nagy részében, pl. acél esetében, 0,3.



A Poisson-tényező dimenzió nélküli szám.

A Poisson-tényező a hossz- és keresztirányú alakváltozás mértékének ismeretében a következő képlettel számítható ki:



ahol az E az alakváltozás.

A Poisson-együttható pontosabban úgy definiálható, mint a minden egyes anyag jellemző paramétere, mely az anyag által elszenvedett relatív keresztirányú alakváltozás és az alkalmazott erő irányában keletkező relatív alakváltozás viszonyát mutatja. "X" irányban alkalmazott húzóerő esetén " \mathcal{C}_x " az erő irányával azonos irányú relatív méretnövekedés, míg az erőre merőleges irányban \mathcal{C}_y és \mathcal{C}_z relatív méretcsökkenés következik be.





2.2.2. Anizotróp anyagok

Augustin Louis Cauchy a Hooke-törvényt háromdimenziós rugalmas testekre általánosította és megállapította, hogy a hat húzó komponens egyenes arányban van a hat feszültségkomponenssel.

Általában 36 határozott komponens létezik. Azonban igazolható, hogy az anyagok sűrűségüktől függő mértékű feszültségenergiát megtartanak, és ennek eredményeként a merev és rugalmas öszszetevők szimmetrikusak. Ezért a Hooke-törvényben csak 21 merev komponens független. Az iparban használt anyagok nagy része ilyen.

Nem izotróp rugalmas anyagok esetében a mért Young-modulus nem ad konstans értékeket. Az azonban bizonyítható, hogy három rugalmas konstans létezik, az E_x , E_y és E_z . Így, a Young-modulus bármeny irányban az alábbi képlettel számítható:

$$(E = L_x E_x + L_y E_y + L_z E_z)$$



Ahol: (L_x, L_y, L_z) annak az iránynak az irány koszinusza, melyben a Young-modulus három egymásra merőleges irányhoz viszonyított mérése megtörtént.

A keresztirányban izotróp definíciója

Az anizotróp (ortotrop) anyagok egy speciális osztályába tartoznak azok az anyagok, melyek az egyik síkban (pl., az *x-y* síkban) azonos jellemzőkkel, míg erre a síkra merőleges irányban (pl. a z-tengelyben) eltérő jellemzőkkel rendelkeznek. Az ilyen anyagok neve *keresztirányban izotróp anyag*, és ezek az anyagok, a teljes mértékben anizotróp anyagok kilenc konstansa helyett csak öt független rugalmas konstanssal rendelkeznek.

A keresztirányban izotróp anyagok között megtalálható néhány piezoelektromos anyag is (pl. a PZT-4 bárium-titanát) és az olyan szálerősítésű kompozitok melyekben a szálak egymással párhuzamosak.

Az ultrahang szempontjából fontos anyagjellemzők

Sűrűség	Keménység	Kompressziós modulus
Képlékenység	Törésszilárdság	Poisson-tényező
Rugalmassági határ/Folyáshatár	Nyomószilárdság	Nyírási modulus
Húzószilárdság	Szakítási együttható	Young-modulus

Sűrűség

Mértékegysége: SI: Kg/m³; cgs: g/cm³; Imperial: lb/ft³

A sűrűség a térfogat-egységenkénti tömeg jellemzésére haszált mérőszám. Mérése ma is az Archimedes által alkalmazott módszerrel történik: tömegmérés a levegőben, és ismert sűrűségű folyadékban.

Young-modulus

Mértékegysége: SI: GPa; cgs: 1010 din/cm2; Imperial: 106 psi

"E" Young-modulus, húzás, vagy nyomás során a szakítódiagram lineáris szakaszának dőlésszöge. Izotróp anyagok esetében az alábbi képlet szerint összefügg a "K" kompressziós modulussal és a "G" Nyírási modulussal.

$E = 3 (1 - 2 \mu) K$	
$E = 2 (1 + \mu) G$	

ahol: a µ a Poisson-tényező. A µ általában = 1/3, ezért:

$$E = K$$
 illetve $E = (8/3) G$



Nyírási modulus (keresztirányú rugalmassági modulus)

Mértékegysége: SI: GPa; cgs: 10¹⁰ dyne/cm²; Imperial: 10⁶ psi

A nyírási modulus nyírási igénybevétel során a feszültség–alakváltozás-görbe kezdeti lineáris rugalmas szakaszának hajlásszöge. Izotróp anyagok esetében az alábbi képlet szerint összefügg az "E" Young-modulussal, a "K" kompressziós modulussal és a "µ" Poisson-együtthatóval:



ahol a µ = 1/3, G = (3/8) E, és G = (3/8) K.

Poisson-együttható

Mértékegység: Dimenziómentes

A μ Poisson-együttható a laterális és az egytengelyű igénybevételek aránya, tengelyirányú terhelés alatt. Értéke számos szilárd anyag esetében 1/3. Elasztomerek esetében éppen csak 0,5 alatt van.

2.3. HULLÁMOKKAL KAPCSOLATOS FOGALMAK – HULLÁMFAJTÁK

2.3.1 Hullám kibocsátás

A hullámok gerjesztése lehet folyamatos, vagy impulzusszerű.

Folyamatos hullámok (a): Főleg a rezonancia technikában alkalmazhatók.

Impulzusszerű hullámok (b): Ezek gerjesztése változtatható intervallumokban történik.

Az impulzus időtartama mikroszekundum, míg az impulzusok közötti idő milliszekundum nagyságrendű.

<u>Felyamates-hullámok</u>	<u>∩⊾lmpalzossærűkkollának</u> ≏
(a)	(b)

A különböző hullámterjedési módokat a hullám terjedési sebessége és a rugalmas médiumban mozgó részecskék oszcilláló mozgásának iránya határozza meg.



FUTÁSIDŐ-SZÓRÓDÁSOS ULTRAHANGOS VIZSGÁLAT

Az ultrahangos vizsgálatok során gyakrabban alkalmazott hullámtípusok az alábbiak: Longitudinális (hosszirányú, vagy nyomáshullám); Transzverzális (keresztirányú, vagy nyíróhullám); Felületi (Rayleigh hullám); Lemez (Lamb-hullám); és Kúszóhullám.

2.3.2. Longitudinális hullámok (kompresszió/nyomás/sűrűség)

Kompressziós, illetve nyomáshullámként is ismert longitudinális hullámok akkor keletkeznek, amikor a részecskék mozgásának iránya azonos a hang terjedésének irányával.

A terjedés iránya (hangterjedés) Az oszcilláció (a részecske mozgás) iránya



A hullám hosszirányú sebessége az anyagban az alábbiak ismeretében lehetséges:

E = Young-modulus ρ = Az anyag sűrűsége μ = Az anyag Poisson-együtthatója $C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} - \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$

Ezek a hullámok szilárd, és folyékony anyagban jól terjednek, gázokban frekvenciától függően korlátozottan. A terjedés sebessége függ a közegtől. A lemezekben lévő rétegződések ellenőrzésére, valamint a rúd, buga és lemez anyagokban lévő zárványok helyének és méretének meghatározásában használatosak.



2.3.3. Transzverzális hullámok (nyíróhullámok)

A nyíróhullámként is ismert transzverzális, vagy keresztirányú hullámok ott fordulnak elő, ahol az anyag részecskéinek mozgási iránya merőleges a hullámterjedés irányára.

A (hang) terjedésének sebessége:

Az oszcilláció (a részecskemozgás) iránya:



A transzverzális, vagy más néven nyíróhullám CT-sebessége az alábbi egyenletek segítségével számítható:

ahol: G = az anyag nyírási modulusa

ρ = az anyag sűrűsége

μ = az anyag Poisson-együtthatója

Ezek a hullámok csak szilárd anyagokban terjednek. A hullámok terjedési sebessége ebben az esetben is a közegtől függ, de azonos anyagokban jellemzően a kompressziós hullámok terjedési sebességének hozzávetőlegesen a fele. Ezt a hullámfajtát széles körben alkalmazzák hegesztések ellenőrzésére,, különösen az olyan helyeken, ahol a varrathoz való hozzáférés korlátozott.

Mivel a λ hullámhossz egyenesen arányos a terjedési sebességgel, az 5 MHz frekvenciájú transzverzális hullám hossza megközelítőleg az 5 MHz-es longitudinális hullám hosszának a fele. Így, a nyí-



róhullámú vizsgálófejek, apróbb folytonossági hiányok esetében érzékenyebbek lehetnek, mint a kompressziós hullámúak.

ANYAG	CL (m/s)	CT (m/s)	Z (106.kg/m².s)
Acél	5920	3240	46,488
Alumínium	6320	3130	17,210
Perspex	2730	1430	3,186
Víz	1480		1,482

2.3.4 Felületi, lemez- és a kúszóhullámok

A Rayleigh-hullámként is ismert **felszíni** hullámoknak egy, több hullámhossz-mélységig az anyagfelszín alatt terjedő ellipszis hullámformájuk van.



1 = Felszíni hullám szonda / 2 = Részecske / 3 = A hullámterjedés iránya / 4 = Részecske mozgás

A részecskék mozgása a longitudinális és a transzverzális irányú hullámok kombinációjaként elliptikus, és a felszín alatt egy I hullámhossz mélységben történik. A terjedési sebesség jellemzően az ugyanabban az anyagban terjedő transzverzális terjedési sebességnek a 90%-a. A felszíni hullámok elsődleges alkalmazási területe a felszíni folytonossági hiányok felderítése. A vizsgálandó felszínnek azonban simának és síknak kell lennie, mivel a felszínen lévő egyetlen kis csatolóanyag csepp is hullámterjedési zavart, és a képernyőn repedésként értelmezhető jeleket (visszhangot) okozhat.



A Lamb-hullámként is ismert **lemezhullámok** a teljes keresztmetszetükben rezgő vékony lemezekben jönnek létre. Ezek a hullámok a vékony (jellemzően 6 mm-nél kisebb vastagságú) lemez anyagok vizsgálatában, rétegződések és zárványok felderítésére használatosak.

A Lamb-hullámok akkor jönnek létre, amikor a (szilárd) anyag vastagsága a hullámhosszal azonos nagyságrendű (ebben az esetben a felszíni hullám nem jöhet létre).

E hullámtípus terjedési sebessége nem tekinthető anyagjellemzőnek. Az anyagvastagságtól, a hullámalaktól és a frekvenciától függ.

Ezek a hullámok a felületre merőleges részecske oszcillációs komponenssel is rendelkeznek.

Két alapmodus ismert:

- Asszimmetrikus, vagy flexiós hullám (keresztirányú rezgés modus).
- Szimmetrikus, vagy tágulási hullám (hosszirányú rezgés modus).



1) Asszimmetrikus hullám

A kúszó, vagy ferde kompressziós hullámok erősen megtört hullámok, melyek közvetlenül a vizsgált felület alatt terjednek. Ezek a hullámok a felületi, vagy a felülethez nagyon közeli síkbeli folytonossági hiányok észlelésére szolgálnak. Mivel a kúszóhullámok közvetlenül a felszín alatt haladnak, a felszínhez közeli folytonossági hiányokkal létrejövő kölcsönhatás módosított hullámformájú nyíróhullámok kibocsátását eredményezi. A ferde kompressziós hullámok, vagy kúszóhullámok csökkent amplitúdójának köszönhetően, a hullámok gyorsan csillapodnak és csak egy viszonylag szűk (40–50 mm) tartományban használhatók hatékonyan.

Emiatt ezek a hullámok normál esetben csak bizonyos területeken, pl. hegesztési varratok kúpos belső elkeskenyedő részének ellenőrzésére alkalmazhatók, ahol a vizsgálófej nem helyezhető el a vizsgálandó terület közvetlen közelében. Nagy hullámhosszuk miatt, a legnagyobb terjedési sebességű hullámok az ellenőrzendő felületre összpontosulnak, és így sem csatolóanyag alkalmazása, sem felület előkészítés nem szükséges, mint ahogy ezt a felszíni hullámok esetében nem szabad elfelejteni.



²⁾ Szimmetrikus hullám

A közeg rugalmassági és mechanikai jellemzőit az atomok közötti kötés jellege, valamint a rezgés módja határozza meg. A nagyfrekvenciájú ultrahangok legkönnyebben nagy szilárdságú szerkezeti anyagokban, pl. acélban, alumíniumötvözetekben, öntöttvasban, stb. terjednek. A hangcsillapítás mértékének meghatározása szempontjából azonban az anyag metallurgiai állapota is fontos.

Példa: Mekkora az az elméletileg legkisebb reflektor, melyet egy 5 MHz frekvenciájú transzverzális hullámú vizsgálófej alumíniumban észlelni képes.

CT (alumíniumban) = 3,111 mm/s x 10^6 f (keresztirányú hullám frekvenciája) = 5 x 10^6 Hz (ciklus/s) λ =^C/f

 $\lambda = \frac{3,111 \text{ mm/s x } 10^6}{5 \text{ x } 10^6 \text{ c/s}} = 0,62 \text{ mm}$

Mivel az elméletileg legkisebb visszaverő felület λ/2-vel egyenlő, ezért a fentiek szerint meghatározott hullámhossz egy 0,62/2, azaz 0,31 mm-es minimális, elméletileg észlelhető folytonossági hiányt eredményez.

A legkisebb észlelt visszaverő felület mérete = 0,31 mm.

Megjegyzés: A hanggyengülés, a a hangnyaláb széttartása, és a szemcsetényező miatt ez az elméleti határ nem mindig teljesül.

2.3.5. Az irányított hullám terjedési elve

Alapelvek

Az irányított hullámokkal (vagy nagy hatótávolságú ultrahanggal) végzett vizsgálat, csövek anyagveszteség ellenőrzésére használt, nem hagyományos jellegű, roncsolásmentes vizsgálat. A hagyományos ultrahangos vizsgálatokkal szembeni különbsége az, hogy az irányított hanghullámos vizsgálati rendszerben a vizsgálat a cső mindkét oldalán végighaladó kis frekvenciájú hullámokat kibocsátó gyűrűs szondával történik, ami hosszú szakaszok egyetlen pontból (vizsgálati helyszínről) való ellenőrzését teszi lehetővé.





1 = Hagyományos ultrahangos vizsgálat / 2 = Szonda / 3 = Nagy hatótávolságú ultrahang / 4 = Gyűrűs szonda / 5 = A vizsgált terület / 6 = A vizsgált területek

A hagyományos ultrahang technológia MHz nagyságrendű ultrahang hullámokat alkalmaz.

A nagy hatótávolságú ultrahangos technika a lemezhullámok, vagy a Lamb-hullámok előállításán és érzékelésén alapul, melyek frekvenciája a KHz tartományba esik, és amelyek sajátos beesési szögű ultrahang sugarakként, (egy kellően finom felületű lemezben a felszíni hullámokkal kölcsönhatásban terjednek.

A hagyományos, kompressziós hullámok terjedése és az irányított hullámok terjedése közötti fő különbség az, hogy az irányított hullámok terjedéséhez határfelület szükséges.

Egy vékony lemez határfelületének köszönhetően, a szerkezeten belül számos különböző hullám verődik vissza és alakul át, majd erősítő és gyengítő interferenciával befolyásolt hullámokra szuperponálódva végül olyan egységesebb irányított hullámcsomagot eredményez, ami a szerkezetben terjedni képes.

Az irányított hullámok előállítására számos különböző technika áll rendelkezésre. Az előállítás lehetséges ferde besugárzás alkalmazásával is. Az ék és a vizsgálati darab határfelülete közötti sugártörés eredményeként, a szerkezet felületénél bekövetkező hangátalakulás és visszaverődés révén, a szerkezeten belül számos különböző hullám terjedhet.

Az irányított hullámok vizsgálati darabon belüli előállításának másik módja a fésűs szonda használata. A darabra, bizonyos osztásban számos olyan elemet helyeznek, melyek a különböző hanghullámokat egymáshoz képest fázisban, vagy eltérő fázisban a munkadarabba vezetik. Ez azt váltja ki, hogy az irányított ultrahang hullámenergia a szerkezeten belül mindkét irányban terjed. Az osztástávolság és a frekvencia megválasztása lehetővé teszi annak a hullámtípusnak kiválasztását, mely a munkadarabban ténylegesen továbbterjedni képes.

Az irányított ultrahang csőíveken kevésbé tud áthaladni, ezért azok vizsgálata korlátozott. Az asszimmetrikus hullámok csőíveken való áthaladásakor – a bekövetkező interferencia miatt – holtzónák alakulhatnak ki. Acső egyik vége körül több fázisvezérelt szonda elhelyezésekor lehetségessé válik a hang-hullámok vezérlése és ezáltal, a szerkezeten belüli bármely kívánt pontra való fókuszálhatóság biztosítása.



Különösen fontos ez akkor, ha a könyök és bizonyos csőszakaszok egyáltalán nem "láthatóak", vagy a hagyományos szondák alkalmazásával elérhetetlenek.

Az irányított hullám másik alkalmazási területe betonba ágyazott acélszerkezetben is számításba vehető. A beton vizsgálatok miatti eltávolítása rendkívül drága. Az irányított hullám alkalmazása azonban lehetővé teszi az ultrahangenergia bevezetését az acélszerkezet mentén, minimális veszteséggel, így lehetőség nyílik az acélszerkezetben lévő esetleges korrózió vagy a repedések feltárására. Erre a célra horizontális transzverzális hullámok (EMAT) használatosak.

A villamosenergia iparban és a földalatti gázvezetékek vizsgálatában jelentkező másik probléma a kátránybevonattal védett szerkezetek ellenőrzésének lehetővé tétele. Az irányított hullámok ezt is lehetővé teszik.

Másrészt, az irányított hullámok felhasználhatók az ultrahangenergia bevonatalá küldésére, a hullámstruktúra komponens vastagságnak megfelelő beállításával. A a megfelelő frekvencia, és a hangsebesség megválasztása, teszi ezt lehetővé.

Számos egyéb irányított hullámot alkalmazó vizsgálati lehetőség létezik. A felszínközeli információk beszerzésére, a szerkezet felszíne mentén haladó irányított szivárgó hullámokat használó letapogató akusztikai mikroszkópos eljárás alkalmazható. A hullámfajták némelyike a varrathibákra érzékeny, míg mások nem. A hullámfajták közötti amplitúdó-arány egyszerű vizsgálata így lehetővé teszi az acélszerkezet minősítését.

Sebességmérés és szóródás

Az anyagra jellemző sebesség pontos mérése érdekében az adott anyag vastagságának pontos ismerete és rendkívül pontos (futás)időmérési módszer szükséges. A modern berendezések megfelelnek ezeknek a feltételeknek, de figyelembe kell venni, hogy az anyag anizotrópiája is befolyásolhatja a mérést.

Ha egy anyagban az anyag metallurgiai felépítésével összefüggő kötés a különböző irányú különböző síkokban eltér, akkor a mért sebesség szintén irányonként változhat. Az egyszerű köbös anyagszerkezet izotrópikus, így a három irányban azonos terjedési sebességgel rendelkezik. A térben középpontos hatszög szerkezet (pl. az alumínium) azonban anizotrópikus lesz, és a mért sebesség is ennek megfelelően irányonként különböző lesz.

Szóródás

a. Egy komplex hullám frekvenciától, vagy hullámhossztól függő, komponensekre való szétesése.

b. A látható fény alkotó színekre való felbomlása fénytöréskor, vagy visszaverődéskor.

A szóródás, amikor például egy prizma a fényt a szivárvány színeire bontja, a hullámmozgás egyik általános jelensége, ami bármely hullámterjedés esetén előfordulhat. Az üvegen áthaladó fényhullámok és a fémszerkezetekben haladó ultrahang hullámok esetén is.



A szóródás egy hullám pl. az ultrahangenergia rövid impulzusaiban bekövetkező frekvenciaváltozással együtt járó sebességváltozása. Az ultrahangimpulzus két részből áll: az alaphullámok, vagy oszcillációk, és az impulzusnak alakot adó burkológörbe.

A burkológörbe harang alakú, vagy normál eloszlású. Az impulzus két részének saját eltérő sebessége lehet. A szóródás definíciójában említett sebesség az alaphullám sebessége. A burkológörbe sebessége a csoport sebességeként ismert, mely a burkológörbe csúcsának (maximális magasságának, vagy amplitúdójának) követésével mérhető.

Ha semmilyen szóródás nincs, akkor a csoport sebessége és a hullámok sebessége azonos. Ha a szóródás pozitív, akkor a csoport sebessége nagyobb, mint a hullám sebessége. A szóródás csillapodással jár, mely a közegbe behatoló hullámok amplitúdójának csökkenését jelenti. Az amplitúdócsökkenés és a szóródás egymással összefüggő dolgok, és néhány speciális eset kivételével egyik sem létezhet a másik nélkül. A nagy csillapodás erős szóródással jár.

Az ultrahangsebesség mérésének alternatív eszköze a fizikai állandók táblázatában szereplő adatok használata, bár ezek az adatok a szóródást és az anizotrópiát nem veszik figyelembe.

2.4. TÖRÉS ÉS VISSZAVERŐDÉS

2.4.1. Merőleges beesés

a) Az energiákból, vagy intenzitásból levezetve

A különböző anyagok határfelületére való derékszögű, azaz 90°-os beesése esetén, az ultrahang vagy továbbhalad, vagy visszaverődik. A két anyag hangimpedanciája (hanggal szembeni ellenállása) meghatározza a visszavert, vagy átvezetett hullámok relatív erősségét.



E, = beesési energia / E, = visszavert energia / E, = átmenő energia

I, = beesési hullámerősség / I, = visszavert hullámerősség / I, = átmenő hullámerősség.

A különböző impedanciájú két (1-es és 2-es) anyag határfelületére (a felületre merőlegesen) beérkező hullámenergia (E_i) visszavert (E_i) és átmenő (E_i) része az alábbiak szerint számítható.

Az energiamegmaradás elvét figyelembe véve: $E_i = E_r + E_t$



ahol:

R = Visszaverődési együttható

T = Átvezetési együttható

A visszaverődési és átvezetési együtthatók (az egyes anyagok ismeretében) az alábbi képlettel számíthatók:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \qquad T = \frac{4 Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \qquad T = 1 - R$$

A fenti egyenletekből az következik, hogy a visszavert és átmenő energiák értéke az E, kezdeti energia 100%-ból százalékban (%) számítható.



Az akusztikai energiából, vagy intenzitásból levezetve, a különböző Z1 és Z2 impedanciájú anyagok közötti fázishatárra beérkező hullám szögéből számítható visszavert és átvezetett hullámok százaléka az 1-es és a 2-es közegtől független állandó érték

A visszavert és átvezetett hangenergia százalékos értéke az előbbi egyenlettel számítható. Az adóként és vevőként választott aktív elem csatolási hatásfoka azonban az akusztikai impedanciát is befolyásolja.

Minél közelebb van az adó/vevő valamint a vizsgált test akusztikai impedanciája, annál nagyobb a fázishatáron átlépő ultrahang százalékos értéke.

A visszavert hullámok százalékos értéke csak merőleges beérkezésére vonatkozik. Ferdeszögű beérkezés esetén az összefüggés bonyolultabbá válik.



b) Hangnyomásból levezetve

A P, visszavert nyomás és a P, átmenő nyomás számításához figyelembe kell venni, hogy:



Az R' visszaverődési együttható és a T' átvezetési együttható (az egyes anyagok impedanciájának ismeretében történő) számításához szükséges egyenlet a következő:

$$R' = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad \qquad T' = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

A fenti egyenlettel a visszavert és az átvezetett nyomás a Pi kezdeti nyomás 100%-ából százalékos értékben számítható.

$$P_{i} (100 \%) + P_{r} (\%) = P_{t} (\%)$$

$$R' = -\frac{P_{r}}{i}$$

$$T' = -\frac{\gamma_{t}}{i}$$

$$P_{t} (\%) = T' \times P_{i} (100\%)$$

Mivel a hangnyomás arányos a visszhang magasságokkal, az 1-es és a 2-es közeg közötti összefüggésnek olyanak kell lennie, hogy a Z1 < Z2 feltétel teljesüljön, és így a 2-es anyagra ható átmenő hangnyomás eléggé nagy legyen ahhoz, hogy a képernyőn nagy amplitúdójú visszhang jelet generáljon (lásd a 2. esetet).

1 ESET:

Z1 > Z2

Az érték, vagy az R' negatív, ami azt jelzi, hogy a beérkező hullám és a visszavert hullám nincsenek fázisban.

A T' átvezetett hullám kisebb, mint a kezdeti hullám.





2. ESET:

Z1 < Z2

Az R' értéke pozitív, ami azt jelzi, hogy a beérkező hullám és a visszavert hullám fázisban vannak.

A T' átvezetett hullám szintén fázisban van a beérkező hullámmal, de amplitúdója nagyobb, mint 1 (nagyobb, mint 100%).



Gyakorlat: Egy alumíniumlap merítéses vizsgálata alatt a vízbe sugárzott kezdeti hang hány százaléka megy át a vízen a szondához, miután egyszer áthaladt a vizsgálati anyagon? (Az energiák szempontjából).

Ebben az esetben, a sugár alumíniumba való belépésénél egy víz/alumínium határfelületről, a hátfalról való visszaverődés után egy alumínium/víz határfelületről és végül, a rezgőhöz visszaérkező sugár esetében alumínium/víz határfelületről beszélünk.

Minden egyes határfelületen átvezetés, és visszaverődés is bekövetkezik. Az első határfelületnél a hang behatol az alumíniumba, aztán az alumínium túlsó falán visszaverődik, majd határfelületen át átmegy a vízbe.

Az egyes anyagok akusztikai impedanciája a következő:

 Z_{viz} = 1,482 .10⁶.kg/m².s $Z_{aluminium}$ = 17,210 .10⁶.kg/m².s

A víz/alumínium határfelületen visszavert Er energia %-os értéke így:







Az első példában (alumínium/víz) így, 29% megy át az alumíniumba. Aztán ennek a 29%-nak a 71%-a, azaz 20,6% visszaverődik vissza a hátfalról. A 20,6% 29%-a, azaz a beérkező energia 6%-a végül újra belép a vízbe.

(A víz/acél határfelületen a szondához visszaérkező energia mennyiség, ugyanezen határfelületek után 1,26%.)

2.4.2 Ferdeszögű beesés

Ha egy hanghullám a merőlegeshez képest egy meghatározott szögben érkezik be két anyag közötti határfelületre, akkor egy része visszaverődik, míg a másik része átvezetődik a másik anyagba. A másik anyagba átvezetett hullám terjedési iránya, az 1-es és a 2-es anyag közötti sebességkülönbségnek köszönhetően megváltozik – hullámtörés:



- α = beesési szög
- β = törési szög
- Φ = visszaverődési szög
- C₁ = sebesség az 1-es anyagban
- C₂ = sebesség a 2-es anyagban



Összefoglalva: ha a beérkező hullám a felülettel α szöget zár be, akkor:

- i. a hullámok egy része ugyanabban a szögben visszaverődik ($\alpha = \Phi$),
- ii. a hullámok másik része a másik anyagban β szögben törve halad tovább.

Snell-törvény

A hang 1-es és 2-es anyagban (C_1 and C_2) elért sebességének függvényében, a beesési, visszaverődési és törési szög a Snell-törvény értelmében összefügg, (figyelembe véve a hangátalakulásokat is).

Általában:



A Snell-törvény alkalmazásával az alábbi esetek figyelhetők meg:



Példa: Egy vízben terjedő longitudinális hullám a merőlegestől számított 5°-os szögben alumínium felületetre érkezik. Milyen törési szöggel halad tovább az alumíniumban? (longitudinális hullám törési szöge).

1. anyag = víz, C_Lvízben = 1,482 mm/s x 10⁶ 2. anyag = alumínium, C_L alumíniumban = 6,374 mm/s x 10⁶ Beérkezési szög α = 5° Törési szög β _L = ismeretlen



sin 5° =	1,482 mm/s x 10 ⁶
$\sin \beta_{\rm RL}$	6,374 mm/s x 10 ⁶



 $\beta_{RL} = 22^{\circ}$

Kritikus szögek, és a hangátalakulás (mode conversion)

Az eddigi egyszerű példa nem vette figyelembe azt a tényt, hogy ha egy longitudinális hullám az 1–2 határfelületre ferdeszögben érkezik be, akkor:

A beérkező longitudinális hullám két hullámtípus formájában, egy visszaverődő longitudinális hullám ($\Phi_{rL} = \alpha_i$) és egy másik, hullámátalakulás útán létrejött transzverzális hullám formájában verődik vissza az 1. anyag belsejébe. Különböző terjedési sebességüknek köszönhetően a két visszavert hullám szöge eltérő lesz.

Valamint a beérkező longitudinális hullám két hullámtípus formájában, lognitudinális és transzverzális hullám formájában a 2. anyag belsejében megtörve halad tovább. Különböző sebességüknek köszönhetően a két átvezetett hullám törési szöge eltérő lesz.





A Snell-törvény alkalmazásához, és a hullám törési szögének számításához ismerni kell a transzverzális hullámok 2. anyagban elért sebességét.

Példa: A fenti példában, a hullámátalakulással létrejött transzverzális hullám milyen törési szög alatt halad tovább az alumíniumban?

1. anyag = víz, C_L vízben = 1,482 mm/s x 10⁶ 2. anyag = alumínium, C_T alumíniumban = 3,111 mm/s x 10⁶ Beesési szög α = 5° Törési szög β_T = ismeretlen ________ = _______ 1,482 mm/s x 10⁶



azaz, hozzávetőlegesen a longitudinális hullám törési szögének fele. Így előfordulhat az az eset is, amikor a longitudinális hullám 90°-ban törik, és csak a transzverzális hullám marad az anyagban.

Első kritikus szög

Ha a beesési szög nő, akkor a longitudinális hullám törési szöge egyre közelebb kerül, majd eléri a munkadarab felszínét (90°-os törés). Az ennél nagyobb beesési szögeknél a longitudinális hullám teljesen visszaverődik a határfelületről, és csak a transzverzális hullámok maradnak az anyagban. Az a beérkezési szög, melynél ez az állapot bekövetkezik, az első kritikus szög.





Az értékek minden anyagkombinációra kiszámíthatók. Például, a Perspex(plexi)/acél határfelületén a 27,4° beesési szög az első kritikus szög. Ez az acélban 33°-os transzverzális hullámot hoz létre.

Példa: Mennyi az első kritikus szög a Plexi/acél határfelületén? Mennyi a transzverzális hullám törési szöge ennél a beesési szögnél?

"A" anyag = Plexi; CL Plexi= 2.7 mm/s x 10^6 "B" anyag = acél; C_L acélban= 5.96 mm/s x 10^6 Az α beesési szög = ismeretlen A β törési szög = 90°

 $\frac{\sin \alpha}{\sin 90^{\circ}} = \frac{2.7 \times 10^{6}}{5.96 \times 10^{6}} = 0.453$

Ezért, α = 26.93°

Az első kritikus szög (az a szög, melyben az longitudinális hullám törési szöge 90°, és az amplitúdója nulla) ismeretében már lehetséges a transzverzális hullám törési szögének számítása.

"A" anyag = Plexi;C_L Plexiben = 2.7 mm/s x 10⁶ "B" anyag = acél; C_T acélban = 3,235 mm/s x 10⁶ Az α beérkezési szög = 27.4° A β eltérülési szög = ismeretlen

$$\frac{\sin 27.4^{\circ}}{\sin \beta_{RT}} = \frac{2.7 \times 10^{6}}{3.235 \times 10^{6}} = 0.8346$$

$$\sin\beta_{\rm RT} = \frac{\sin 26.9^{\circ}}{0.8346} = \frac{0.483}{0.8346} = 0.578$$

Így, β_{RT} = 35.36°

Azonban, a hang szóródása miatt, a transzverzális hullám gyakorlati határa (a legkisebb szög) acélban 38–40 fok.

A második kritikus szög

A beesési szög további növelése egy olyan törési szög eléréséhez vezet, melyben a transzverzális hullám szintén a felszínre érkezik. Az ezt kiváltó beesési szög a második kritikus szög.





Ebben a pontban a nyíróhullám további hullámátalakuláson megy át, és felszíni Rayleigh-hullámmá alakul, melynek sebessége a keresztirányú hullám 90%-a.

Gyakorlati okok miatt, a felszíni hullámok keletkezésének elkerülése érdekében, vékonyfalú hegesztések vizsgálatához normál esetben maximálisan 70° eltérítési szöget kell alkalmazni, bár 80°-os vizsgálófejek is rendelkezésre állnak.

Összefoglalás:

- 1. A standard szondaszögek normál esetben (35°, 45°, 60° and 70°.
- Ezek a szögek acélra vonatkoznak. Eltérő sebességű más anyagokban a törési szögek eltérnek ettől a névlegestől.
- 3. Az első kritikus szög a hosszirányú hullámok 90°-os eltérítését okozza.
- 4. A második kritikus szög a nyíróhullámok 90°-os eltérítését okozza, és felszíni hullámokat hoz létre.

A Snell-törvény a beesési szög és a törési szög, valamint a beeső hullám sebességének és az törő hullám sebességek összefüggését mondja ki. (Ez vonatkozik a visszavert hullámokra is, figyelembe véve az azok típusának megfelelő hangsebességet).

2.4.3. Hullámok visszaverődése és törése, a Huygens-elv

A hullám terjedésére vonatkozó fenti fogalmak akkor használhatók, ha a hullám homogén közegben, állandó sebességgel terjed. Ha egy hullám egy közeg határához ér, akkor a tapasztalat szerint onnan részben visszaverődik, részben pedig behatol a szomszédos közegbe.

A hullám terjedésében mindkét esetben változások állnak be. A határon visszaverődő és áthaladó hullámok a határfeltételektől függő fázisváltozást szenvedhetnek a beeső hullámhoz képest (pl. rögzített kötélvégről visszaverődő hullámban a kitérésnek a határon a beeső hullámmal ellentétesnek kell lennie a beeső hulláméval – a fázisváltozás π – mert csak így maradhat ott mindig nulla a kitérés). A határfelületen, nem merőleges beesésnél, általában a hullám terjedési iránya is megváltozik. Ha a hullám egyik közegből átmegy egy másikba, akkor a terjedés körülményei is megváltoznak, és például más



lesz a hullám terjedési sebessége. A visszaverődésnél és törésnél bekövetkező irányváltozás törvényei megérthetők a Huygen-selv alapján. Eszerint egy hullámfront (az a vonal vagy felület, ameddig a hullám eljutott) minden pontjából elemi hullámok indulnak ki, és ezek burkológörbéje adja meg a Δt idővel későbbi hullámfrontot a következő ábra szemlélteti.



Ennek felhasználásával a hullámok visszaverődésénél és törésénél tapasztalt törvényszerűségek egyszerűen megmagyarázhatók az alábbi ábrák segítségével. A visszaverődést az a) ábrán láthatjuk, ahol egy felületre, a felület normálisával αb szöget bezáró irányban egy síkhullám érkezik. Ezt abban a pillanatban ábrázoltuk, amikor a hullámfront egy pontja éppen eléri a felületet. Az ábrán Δt idő múlva (amikor a hullámfront egy másik, kiszemelt pontja is elérte a felületet) megszerkesztettük a visszavert hullám hullámfrontját a Huygens-elv segítségével. A hullám haladási iránya a visszaverődés után a



felület normálisával αv szöget zár be. Az ábráról leolvasható, hogy a beeső és visszavert hullám haladási iránya szimmetrikus a beesési merőlegesre, vagyis

 $\alpha_{_{b}} = \alpha_{_{v}}$

A b) ábrán az 1 közegbe beeső hullám átmegy a 2 közegbe, ahol haladási irányát a felület normálisával bezárt α_t törési szöggel adjuk meg. A két közegben a hullám terjedési sebessége eltérő: c_1 és c_2 .



Az új hullámfrontot most a 2 közegben szerkesztettük meg, és ebből kiderül, hogy az új közegbe behatoló (a határfelületen átmenő) hullám törésére érvényes a

$$\frac{\sin\alpha_b}{\sin\alpha_t} = \frac{c_1}{c_2} = n_{21}$$

összefüggés. Az így bevezetett n₂₁ mennyiség a 2 közegnek az 1 közegre vonatkozó törésmutatója.

2.4.4. Hullámok találkozása, interferencia

Ha a tér egy pontjában két hullám van jelen, akkor hatásuk ott valamilyen módon összegződik. A hullámok összeadódását interferenciának nevezzük. Mi az interferencia eredménye? Ha a szuperpozíció elve érvényes az adott esetben (és szélsőséges esetektől eltekintve érvényes), akkor a két hullámfüggvény egyszerűen összeadható:

$$\psi(\mathbf{r},t) = \psi_1(\mathbf{r},t) + \psi_2(\mathbf{r},t)$$

Általános következtetésekre is alkalmas példaként vizsgáljuk meg két pontforrásból induló (ábra), azonos frekvenciájú, kétdimenziós hullám (pl. vízhullámok) interferenciáját. A két hullám hullámfüggvénye:

$$\psi_1(r_1, t) = A_1 \cos(\omega t - kr_1)$$

$$\psi_2(r_2, t) = A_2 \cos(\omega t - kr_2 + \alpha)$$



Az eredő hullám a P pontban a szuperpozíció elve szerint:

$$\psi(P,t) = \psi_1(r_1,t) + \psi_2(r_2,t).$$

Az eredő hullám áttekinthetőbb alakban írható fel, ha felhasználjuk a rezgések összegzésénél használt összefüggést:

$$A_1 \cos(\omega t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega t + \phi_2) = A \cos(\omega t + \phi)$$



Atomerőműi Képzési Bázis

$$A_{1} = \sqrt{A_{1}^{2} + A_{2}^{2} + 2A_{1}A_{2}\cos(\varphi_{2} - \varphi_{1})}$$

$$tg \varphi = \frac{A_{1}\sin\varphi_{1} + A_{2}\sin\varphi_{2}}{A_{1}\cos\varphi_{1} + A_{2}\cos\varphi_{2}}.$$

Most a ϕ_1 = -kr1, ϕ_2 = -kr₂ + α fázisszögek adott helyen állandók, így ϕ is az. Ezzel az eredő hullám:

$$= \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(kr_1 - kr_2 + \alpha) \cdot \cos(\omega t + \varphi)},$$

A *P* pontban tehát *ω* frekvenciájú harmonikus rezgőmozgás lesz (a kifejezés második tényezője), amelynek az amplitúdója (az első tényező) azonban a helytől függ. Az amplitúdó maximális lesz akkor, ha a négyzetgyök alatti kifejezés maximális, vagyis ha a cos értéke éppen +1.

Ebből következik, hogy $A_{max} = A_1 + A_2$ maximális amplitúdó ott alakulki, ahol a két hullám $\delta = r - r_{12}$ útkülönbsége:

$$\delta_{max} = \pm n\lambda - \frac{\alpha}{2\pi}\lambda$$
,

a minimális $A_{min} = A_1 - A_2$ amplitúdó pedig azokon a helyeken jön létre, ahol

$$\delta_{\min} I = \pm (2n+1) \frac{\lambda}{2} - \frac{\alpha}{\pi} \frac{\lambda}{2}$$
 (*n* = 0, 1, 2, 3, ...).

fenti egyenletekből látni, hogy ha az α fáziskülönbség időben állandó – azaz a két hullám koherens – akkor a maximális és minimális amplitúdójú helyek egy-egy időben állandó helyzetű hiperbola-seregen helyezkednek el (vízhullámok esetén ezek láthatók is). Az amplitúdó helyfüggése a két hullámforrást összekötő egyenessel párhuzamos bármely egyenes mentén maximumok és minimumok sorozatát mutatja (az alanti ábra). Koherens hullámok interferenciájánál általánosan is igaz, hogy az interferencia jellegzetes térbeli amplitúdó-eloszlást ún. *interferenciaképet* eredményez. Ez a hullámok egyik legjellegzetesebb tulajdonsága.



Atomerőműi Képzési Bázis
2.4.5. Hullámelhajlás, a Huygens–Fresnel-elv

Ha egy hullám réseken halad át vagy akadályok szélénél halad el, akkor olyan jelenségek figyelhetők meg, amelyek a Huygens-elvvel nem értelmezhetők, ezek az ún. *elhajlásjelenségek*. A következő ábrán bemutatunk néhány ilyen esetet.



Az itt látható esetek közül kizárólag a pontszerű rés esete értelmezhető a Huygens-elvvel.

Az árnyékjelenség és a hullám részleges behatolása az árnyéktérbe csak úgy magyarázható, ha az új hullámfrontot nem az elemi hullámok burkolójaként értelmezzük, hanem az elemi hullámok interferenciájából számítjuk ki. Ez a Huygens–Fresnel-elv. Ilyen számításokból kiderül, hogy az árnyékjelenség oka az, hogy az elemi hullámok a rés túloldalán az "árnyéktérben" – a rés méretétől függő mértékben – kioltják egymást. Gyakorlatilag is fontos eset a hullámelhajlás *rácson*, amikor a hullám rések sorozatán – ún. rácson – halad át. Ilyenkor a rések különböző pontjaiból kiinduló elemi hullámok bizonyos irányokban erősítik, más irányokban gyengítik egymást, és a rács mögött a ráccsal párhuzamos irányban haladva az amplitúdó (és a hullám intenzitása, ami arányos az amplitúdó négyzetével, *I.* alább) maximumokon és minimumokon megy át (alábbi ábra).



A maximumok α_n irányai úgy kaphatók meg, hogy ezekben az irányokban a rések azonos helyeiről (pl. a rések tetejéről) kiinduló hullámok páronként erősítik egymást, tehát a Δ s d_n = sin α útkülönbségükre érvényes, hogy Δ s = n λ . Ezért a maximumok irányaira azt kapjuk, hogy:



$$d \sin \alpha_n = n\lambda$$
 $(n = 0, \pm 1, \pm 2, ...)$.

Az összefüggésből a rácsállandó (d) ismeretében a hullámhossz meghatározható. A rácson való elhajlás a hullámok jellegzetes viselkedése. Előfordul, hogy egy jelenség hullámtermészetének bizonyítékául éppen az szolgál, hogy megfelelő rácson elhajlást mutat.

$$\Delta \Delta$$



A futásidő-szóródásos (TOFD) ultrahangos vizsgálat alapelvei

A Time-Of-Flight Diffraction (továbbiakban csak TOFD) ultrahangos vizsgálati technika egyre szélesebb körben elterjedő módszer az olajiparban és egyáltalán az ipari anyagvizsgálatban. Ennek a különleges technikának a segítségével gyorsan és pontosan lehet a varratok belső zónájában folytonossági hiányokat kimutatni, illetve ezek méretét meghatározni. A TOFD-képek értelmezése szakértelmet igényel, és a külső és belső felületközeli zónákban a használhatóságát bizonyos korlátozó tényezők csökkentik. Ennek ellenére általánosságban elmondható, hogy a hagyományos impulzusvisszhang-módszerrel együtt alkalmazva a vizsgálatok megbízhatóságát jelentősen javítja. Az alábbiakban ismertetjük a TOFD-módszert, az előnyeit és korlátait, valamint néhány példát is bemutatunk az alkalmazására. Ismertetjük a legfrissebb, a módszerhez kapcsolódó szabványokat és ajánlásokat, bemutatjuk a vizsgálatok által szolgáltatott adatok értelmezését.

3.1. BEVEZETÉS

3.

A TOFD-technikát az UKAEA Harwell-nél (jelenleg AEA Technologies) dolgozó Maurice Silk és kollégái (1) kezdték kifejleszteni az 1970-es évek második felében. Megalkottak egy Zipscan névre keresztelt automata ultrahangos vizsgálóeszközt, amely a jelek amplitúdóinak átlagolásával javította a jel/zaj viszonyát. A TOFD előretörésére a nukleáris iparhoz kapcsolódóan a PISC II és a DDT (2,3) próbálkozásai során került sor. Itt nemcsak a jó detektálási (különösen a vizsgált anyag középső tarto-mányában), de a hagyományos ultrahangos technikáknál jobb reflektorméret meghatározási képessége is megmutatkozott (3.1. ábra).



3.1. ábra. Hibaméret-meghatározás a DDT próbetesten többféle UT-technika alkalmazásával (balra), és ugyanez csak TOFD-vizsgálat eredményeivel (jobbra).



A '80-as évek elejétől kezdve a TOFD az atomenergia-ipar egyik standard módszerévé kezdett válni. Az utóbbi néhány évben a TOFD az olajiparban és egyéb iparágakban is növekvő hangsúllyal van jelen.

Mi is a TOFD?

A TOFD magyarul körülbelül annyit tesz, hogy a "lehasadó jelek futásidő szerinti feldolgozása". Minden, az ultrahangos vizsgálófejjel besugárzott, anyag belsejében elhelyezkedő hiba csúcsairól hasadnak le hullámok, melyet aztán a vevőfejjel érzékelni tudunk. Az érzékelt jelek futásidejének különbségét aztán pontosan megmérve kapjuk az anyag belsejére vonatkozó információt. A *3.2. ábra* mutatja egy szokásos TOFD-vizsgálat elrendezését.



3.2. ábra. Egy standard TOFD-vizsgálat elrendezése.

Normál esetben a TOFD-vizsgálat egy adó–vevő-páros tandem elrendezésen alapszik. A fejek a varrat két oldalán a varrat hossztengelyére szimmetrikusan helyezkednek el. Az előtét-plexik kialakítása olyan, hogy a besugárzás széles szögtartományban, longitudinális hullámokkal történjen. A longitudinális (L) hullám használatára azért van szükség, mert a transzverzális (T) hullámnál nagyobb sebessége folytán ez érkezik meg elsőként a vevőre, és a különböző hullám-átalakulásból származó zavaró jelek ezáltal kiküszöbölhetőek, nem zavarják a kiértékelést (a T-hullámok szintén jelen vannak, detektálásuk-hoz a futásidő-kapu tartományát növelni kell). A vizsgálat során négyféle hullámtípust detektálunk:

Felületi (laterális) hullám:	Közvetlen a felszín alatt terjedő longitudinális hullám. A nagy szög-
	tartományú besugárzás következményeként alakul ki.
Hátfal-jel:	A hátfalról visszaverődő longitudinális hullám.
Refleksziós jel:	Réteges vagy sík hibáról visszaverődő longitudinális hullám.
Lehasadó jel:	Egy hiba csúcsáról lehasadó koncentrikusan terjedő hullám.
	Felületi (laterális) hullám: Hátfal-jel: Refleksziós jel: Lehasadó jel:

Felületi, hátfal, lehasadó jelek a 3.2. ábrán láthatóak.



TOFD-áttekintés – B-kép



A-kép konvertálása szürkeárnyalatos színpalettára – Fekete negatív és a fehér pozitív amplitudó.

3.2. A TOFD ELŐNYEI

- A TOFD-technika hatékony az alábbiakban:
- 1. Kimutatni az anyag belső zónájában elhelyezkedő reflektorokat.
- A lehasadó jelek futásidő-különbségéből segítséget nyújtani a detektált reflektorok pontos méret meghatározásához.
- 3. Detektálni a varrat hossztengelyétől eltérő orientációjú, vagy a varraton kívül eső hibákat is.
- 4. Gyors lineáris szkenneléssel végigvizsgálni az anyagot (raszteres szkennelés nem szükséges).
- 5. A visszhang-amplitúdótól függetlenül kimutatni és jellemezni a hibákat.
- 6. A hegesztési varrat konfigurációjától független a rendszer beállítása.

A TOFD gyors, gazdaságos vizsgálati módszer. Egy vizsgálófej-páros akár 50 mm (2") falvastagságot is képes lefedni, nagy sebességű szkennelés mellett. Nagyobb falvastagságokhoz több TOFDvizsgálófej-pár alkalmazására van szükség. 50 mm-nél kisebb falvastagságnál több, különböző mélységi zónára konfigurált fejpár alkalmazása növeli a detektálás megbízhatóságát és/vagy javítja a lokalizálást.

3.3. A TOFD KORLÁTAI

- A TOFD-módszer korlátai az alábbiak szerint foglalható össze:
- 1. A külső-és belső felületközeli zónában holttér jelentkezik.
- Nagyon érzékeny a kisméretű hibákra, és téves detektálást eredményez, ha nem kombináljuk a hagyományos impulzus-visszhang módszerrel.
- 3. A jelek kiértékelése bonyolult, az értelmezésükhöz szakértelemre van szükség.
- A reflektorok (a besugárzási irányban vett) elhelyezkedésének eltéréseiből méretmeghatározási hibák adódhatnak.
- 5. Alacsony jel/zaj viszony.



A fő korlátozó tényezőt a holtterek jelentik. A TOFD-nál két helyen jelentkezik holttér. A külső-és belső felületközeli zónákban. Az itt elhelyezkedő hibákat általában nem sikerül kimutatni. Ezek a tartományok a TOFD-képen a felületi hullám és a hátfal-jel közelébe eső területek. Kiterjedésük függ a vizsgálófejek konfigurációjától, frekvenciájától és csillapításától. Például egy 7,5 MHz-es kristályú fejpáros esetén a felületi zóna holtterének mélysége 3mm, még a hátfal-zóna holttere kb. 1 mm. Alacsonyabb frekvenciánál kisebb csillapítású vizsgálófejekkel nagyobb, magasabb frekvencia és növelt csillapítás mellett kisebb holtteret érhetünk el . A TOFD-vizsgálófejek frekvenciája általában néhány MHz-el magasabb, mint az impulzus-visszhang technikánál használtaké. Pl. ahol csővezetékek hagyományos vizsgálatánál 7,5MHz T-hullámú fejet használhatunk, ugyanott a TOFD-vizsgálófejek 10MHz L hullámúak.

A vizsgálandó tartomány 100% lefedettségéhez a TOFD-t a hagyományos impulzus-visszhang módszerrel kell társítani. Az impulzus-visszhang-technika erőssége a hátfal-közeli és arra kifutó repedések detektálása, de gyengébb a közbenső zóna vonatkozásában. Ennek okán a két módszer erőssége éppen kiegészíti egymást. És ezért gyakran alkalmazzák őket együttesen csővezetékek vizsgálatánál és általában varratvizsgálatoknál.

3.4. Alternatív beállítások lehasadó hullámokra

A hanghullámok lehasadása általános ultrahangos jelenség, és nem korlátozódik csak a standard TOFD-vizsgálatok longitudinális-longitudinális lehasadó hullámaira. Ez az ismertető csak a standard TOFD-konfigurációval foglalkozik, azaz a *3.2. ábra* szerinti elrendezésben az L–L-hullámok detektálására beállított TOFD-vizsgálattal, csővezetékek és tartályok varratainál.

Egyéb lehetőségek a TOFD alkalmazására:

- transzverzális-transzverzális lehasadó jelek detektálása,
- longitudinális-transzverzális lehasadó jelek detektálása,
- egyedülálló vizsgálófej, lehasadó jelek detektálására ("lehasadó visszhang" vagy japánban "csúcsjel-módszer"-nek hívják),
- páros TOFD-vizsgálófejek alkalmazása, ahol is mindkét fej a hibahely/varrat azonos oldalán helyezkedik el,
- komplex vizsgálatok, pl. becsatlakozó csőcsonkoknál.



Jellegzetes TOFD-képek



3.3. ábra. Jellegzetes TOFD-kép. A felső sáv a külső, az alsó a belső felületről jövő jelek összessége. A megjelenített tartományban négy (jelzett) hiba található.

A TOFD-képek a hegesztési varrat függőleges irányú szeletei egymás mellé sorakoztatva. A felületi hullám a külső felületet jelképezi, a hátfaljel a vizsgálófejek letapogatási felületével ellentétes belső felületet. Minden, e két jel közé eső indikáció egy lehasadó jel. A *3.3. ábra* egy jellegzetes TOFD-képet mutat.

A TOFD-képek általában szürkeárnyalatos módon jelenítik meg a teljes RF hullámalakot. A hullámfázisra vonatkozó információt a sötétebb-világosabb árnyalatok hordozzák. Amint az a 3.2. ábrán látható, a hullámalakok fázisa is azonosítható, illetve a reflektorok csúcsai is azonosíthatóak a hullámok fázisa által. A felületi és a hátfaljel, valamint a hiba alsó-és felső csúcsának lehasadó jelei is ellentétes fázisban vannak.

3.5. HIBAMÉLYSÉG-MÉRÉS

Míg az anyagban lévő hibák jelenléte a képernyőn megjelenő hullámforma zavaraiból tisztán megállapítható, addig ezek kiterjedésének megállapítása már nehezebb feladat. Ha egy reflektor nagyon kicsi (az adóimpulzus lecsengési távolságánál kisebb ~ <3mm), nem vehető ki a felső és alsó csúcsáról lehasadó jel. Ha ezeket el tudjuk különíteni egymástól, a köztük lévő távolságot, vagyis a futásidők különbségét a kurzorok segítségével mérni tudjuk, és egy egyszerű képlettel kiszámíthatjuk az adott hiba mélységét (3.4. ábra). Az 3.5. ábra egy sematikus vázlata ennek a TOFD-képen történő megvalósítására.





3.4. ábra. A hibamélység-meghatározás geometriai vázlata.

3.5. ábra. A kurzorok beállítása a hibamélység meghatározásához.





3.6. TOFD-PÉLDÁK

Belső felületre kifutó repedés

Ez a fajta hiba *(3.6. ábra)* a felületi hullám terjedését nem akadályozza. A hátfaljel folytonossága azonban a kérdéses helyen, a hiba hosszirányú kiterjedésével arányos szakaszon megszakad. Ekkor a hiba mélységét már a fent említett képlettel, vagy az anyagvastagságra való hitelesítéssel számíthatjuk.





Külső felületre kifutó repedés

Ez a hibatípus a felületi hullám terjedését gátolja. A TOFD-képen látható a felületi hullám jelének megszakadása. Ez segít annak az eldöntésében, hogy a kérdéses repedés felületre kifutó repedés-e



(ha a felületi hullám nem törik meg, és a repedés csak felületközeli, de nem kifutó). A törési pontok közti hullámszakasz és a felületi hullám közti távolság arányos a repedés mélységével. Egy repedés, akár kifut a felületre, akár közvetlen a felszín alatt helyezkedik el, de kis mélységű (1–2 mm), akkor a TOFDjelek számára láthatatlan marad. Szerencsére az ilyen, felületközeli hibák a hagyományos ultrahangos technikával általában jól kimutathatóak.

A 3.7. ábrán egy ilyen fent vázolt hiba TOFD-vizsgálata látható.

3.7. ábra. Külső felületre kifutó repedés TOFD-vizsgálati sémája (fent). A bal alsó ábrán látható a repedés elhelyezkedése, tőle jobbra a keletkező kép, melyen látható a repedés TOFD-képe.





Középső zónában elhelyezkedő hibák

A vizsgált varrat középső tartományában elhelyezkedő hibák esetén a felületi és a hátfal jelek sértetlenül megjelennek a képernyőn. A kettő között jelennek meg a hiba felső és alsó csúcsáról lehasadó jelek (3.8. ábra). Ezek a jelek nagyon jól kirajzolják a kérdéses hiba profilját. A mélységi méretét közvetlenül a csúcsokról lehasadó jelek közti távolság mérésével megkapjuk. A képen megfigyelhető a felső és alsó csúcsokról jövő hullámok 180 fokos eltérése. A felső csúcs mindig fehér-fekete-fehér, az alsó mindig fekete-fehér-fekete sávként rajzolódik ki.

A TOFD-képen a repedés csúcsáról kapott (felső) sáv bal szélénél látható egy hiperbolikus görbe jellegű hullámsáv. Ez hasonló a pontszerű hibákról kapott indikációhoz, és lehetővé teszi a a hiba hosz-szának pontos meghatározását.



3.8. ábra. A hiba elhelyezkedése az X-varrat gyökzónájában az anyag belsejében (balra), és annak TOFD-képe (jobbra).

Ha a belső hiba orientációja hasonlatos a *15. ábrán* láthatóhoz, és/vagy mélység irányú kiterjedése kicsi (kisebb mint az ultrahangos impulzus lecsengésének hangútja, néhány mm), a felső és alsó csúcsokról jövő jelek nem különíthetőek el egymástól. A TOFD-kép ilyenkor összeolvadási hiány képét mutatja. A méretet ebben az esetben nem lehet meghatározni. Az értékelést végző személy ilyenkor azt tudja csak mondani, hogy a hiba kisebb, mint az adóimpulzus lecsengési távolsága (ami a frekvencia, csillapítás, stb. függvénye).

Az ilyen típusú (3.9. ábra) hosszú varratoknál a TOFD igen hatékony technika a belső zónában elhelyezkedő hibák detektálásához és méretének meghatározásához.







Gyökösszeolvadási hiány

A TOFD szempontjából ez a fajta hiba hasonlatos a fentebb említett belső felületre kifutó repedéshez. A hiányos gyök erős lehasadó (vagy pontosabban fogalmazva visszaverődő) jelet kelt. Ennek a jelnek a fázisa ellentétes a hátfaljelhez képest (3.10. ábra). Hogy ez a jel lehasadó, vagy visszaverődő, annak a TOFD-jellemzés szempontjából nincs jelentősége.

Figyeljük meg a 3.10. ábrát. A hátfaljel felett megjelenik a gyökhiányból adódó indikáció, de maga a hátfaljel is végig látható marad. Ebben az anyagban még látható néhány kisebb pontszerű hiba és anyagszerkezeti inhomogenitás, ami teljesen szokványos jelenség. A TOFD tulajdonsága, hogy kihang-súlyozza az ilyen eltéréseket, ami a hagyományos ultrahangos módszerrel általában láthatatlan marad.

3.10. ábra. Gyök-összeolvadási hiány elhelyezkedése az anyagban és annak TOFD-képe.





Atomerőműi Képzési Bázis

A konkáv felületű gyökhibák (gyök-beszívódás) a gyök-összeolvadási hiánnyal hasonló képet adnak (3.11. ábra). A hiba csúcsa megjelenik a TOFD-képen, és jó közelítéssel kirajzolja a hiány keresztmetszetét. A hátfaljel ugyan látszik de itt – amint az várható is – kisebb deformáció tapasztalható.

3.11. ábra. Gyökbeszívódás egy V-varratnál és annak TOFD-képe.



Összeolvadási hiány az összeolvadási zónában

A varratanyag és az alapfém összeolvadási felületén összeolvadási hiányok fordulhatnak elő. Egy ilyen eset látható a 3.12. ábrán. Az ilyen típusú hibák TOFD szempontból hasonlatosak a középső zónában elhelyezkedő hibákhoz, két különbséggel. Az első, hogy a hiba az alapfém hegesztési élkiképzésének megfelelő orientációjú. E hiba ferde síkja a TOFD számára nem jelent akadályt. A második, hogy a hiba felső csúcsáról kapott jel részlegesen beleolvadhat a felületi hullám jelébe, mint az ábrázolt esetben is. Ennél a példánál a felső hibacsúcs jele kivehető, mert a felületi hullámjel amplitúdójára szuperponálódik, megnövelve azt. Ha nem így nézne ki a hiba képe, a kiértékelő számára a mélységének meghatározása nehézséget okozhatna.



3.12. ábra. Az összeolvadási hiány elhelyezkedése az alapfém és a varratanyag között a falvastagság középső tartományában, és ennek TOFD-képe.



Porozitás

A porozitás sorozatos hiperbolikus jellegű, változó amplitúdójú görbék formájában mutatkozik meg a TOFD-képen (3.13. ábra), hasonlóan a pontszerű hibákhoz. A porózus anyag közelálló, kisméretű légbuborékainak jelei összeadódnak. Ez az egyes pontszerű hibák jellemezhetőséget rontja, de a porozitás jelleget egyértelművé teszi.







Keresztirányú hibák

A varrat hossztengelyére (közel) merőleges síkban elhelyezkedő hibák nem igazán jellemzőek a hosszvarratokra. Hagyományos ultrahangos módszerrel, a varratra merőleges besugárzási irányú letapogatással nem is igazán lehet őket kimutatni. A *3.14. ábra* TOFD-képén látható az ábrázolt keresztirányú repedés tipikus megjelenési formája. Ez a pontszerű hibához hasonló karakterisztikát mutat hiperbolikus jellegű karakterisztikát mutat. E kép alapján nem lehet megkülönböztetni egy keresztirányú repedést és egy felületközeli porozitást. Ennek megállapításához további, kiegészítő vizsgálatok szükségesek.



3.14. ábra. Egy külső felületre kifutó keresztirányú hiba és TOFD-képe.

Varratsorok közti összeolvadási hiány

Többsoros hegesztési eljárás esetén az egyes varratsorok közt a felülettel párhuzamos síkú összeolvadási hiány alakulhat ki. Ezt a jellegzetes hibát transzverzális hullámú impulzus-visszhang módszerrel nem tudjuk kimutatni. A TOFD-képes erre. Ez a hibatípus jellegzetesen egy önálló, nagy amplitúdójú jelként jelentkezik a felületi és hátfaljel közti tartományban (*3.15. ábra*). Ha ennek a jelnek a hosszirányú kiterjedése elég nagy, akkor egyértelműen megkülönböztethető a porozitástól, vagy pontszerű hibától. A repedéscsúcsok nem különülnek el egymástól, mivel ezek vertikális irányban közel azonos helyen vannak. A képen megfigyelhető a felületi hullámmal ellentétes hullámfázis is.

Szerencsére ez a hibatípus nem annyira veszélyes, mint a felületre merőleges elhelyezkedésű hibák. Hagyományos, merőleges besugárzással történő impulzus-visszhang módszerrel jól kimutatható, ha a varratkoronát leköszörülték.





3.15. ábra. A varratsorok közti összeolvadási hiány elhelyezkedése és annak tipikus TOFD-képe.

3.7. Jellegzetes TOFD szkennelési problémák

A többi ultrahangos módszerhez hasonlóan a TOFD-szkennelésnél is előfordulhatnak nehézségek. Néhány fő dolog ezek közül:

- Nem megfelelő erősítés (túl kicsi vagy nagy).
- Rossz kapubeállítások.
- Nem megfelelő vizsgálófej-szeparáció (az adó- és vevővej közötti távolság).
- Rossz csatolás.
- Erős zaj.



4. Hegesztett kötések vizsgálata futásidő-szóródásos eljárással

4.1. MSZ EN ISO 10863 HEGESZTETT KÖTÉSEK RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATA

Az MSZ EN ISO 10863 Hegesztett kötések roncsolásmentes vizsgálata. Ultrahangos vizsgálatok. A futásidő-szóródásos (TOFD-) módszer alkalmazása (ISO 10863:2020). A vizsgálati szabvány irányelveket fogalmaz meg, és útmutatót tartalmaz a hegesztési varratok TOFD-vizsgálatával kapcsolatban. A vizsgálati szinteket a szabvány *1. táblázata* tartalmazza:

Testing level	TOFD setup	Reference block for setup verification (see 8.2)	Reference block for sensitivity settings (see 10.1.4)	Offset scan	Written test procedure
А	As in Table 2	No	No	No	This International Standard
В	As in Table 2	No	Yes	No	This International Standard
С	As in Table 2	Yes	Yes	а	Yes
D	As defined by specification	Yes	Yes	а	Yes
a The necessity, number and position of offset scans have to be determined.					

A TOFD-vizsgálat beállítására a szabvány 2. táblázata tesz ajánlást:

Thickness	Number of TOFD setups	Depth range	Centre frequency	Beam angle (longitudinal waves)	Element size	Beam intersection
t mm		Δt	J MHz	°	mm	
6 to 10	1	0 to <i>t</i>	15	70	2 to 3	2/3 of t
>10 to 15	1	0 to <i>t</i>	15 to 10	70	2 to 3	2/3 of t
>15 to 35	1	0 to <i>t</i>	10 to 5	70 to 60	2 to 6	2/3 of t
>35 to 50	1	0 to <i>t</i>	5 to 3	70 to 60	3 to 6	2/3 of t
	>50 to 100 2	0 to <i>t</i> /2	5 to 3	70 to 60	3 to 6	1/3 of t
>50 to 100		t/2 to t	5 to 3	60 to 45	6 to 12	5/6 of t
		0 to <i>t</i> /3	5 to 3	70 to 60	3 to 6	2/9 of t
>100 to 200 3	t/3 to 2t/3	5 to 3	60 to 45	6 to 12	5/9 of t	
	2/3t to t	5 to 2	60 to 45	6 to 20	8/9 of t	
>200 to 300 4		0 to <i>t</i> /4	5 to 3	70 to 60	3 to 6	1/12 of t
		t/4 to t/2	5 to 3	60 to 45	6 to 12	5/12 of t
	4	t/2 to 3t/4	5 to 2	60 to 45	6 to 20	8/12 of t
		3 <i>t</i> /4 to <i>t</i>	3 to 1	50 to 40	10 to 20	11/12 of t; or t for $\alpha \le 45^{\circ}$

Az érzékenységi szintek beállítása és vizsgálat verifikáláshoz a szabvány mellékletében megnevezett referenciadarabokat szükséges használni.





4.2. HEGESZTETT KÖTÉSEK INDIKÁCIÓINAK ÉRTÉKELÉSE

Detektálás, helymeghatározás, méretezés

Elfogadási szint és értékelés

Miden gyártott termék (szerkezet, munkadarab) mérnöki munka, és szerkezeti számítások sokaságából álló tervezés, majd a fizikai gyártói tevékenység eredménye. Ezen munkadarabok alapvető minőségi követelményeit a későbbi felhasználásból származó igénybevételek, illetve az azok által támasztott minőségi követelmények határozzák meg.

A "célnak megfelelő" azt jelenti, hogy a termék gyártása során elfogadható néhány kisebb, az elméleti jóságtól való eltérés, folytonossági hiány, amennyiben előreláthatóan ez a későbbi felhasználást, működést nem befolyásolja. Ilyen megfontolások alapján kerülnek meghatározásra a termékekben előforduló eltérésekre, és folytonossági hiányokra vonatkozó elfogadási szintek, amik meghatározzák a termékek vizsgálatainál – így az ultrahangos vizsgálatnál is a alkalmazandó vizsgálati kimutatási határokat.

A folytonossági hiányok precíz hely- és méretmeghatározásának érdekében az ultrahangos vizsgálat érzékenységét úgy kell megválasztani, hogy az adott vizsgálati darabra vonatkozó, előírásokban (szabványokban) meghatározott legkisebb reflektor is észlelhető legyen.

Hegesztett kötések ultrahangos vizsgálatakor a következőkben felsorolt, és a továbbiakban részletezett MSZ EN ISO szabványok az irányadók:

- MSZ EN ISO 17635.
- MSZ EN ISO 11666
- MSZ EN ISO 17640
- MSZ EN ISO 23279
- MSZ EN ISO 15626:2019



<u>Az MSZ EN ISO 17635 szabvány</u> irányelveket fogalmaz meg, és útmutatót tartalmaz a hegesztési varratok roncsolásmentes vizsgálati eljárásainak kiválasztására, valamint az eredmények minőségbiz-tosítási szempontú értékelésére vonatkozóan.

Előírja, hogy a vizsgáló szervezet legyen független a gyártó szervezettől, és annak tevékenységeitől, ezzel biztosítva az objektivitást és a megfelelő minőségbiztosítási felügyeletet.

A hegesztési varrat minőségi szintje függ annak típusától, méretétől, valamint a benne található hibák fajtájától, és helyétől.

Az előbbi információk a vizsgálat végrehajtásának szempontjából is fontosak – tekinthetjük a vizsgálat elsődleges bemenő adatának is.

Ezek alapján meghatározhatjuk, hogy a vizsgálószemélyzetnek egy hegesztési varrat vizsgálata előtt milyen információkra van szüksége:

- A vonatkozó szabvány által előírt követelmények (vagy a megrendelő specifikációi).
- Vizsgálati terv (amennyiben szükséges) és/vagy eljárás-utasítás.
- A szabványostól eltérő hegesztési varrat esetében a szükséges intézkedések (Megállapodásokon, illetve speciális előírásokon alapuló követelményrendszer szerinti eljárás-utasítás).
- A vizsgálat helye és ideje.

Elfogadási szintek

Az ISO 5817 vagy ISO 10042 szabványokban szereplő minőségi szintek, valamint a vizsgálati módszerek, és átvételi szintek közötti kapcsolat nehezen definiálható, nem számszerűsíthető. Az MSZ EN ISO 17635 szabvány az ultrahangos vizsgálatok esetében ezt a kapcsolatot az alábbiak szerint határozta meg:

Ultrahangos impulzus-visszhang módszer (UT–PE):

1. táblázat

Minőségi szint ISO 5817	Módszer és vizsgálati szint ISO 17640	Átvételi szintek ISO 11666
В	В	2
С	A	3

célja A B és C minőségi szinteknek megfelelő 2. és 3. ultrahangos átvételi szintek egyedi követelményeit az MSZ EN ISO 11666 szabvány határozza meg. (Ferromágneses acélok teljesen áthegesztett kötései esetén, ahol a vastagság 8 mm és 100 mm közé esik).



Futásidő szóródás módszer (UT–TOFD):

2. táblázat

Minőségi szint ISO 5817	Módszer és vizsgálati szint ISO 17640	Átvételi szintek ISO 11666
В	С	1
С	В	2
D	А	3

Megjegyzés: Amennyiben az indikációk jellemzését az MSZ EN ISO 23279 szabvány szerint végezzük, a felületi indikációk nem elfogadhatóak.

Az alábbi ábrán a hegesztési varratok ultrahangos vizsgálatára vonatkozó szabványok, és azok kapcsolata látható:





Az indikáció hosszúságának mérése

Hegesztési varratok esetén, az MSZ EN ISO 15626 szabvány irányelveket fogalmaz meg és útmutatót tartalmaz az átvételi szintekhez.



Összefoglalás

5.

A TOFD-technika hatékony vizsgálati módszer. A varratok és azok hőhatásövezetének vizsgálatakor a következő fő előnyöket kínálja:

- Jó hibakimutatási képesség az anyag belső zónájában.
- Pontos hibaméret-meghatározás a lehasadó jelek futásidejének különbsége alapján.
- Jó detektálási képesség a ferdén elhelyezkedő és/vagy a varratközéptől távolabb eső hibák esetén is.
- Gyors lineáris szkennelés.
- Amplitúdó-független értékelés.
- Varratgeometriától független beállítás.

A TOFD-technika gyors és gazdaságos, egy vizsgálófej-párossal akár 75 mm-es (3") falvastagságot is le lehet fedni. Nagyobb falvastagságú anyagok vizsgálata is lehetséges több vizsgálófej-pár alkalmazásával.

A többi vizsgálati technikához hasonlóan, a TOFD-nak is vannak korlátai, melyekkel a vizsgálatot végzőknek tisztában kell lenniük. Elsődleges korlát a külső-és belső felületközeli tartományokban jelentkező holttér, ahol is a hibák általában nem mutathatóak ki. Ezeknek a holttereknek a tartománya függ a TOFD-beállításoktól, frekvenciától, csillapítástól. Alacsonyabb frekvencia és kis csillapítás nagyobb, magasabb frekvencia és nagyobb csillapítás kisebb holtteret eredményez. A TOFD-nál alkalmazott vizsgálófejek frekvenciája általában néhány MHz-el magasabb, mint a hagyományos technikáknál használatos fejeké.

A korlátozó tényezők összefoglalása:

- 1. Holttér a külső- és belső felületközeli zónákban.
- Nagyon érzékeny a kisméretű hibákra, a téves detektálás elkerüléséhez ajánlatos együtt alkalmazni az impulzus-visszhang módszerrel.
- 3. A TOFD-képek értelmezése bonyolult, szakértelmet igényel.
- 4. A beállításokat igen körültekintően kell elvégezni.
- 5. A középsíktól távol elhelyezkedő hibák méret-meghatározási pontatlanságot eredményeznek.
- 6. Alacsony jel/zaj viszony.



