

Bevezetés az atomerőművi anyagvizsgálatokba

4. változat

Dr. Aszódi Attila
Bácskai Péter István
Dr. Gémes György András
Kiss Attila
Dr. Pór Gábor Géza

Szerkesztette: Kiss Attila

Lektorálta: Dr. Májlinger Kornél

2016.02.26.

Tartalomjegyzék

1. Anyagismereti alapok	9
1.1. Az anyagismeretről általában	9
1.2. Az anyagvizsgálat szerepe, célja, trendje	10
1.3. Az anyag definíciója és körforgása	10
1.3.1. A rendszer fogalma	12
1.3.2. A fázis fogalma	12
1.3.3. A komponens fogalma	12
1.3.4. A rendszer állapotát befolyásoló tényezők	12
1.4. Az anyagok csoportosítása	13
1.4.1. Az anyagok csoportosítása halmazállapotuk szerint	13
1.4.2. Az anyagok csoportosítása eredetük szerint	14
1.4.3. Az anyagok csoportosítása felhasználás szerint	14
1.5. A szerkezeti anyagok relatív fontossága	15
1.6. A szerkezeti anyagok és tulajdonságaik	15
1.6.1. A szerkezeti anyagok tulajdonságai	17
1.6.2. Kémiai kötések	18
1.7. A szerkezeti anyagok fajtáinak általános tulajdonságai	19
1.7.1. A fémek általános tulajdonságai	20
1.7.2. A fémüvegek általános tulajdonságai	20
1.7.3. Szerves anyagok, polimerek általános tulajdonságai	21
1.7.4. A kerámiák általános tulajdonságai	21
1.8. A fejezethez tartozó animációk	22
1.9. Ismétlő kérdések az 1. fejezet anyagához	22
2. Válogatott részletek az anyagszerkezettanból	24
2.1. A metallográfia és jelentősége	25
2.1.1. A fémek tipikus rácsszerkezetei és az átkristályosodás	25
2.2. Fémtani alapfogalmak	28
2.2.1. A színfém	29
2.2.2. Ötvözet	29
2.2.3. Ötvözetrendszer	29

2.2.4.	Ötvöző	29
2.2.5.	Mikroötvözők	30
2.2.6.	Diszlokáció	30
2.2.7.	Az ötvözetekben előforduló három fajta szilárd halmazállapotú fázis	30
2.3.	A színtémek olvadási és dermedési görbéje és a kristályosodás folyamata .	32
2.4.	Az ötvözetek	37
2.4.1.	Az ötvözet létrejötte	38
2.4.2.	Az ötvözet olvadása és dermedése	38
2.4.3.	Az ötvözők állapota az ötvözetben	39
2.4.4.	Az ötvözetek állapotábrái	44
2.4.5.	Az ötvözetek állapotábrájának gyakorlati jelentősége	46
2.5.	A vas-karbon ötvözetrendszer	53
2.5.1.	A vas, a karbon és a vas-karbon ötvözetek	53
2.5.2.	A vas-karbon ötvözetek fajtái	54
2.5.3.	A vas-vaskarbid ötvözetek állapotábrájának tulajdonságai	56
2.5.4.	A vas-vaskarbid ötvözetekben bekövetkező átalakulások függése a hűlési sebességtől	61
2.6.	A fejezethez tartozó animációk	61
2.7.	Ismétlő kérdések a 2. fejezet anyagához [Jarfas]	62
2.8.	Feladatok a 2. fejezet anyagához [Jarfas]	66
3.	Energetikai és mechanikai alapok az atomerőművi anyagvizsgálatokhoz	68
3.1.	Mechanikai igénybevétel - Szilárdságtani alapok	70
3.2.	Törésmechanikai alapok	73
3.3.	Kisciklusú fáradás	76
3.4.	Ismétlő kérdések a 3. fejezet anyagához	77
4.	A roncsolásos anyagvizsgálatok	79
4.1.	A szakítóvizsgálat	81
4.1.1.	A valós rendszer	91
4.2.	A nyomóvizsgálat	92
4.3.	A hárompontos hajlítóvizsgálat	95
4.4.	A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat	96
4.5.	A fejezethez tartozó videók	100
4.6.	A fejezethez tartozó animációk	101
4.7.	Ismétlő kérdések a 4. fejezet anyagához	103
5.	A roncsolásmentes anyagvizsgálatok	105
5.1.	Vizuális megfigyelés (Inspekción)	107
5.2.	Folyadékbehatolásos módszerek (penetráció)	110
5.3.	Mágneses repedésvizsgálat	112

5.4.	A Barkhausen-zaj	118
5.5.	Elektromágneses vagy örvényáramos (eddy current) teszt alapjai	119
5.6.	Az ultrahangos vizsgálat alapjai	120
5.7.	Az akusztikus emissziós vizsgálat az atomerőművi gyakorlatban	129
5.7.1.	Az akusztikus emisszió keletkezése:	132
5.7.2.	Az akusztikus emissziós spektrum	132
5.7.3.	Az akusztikus emissziós jelforrások osztályozása	133
5.7.4.	Az akusztikus emisszió mint mechanikai hullám	134
5.7.5.	Az akusztikus emissziós vizsgálat célja	136
5.7.6.	Jelfeldolgozás az akusztikus emisszióban	139
5.7.7.	Akusztikus emissziós események lokalizációja	141
5.7.8.	A Kaiser-effektus	143
5.7.9.	Kalibrálás	145
5.7.10.	Alkalmazási területek	145
5.8.	Radiográfiák: röntgensugaras, neutronsugaras átvilágítás	146
5.9.	Hőtérképezés	148
5.10.	Rezgésvizsgálatok és termohidraulikai vizsgálatok	151
5.11.	A fejezethez tartozó animációk	154
5.12.	Ismétlő kérdések a 5. fejezet anyagához	155
6.	Anyagvizsgálatok a primerkörüi gyakorlatban	157
6.1.	A meghibásodás valószínűsége	158
6.2.	Meghatározások az MVM Paksi Atomerőmű Társasági szakkifejezéstárból	159
6.2.1.	Idegen test	159
6.2.2.	Szennyeződés	160
6.3.	A primer kör főbb berendezéseinek áttekintése	160
6.4.	Alkalmazott vizsgálati módszerek	161
6.4.1.	Vizuális vizsgálatok az Atomerőműben	161
6.4.2.	Penetrációs vizsgálatok az Atomerőműben	166
6.4.3.	Mágnesezhető poros (mágneses) repedésvizsgálat az Atomerőműben	167
6.4.4.	Ultrahangos vizsgálatok az Atomerőműben	173
6.4.5.	Röntgenes és izotópos vizsgálatok	177
6.4.6.	Örvényáramos repedésvizsgálat a Paksi Atomerőműben	180
6.4.7.	Akusztikus emissziós vizsgálatok a Paksi Atomerőműben	184
6.5.	Idegentest kezelés a Paksi Atomerőműben	189
6.5.1.	Idegentestek megelőzése	189
6.5.2.	Idegentest felderítés, eltávolítás, manipulátorok	193
6.6.	Adminisztráció és archiválás	195
6.6.1.	Vizsgálati technológiák szükségessége és felépítése	196
6.6.2.	Jegyzőkönyvezés és archiválás	196
6.7.	A fejezethez tartozó videók	197

6.8. A fejezethez tartozó animációk	199
6.9. Ismétlő kérdések a 6. fejezet anyagához	200
6.10. Feladatok a 6. fejezet anyagához	201
7. Anyagvizsgálatok a szekunder körü gyakorlatban	202
7.1. Csővezetékek általánosságban	202
7.2. Turbina	204
7.3. Kondenzátorok, hőcserélők	204
7.4. Az SD (gőz)kondenzátorok vizsgálata	205
7.5. Ismétlő kérdések a 7. fejezet anyagához	206
7.6. Feladatok a 7. fejezet anyagához	206
8. Megoldások a fejezeteket záró feladatokra	207
8.1. Megoldás a 2. fejezet feladataira [Jarfas]	207
8.2. Megoldás a 6. fejezet feladataira	208
8.3. Megoldás a 7. fejezet feladataira	209

Köszönetnyilvánítás

Ez az elektronikus jegyzet a "Társadalmi Megújulás Operatív Program Képzés- és talomfejlesztés, képzők képzése, különös tekintettel a matematikai, természettudományi, műszaki és informatikai képzésekre és azok fejlesztésére" című TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1 kódszámú pályázat támogatásával készült, melyet a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Nukleáris Technikai Intézet (NTI) nyert el és valósított meg a következő oldalon látható szerzők bevonásával.

Külön köszönjük Dóczi Miklós úr segítségét az Örvényáramos repedésvizsgálat a Paksi Atomerőműben című alfejezethez.

Végül, de nem utolsó sorban mondunk köszönetet Nyíri Orsolyának a jegyzet begépelésénél nyújtott segítsége miatt.

A közreműködőkről

A tananyag elkészítésében az alábbi öt szerző és a lektor vett részt:

Prof. Dr. Aszódi Attila, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) egyetemi tanára, a BME Nukleáris Technikai Intézetének igazgatója. Okleveles gépészmérnök és energetikus mérnök.

Bácskai Péter István, az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. munkatársa. Korábban az Anyagvizsgálati Osztályon dolgozott, jelenleg a Vizuális Technika és Manipulátor Kezelő Csoport (korábban HAVARIA csoport) tagja. Végzettségei: gyártástechnológus üzemmérnök, diagnosztikai szakmérnök.

Dr. Gémes György András, a Vincotte International Hungary Kft. Anyagvizsgáló és Állapotellenőrző Laboratórium üzletág igazgatója. Végzettségére nézve okleveles gépészmérnök, okleveles reaktorteknikai szakmérnök, a fizikai tudományok doktora.

Kiss Attila, a BME Nukleáris Technikai Intézetének tudományos segédmunkatársa, okleveles gépészmérnök. A jegyzet szerkesztője.

Dr. Pór Gábor Géza, egyetemi docens (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, BME Nukleáris Technikai Intézet; főiskolai tanár (Dunaújvárosi Főiskola), a Magyar Akusztikus és Ipari Diagnosztikai Laboratórium (MADILAB) vezetője; okleveles fizikus, a fizikai tud. kandidátusa, AT2-UT2.

Dr. Májlinger Kornél, a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék egyetemi adjunktusa. Végzettségére nézve okleveles gépészmérnök, a gépészeti tudományok területén ért el PhD fokozatot. A tananyag **lektori** feladatait látta el.

Tanácsok a jegyzet használatához

A jegyzetben szereplő animációk a Flash Player 11.2 verziójára lettek optimalizálva. Ezért az animációk tökéletes megjelenítéséhez a Flash Player 11.2-es vagy frissebb verziójára lehet szükség.

Bevezetés

Az emberiség evolúciója régóta letért a pusztán biológiai alkalmazkodás útjáról, ezzel egyedülálló lehetőséget nyitott meg magának a földi ökoszisztéma fajai között. Ennek lényege, hogy fajunk, az Emberiség a környezeti változásokra ezentúl nem egy hosszadalmas mutáció-sorozattal válaszol [Darwin], hanem ehelyett az alkalmazkodást elősegítő tárgyakat alkot meg az eddig egyedülállónak bizonyult gondolkodó, az események lehetséges következményeit szimuláló, kreatív emberi elme teremtő ereje segítségével. A tárgyasult evolúció lehetővé tette az emberiség számára, hogy olyan földi és földönkívüli lényeket is átmenetileg vagy tartósan benépesítsen, mint a fagyos sarkvidék, a perzselő sivatagok vagy a földközeli világűr. Ez a folyamat, ma is tart, elég, ha csak az emberrel végrehajtandó majdani Mars-expedíciók terveire gondolunk. Aligha vonja bárki kétségbe, hogy a tárgyasult evolúció, mint más fajokkal szembeni evolúciós előny az Emberiség felemelkedésének, elterjedésének és jelenlegi viszonylagos jólétének záloga. Nem szabad megfélemlenünk ugyanakkor a tárgyasult evolúció (fenntartható (?) fejlődés) árnyoldalairól, amikről többek között átfogó ismereteket szolgáltat Dr. Aszódi Attila és Dr. Csom Gyula előadássorozata az Atomenergia és fenntartható fejlődés (BMETE809008) című tárgy keretében.

A tárgyasult evolúció, mint eszköz az alkalmazkodásra, igényli a különböző nyersanyagokat az eszközök megalkotásának folyamatában. Ezek a nyersanyagok kezdetben a természetben fellelhető növényi (pl. fa, spárga, nád, kőolaj, földgáz, stb.), állati (pl. csontok, bőrök, szőrök, zsiradékok, inak, stb.) és szervetlen (kő és különböző egyéb kerámiák, érc, stb.) eredetű anyagok voltak, majd a tudomány fejlődésével egyre kifinomultabb mesterségesen előállított nyersanyagok is megjelentek (farostlemez, nyersvas, acél, nemesfémek, beton, stb.). Ezen nyersanyagok előállításának lehetőségeit, tulajdonságait, ezen tulajdonságok befolyásolásának lehetőségeit, a tulajdonságok ellenőrzésének módjait, a kész eszköz karbantartásának, működőképességének (funkcióképességének), állapotának ellenőrzési, tönkremenetelük okainak feltárási lehetőségeit érdemes és kell ismerni. Ezen ismereteket manapság az anyagismeret és anyagvizsgálat tárgykörébe soroljuk.

Az anyagvizsgálatnak több feladata van. Ezek közül az egyik az, hogy a gépek (tárgyak) alkatrészeit alkotó úgynevezett szerkezeti anyagok tulajdonságairól a tervező, illetve a gyártó számára olyan ismereteket szolgáltatson, amelyek lehetővé teszik azon

fontos kérdés eldöntését, hogy a rendelkezésre álló anyag(ok) közül egy meghatározott feladatra melyik anyag(ok) a legmegfelelőbb(ek). Az anyagvizsgálatok második feladata feleletet adni arra, hogy a legyártott munkadarab belsejében nincs-e olyan anyaghiba (például gáz- vagy salakzárvány, belső repedés, stb.), amely annak terv szerinti működését lehetetlenné teszi (hibakereső eljárások). Megemlítendő, hogy a gyakorlatban hibamentes szerkezet nincs, csak megengedhető hibaméretnél nagyobb hibát nem tartalmazó szerkezet. Éppen ezért fontos a szerkezetben lévő hibák növekedésének üzem közbeni felügyelete, monitorozása. Sajnos előfordul, hogy üzem közben egy alkatrész tönkremegy, vagy valamilyen módon rendellenesen károsodik (például kopik, deformálódik) és a gép leáll, rosszabb esetben balesetet okoz. Az ilyen esetek okainak felderítése is az anyagvizsgálat feladata (katasztrófa elemzés). Az anyagvizsgálatokban használt vizsgálati módszereknek tehát az anyag tulajdonságait (szilárdság, összetétel, alakíthatóság, keménység, stb.) kell tudni megadniuk. A vizsgálati módszereknek olyanoknak kell lenniük, hogy a vizsgált tulajdonságot egyértelműen és hibátlanul, vagyis megbízhatóan állapítsák meg. Az anyagvizsgálat megbízhatóságának próbája, ha a vizsgált tulajdonság szempontjából egynemű anyagnak még ellentétes érdekű vizsgálónál történt vizsgálata többször ismételve is azonos, vagy a mérési pontosság és tulajdonság megengedett szórási határain belül eső eredményt mutat. Az anyagvizsgálatok egyértelműségét és reprodukálhatóságát garantáló szabatosságát úgy érik el, hogy az eljárásokat kötelező erejű, vagy legalábbis ajánlott szabványokban fogalmazták meg. Egy anyagvizsgálati eljárás alkalmazása előtt meg kell bizonyosodni, hogy a legfrissebb szabvány szerint kívánjuk-e elvégezni a vizsgálatot. Az anyagvizsgálati eljárásokat, amennyire az lehetséges, az üzem közben előforduló igénybevételek laboratóriumi utánzásával alakítják ki. Az ismétlés eredményét a vizsgálati körülmények szabatos meghatározása garantálja.

Az anyagvizsgálati módszerek osztályozhatóak alkalmazási területük szerint a következők szerint:

- A fémtani vizsgálatok feladata a fémek, elsősorban a vas-, az alumínium, a nikkel, a titán, stb. alapú ötvözetek, mint a legfontosabb gépípari szerkezeti anyagok jellemzőinek és alakítási tulajdonságainak megállapítása.
- A fizikai vizsgálatok feladata a fajsúly, fajhő, lineáris és térfogati hőtágulás, hővezetési tényező, elektromos vezetőképesség, elektromos ellenállás és a mágneses tulajdonságok meghatározása.
- A kémiai vizsgálatok legfontosabb feladata az anyagminták kémiai összetételének meghatározása.
- A mechanikai vizsgálatok feladata olyan anyagjellemzők meghatározása, amelyek alapul szolgálnak egy szerkezet megengedett igénybevételének számításához a szilárdságtan módszereivel. Ilyen anyagjellemző például a folyáshatár, amely a statikus szilárdságtani méretezés alapja.

- A technológiai vizsgálat legtöbbször azt ellenőrzi, alkalmazhatók-e az anyagon a feldolgozás közben előforduló technológiai eljárások, úgy mint a különféle hidegalakítások, esetleg hegesztések, forrasztások, stb. Ezek a fajta vizsgálatok legtöbbször többváltozós probléma megoldását jelentik, így gyakran több érzékenységi vizsgálat elvégzését igénylik.
- Az anyagfolytonossági és anyagszerkezeti hibakereső vizsgálatok a felszínre kinyúló, vagy a belső repedések, rejtett belső folytonossági hibák (pl. különféle zárványok) kimutatására szolgálnak. A roncsolásmentes vizsgálatok, ahogy nevük is mutatja a legtöbb vizsgálati eljárástól abban is különböznek, hogy a szerkezet, vagy alkatrész épségének veszélyeztetés nélkül végezhetők el.

Az anyagvizsgálati módszerek osztályozhatóak a vizsgálattal együtt járó beavatkozás jellege szerint is:

- A roncsolásos anyagvizsgálatok esetében egy anyagmintát veszünk a vizsgált rendszerből és adott terhelésnek vetjük alá. Az anyagminta a vizsgálat során általában maradékalakváltozást szenved (roncsolódik és gyakran tönkremegy), így a vizsgált objektumot megváltoztatjuk és a vizsgálat végére más állapotba kerül, mint amilyenben a vizsgálat kezdetén volt. A maradékalakváltozás folyamata során rögzítjük azokat a paramétereket (például méretváltozás, terhelés nagysága, stb.), amik az anyagminta megváltozását jellemzik és abból a különböző jellegű (például statikus vagy dinamikus időbeli lefutású, fárasztó, törésmechanikai, stb.) terhelésekre méretezhető az eredeti rendszer.
- Ezzel szemben, a roncsolásmentes anyagvizsgálatok alatt olyan eljárásokat értünk, amely során a vizsgált objektum megtartja eredeti formáját, minőségét, és funkcióját, azaz rendeltetésszerű használatra továbbra is alkalmas marad. Ebből azonnal következik hatalmas előnye a roncsolásos és/vagy mintavételezéssel történő anyagvizsgálatokhoz képest: a vizsgált objektumot nem változtatjuk meg semmilyen értelemben, olyan állapotban marad, amilyen a vizsgálat megkezdésekor volt. Ez akkor is jelentős előny, ha előfordul, hogy a roncsolásmentes anyagvizsgálatra kiválasztott alkatrészt esetleg nem is építik vissza az eredeti berendezésbe.

Fontos kérdés az anyagvizsgálatokkal kapcsolatban, hogy miképpen válasszuk ki az anyagmintát egy szerkezetből vagy beszállított tételből. A vizsgálathoz szükséges anyagmintát úgy kell kiválasztani, hogy a belőlük kialakított próbatesteken végzett vizsgálatok a tételre jellemző értékeket adják. Fontos megjegyezni, hogy minden vizsgálati eredmény helyessége elsősorban a próbavétel helyességétől függ. A próbavétel módját az egyes anyagvizsgálati szabványok általában részletesen előírják.

Megjegyzendő, hogy nagyobb keresztmetszetű félkész vagy kész munkadarab felületi rétege általában más tulajdonságokat mutat, gyakran jobb szilárdsági tulajdonságú, mint

a belső magrészt. Ennek több oka van, úgymint a nagyobb anyagtisztaság, előnyösebb alakítási mód és a primer szemcsék kisebb mérete. Ilyen munkadaraboknál az anyagvizsgálathoz mindig egy megfelelő átlagértéket adó helyről munkálják ki a próbatestet.

Előfordulnak olyan munkadarabok is, amelyeknek állapotát beépítés előtt minden egyes darabon ellenőrizzük. Ilyenek azok a gyártmányok, amelyek váratlan meghibásodása emberéletet veszélyeztet, vagy nagy anyagi kárt okozhat. Ebben az esetben roncsolásmentes hibakereső eljárásokat alkalmaznak.

Mint minden értékteremtő folyamatban, így az atomenergetikában is nagy számú eszközt használunk, amelyek alkatrészeinek funkcióképességét, a rendszer egészében betöltött szerepétől függő gyakorisággal ellenőrizni kell az élettartamuk alatt. Ez a jegyzet a teljesség igénye nélkül kíván betekintés nyújtani - egy anyagismereti, anyagvizsgálati tömör bevezető után - az atomerőművi anyagvizsgálat szép szakmájának hazai gyakorlatába.

1. fejezet

Anyagismereti alapok

A fejezetet összeállította: *Kiss Attila*

Ebben a fejezetben olyan fontos alapfogalmak kerültek összefoglalásra, mint az anyag, az anyag körforgása, az anyagok csoportosíthatósága, a szerkezeti anyagok fajtái és azok általános tulajdonságai.

1.1. Az anyagismeretről általában

Az anyagismeret tárgya az anyag és annak tulajdonságai, eszköze a különböző anyagvizsgálatok [Csizmazia1]. Az anyagvizsgálat általános elve a következő. Egy rendszert (anyagmintát, munkadarabot) valamilyen jellel gerjesztünk és megfigyeljük (mérjük) a rendszer válaszát [Csizmazia2]. A válasz információt szolgáltat a rendszer (anyagminta, munkadarab) tulajdonságairól. Ennek egyszerű matematikai modellje egytagú kifejezéssel az alábbi:

$$y(x) = ax^b \quad (1.1)$$

ahol

- x – gerjesztés, amit általában egy adó (jellemzően az anyagvizsgáló gép része) bocsát ki,
- y – a mért rendszer válasz, amelyet általában egy vevő (ugyancsak az anyagvizsgáló gép része jellemzően) érzékel,
- a, b – anyagjellemzők, amikre kíváncsiak vagyunk.

Tehát az anyagvizsgálat során általában egy adott fajtájú jellel gerjesztjük (x) az anyagmintát és annak válaszát ($y(x)$) fogni képes vevővel pedig megfigyeljük az anyagmintából érkező választ. A válasz alapján pedig meghatározhatóak az anyagminta tulajdonságai (itt a és b).

1.2. Az anyagvizsgálat szerepe, célja, trendje

Az anyagvizsgálatot végző anyagvizsgáló az a személy, aki látja a gyártás során alkalmazott technológiák eredményét, az üzemidő alatt az alkatrészt érő hatások esetleges anyagtulajdonságot módosító (általában károsító) hatásait, az alkatrészek tönkremeneteléhez vezető okokat. Ezért neki fontos visszajelző szerepe van a gyártástechnológusok, a terméktervezők, az alkatrészt karbantartók és a döntéshozók felé [Csizmazia1].

Az anyagvizsgálat célja az adott anyagfajták megismerése és egy megfelelő anyagfajta kiválasztása egy használati eszköz (alkatrész) szerkezeti anyagának, annak hasznos funkciói optimális megvalósítása céljából [Csizmazia1].

Az anyagvizsgálat mai trendjéből az olvasható ki, hogy az anyagvizsgálattal szembeni elvárások (a kapott információk mennyiségére és minőségére is) világszerte nőnek és a drágább anyagvizsgálatok (mérés) helyett analitikus vizsgálatot vagy numerikus szimulációkat (olcsóbb eljárások) alkalmaznak egyre inkább. Megjegyzendő, hogy a numerikus szimulációkat méréssel történő hitelesítés, illetve kalibrálás nélkül nem fogadhatjuk el [Csizmazia1].

Az anyagvizsgálatok valamilyen jelenség kihasználásán alapulnak (az összes hibakereső módszer azon alapul, hogy a hibánál vagy annak környezetében valamiféle fizikai, kémiai, stb. tulajdonságváltozás lép fel), ezért az anyagismeretre használhatjuk az anyagtudomány kifejezést [Csizmazia2].

Szemléletformáló megjegyzésként érdemes megemlíteni, hogy az élettelen testekben léteznek időben makroszkopikusan azonos állapotok, míg az időben párhuzamos, bonyolult folyamatok jellemezte élő szervezetben nem. Ez az alapvető különbség a fémek és az élő szervezetek anyagtudománya (biológia, orvostudomány) között.

1.3. Az anyag definíciója és körforgása

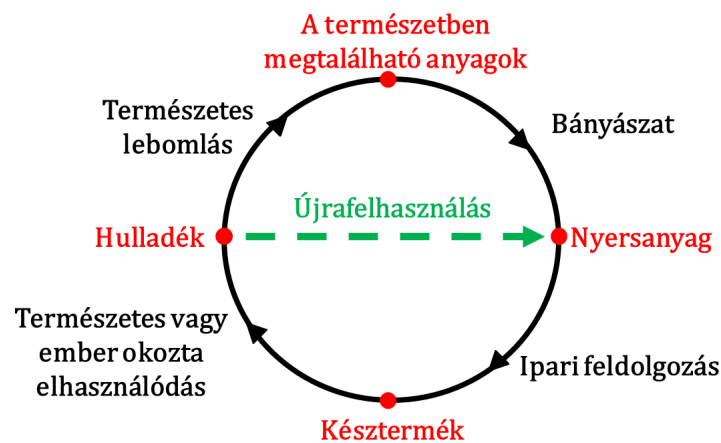
Fizikai szemlélet szerint, az anyag közönségesen az a szubsztancia, amiből a tárgyak állnak. Ez építi fel a megfigyelhető Világegyetemet. A relativitáselmélet értelmében nincs különbség az anyag és az energia között, mivel kölcsönösen egymásba alakíthatók. Ezt fejezi ki Einstein híres alábbi összefüggése:

$$E = mc^2 \tag{1.2}$$

ahol

- E – az energia (J),
- m – a tömeg (kg),
- c – a fény vákuumbeli sebessége (m/s).

Mérnöki szemlélet szerint, az anyagot az ember nyeri ki a természetből különféle eljárások útján (pl.: bányászat, betakarítás, vadászat, halászat, kőolaj kitermelés, stb.) és különféle ipari technológiákkal alakítja át olyanná, ahogy az igényeinek a legjobban megfelel. Az anyag körforgását az 1.1 ábra mutatja. Mint látható az anyag körforgásának folyamata a természetben megtalálható ércek és más anyagfajták kibányászásával kezdődik. A bányászat után átalakítják a kinyert anyagot kohászat és más anyagi minőséget átalakító eljárások útján ipari nyersanyaggá [Csizmazia1].



1.1. ábra. Az anyag körforgása [Csizmazia1]

Az ipari feldolgozás (pl. alakadó technológiák) során létrejön a hasznos funkció betöltésére alkalmas alkatrész, amelyet azután mint készterméket megfelelő ellenérték kifizetése után használatba vesz a felhasználó. Az alkatrész ezután természetes vagy ember okozta üzem közbeni elhasználódás útján tönkremegy elveszítve funkcióképességét és hulladékká válik [Csizmazia1]. A hulladékot kezelni kell. Ez lehet:

- újrafeldolgozás, újrahasznosítás,
- megsemmisítés,
- ártalmatlanítás,
- végleges elhelyezés (a természetbe).

Tehát, végső soron a hulladék a megfelelő hulladékkezelési eljárás után visszakerülhet a természetbe, vagy ha arra alkalmas, akkor újrafelhasználásra (idegen szóval "recycling") kerül. A végleges elhelyezés után a hulladékok természetes lebomlás útján előbb vagy utóbb visszakerülnek a természetbe és ismét a természetben megtalálható anyaggá válnak [Csizmazia1].

Az anyagok körforgását szemlélteti "Az anyag körforgása" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Az_anyag_korforgasa_D01.swf

1.3.1. A rendszer fogalma

Az anyagnak megfigyelés céljából a külvilágtól elkülönített részét rendszernek hívjuk. Egynemű (homogén) vagy egyfázisú a rendszer, ha egy adott halmazállapotú fázis található meg benne. Különnemű (heterogén) a rendszer, ha két vagy több önálló határoló felülettel (úgynevezett meniszkusszal) elválasztható részekből, úgynevezett fázisokból áll. Lásd még [[Prohaszka](#)].

1.3.2. A fázis fogalma

A rendszer homogén, kémiaiilag azonos tulajdonságokat mutató, önálló határoló felülettel elkülöníthető részét fázisnak nevezzük [[Csizmazia1](#)]. Jele: „F”.

1.3.3. A komponens fogalma

Komponensnek nevezzük a rendszert felépítő azonos anyagi minőségű (kémiai azonoságú) anyagokat [[Csizmazia1](#)]. Jele: „K”.

1.3.4. A rendszer állapotát befolyásoló tényezők

A rendszer állapotát befolyásoló legfontosabb tényezők a következők [[Prohaszka](#)]:

- abszolút hőmérséklet – T (K),
- abszolút nyomás – p (MPa),
- kémiai potenciál – μ_B (J/mol),
- az egyes komponensek koncentrációja,
- a komponensek és fázisok száma.

A szabad állapotváltozók (Sz), a komponensek (K) és fázisok száma (F) között szigorú összefüggés van, amit a Gibbs féle fázisszabály ír le [[Csizmazia1](#)]:

- olyan anyagokra, ahol a nyomás és hőmérséklet is nagy hatással van az egyensúlyi viszonyokra, a fázisok (F) és állapotjelző szabadsági fokok száma (Sz) kettővel több, mint a komponensek (K) száma: $F + Sz = K + 2$, amire jó példa a víz-gőz alkotta összenyomható (kompresszibilis) rendszer,

- olyan anyagokra, ahol a nyomás nem, de a hőmérséklet nagy hatással van az egyensúlyi viszonyokra, a fázisok és állapotjelző szabadsági fokok száma egyel több, mint a komponensek száma: $F + Sz = K + 1$, például fémekre ez jellemző, amelyek gyakorlatilag összenyomhatatlan (inkompresszibilis) rendszert képeznek.

1.4. Az anyagok csoportosítása

Az anyagokat több szempont alapján lehet csoportosítani [Csizmazia1]:

- halmazállapotuk szerint,
- eredet szerint,
- felhasználás szerint.

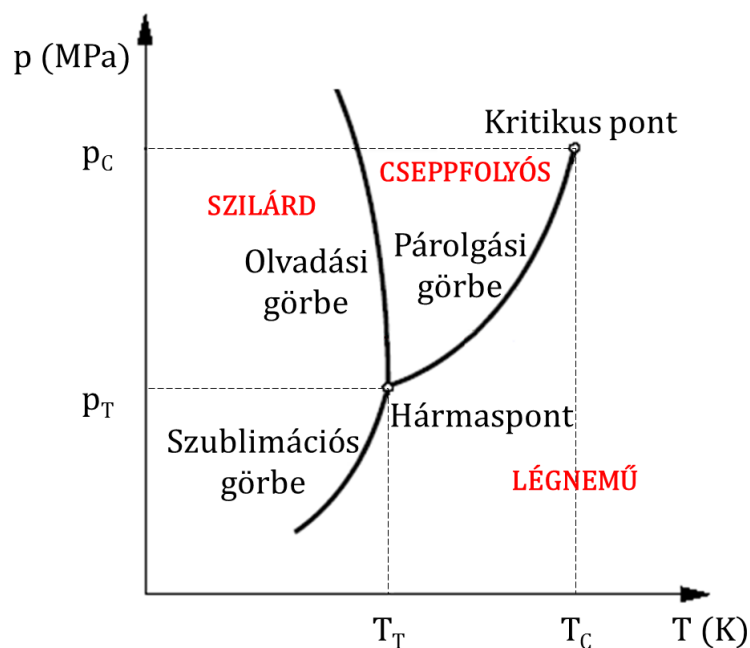
1.4.1. Az anyagok csoportosítása halmazállapotuk szerint

Az anyagok csoportosíthatóak halmazállapotuk szerint (lásd a 1.2 ábrán a fázisdiagramot) [Csizmazia1]:

- szilárd (szerkezeti anyagok),
- cseppfolyós,
- légnemű,
- (szuperkritikus fluidum),
- (plazma állapot).

Az abszolút nyomás-abszolút hőmérséklet tartományban (fázisdiagram) jól szemléltethetőek a hagyományos halmazállapotok, úgymint a szilárd, cseppfolyós és légnemű valamint a kritikus nyomás és hőmérséklet fölött (ez vízre extrém magas értékekkel jellemezhető: 220,64 bar és 374°C) létező úgynevezett szuperkritikus fluidum állapot tartománya. A másik speciális termodinamikai tartomány a plazma állapot, amely nem látható a 1.2 ábrán. E két utóbbi állapot már nem sorolható a klasszikus halmazállapotok közé, hanem speciális termodinamikai állapotoknak nevezzük őket [Bihari].

A fémek, mint az atomenergetikában leggyakrabban használt szerkezeti anyagok esetében, a szilárd és cseppfolyós halmazállapotok fontosak és a továbbiakban ezek kerülnek tárgyalásra.



1.2. ábra. Az anyagok csoportosítása halmazállapotuk szerint a termodinamikai abszolút nyomás - abszolút hőmérséklet fázisdiagram alapján [Bihari]

1.4.2. Az anyagok csoportosítása eredetük szerint

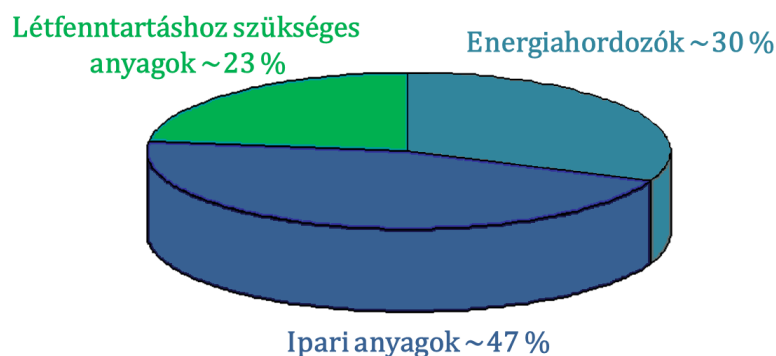
Az anyagok csoportosíthatóak eredetük szerint [Csizmazia1]:

- szervetlen (fémek, kerámiák),
- szerves: természetes eredetűek pl. gumi, fa, bőr stb., vagy mesterségesen előállított polimerek.

1.4.3. Az anyagok csoportosítása felhasználás szerint

Az anyagok csoportosíthatóak felhasználás szerint (lásd 1.3 ábrát) [Csizmazia1]:

- életfenntartáshoz szükséges anyagok: élelmiszerek, állati takarmány, trágya stb., melyek az összes felhasznált anyag kb. 23 %-át teszik ki,
- energiahordozók (pl. fosszilis tüzelőanyagok), melyek az összes anyagfelhasználás 30 %-át teszik ki,
- ipari anyagok (pl. szerkezeti anyagok, mint egy híd vagy daru acél szerkezete), amelyek a maradék 47 %-át teszik ki.



1.3. ábra. Az anyagok csoportosítása felhasználás szerint [Csizmazia1]

Az anyagok csoportosítását felhasználásuk szerint szemlélteti "Az anyagok csoportosítása" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Az_anyagok_csoportositasa_felhasznalasuk_szerint_D01.swf

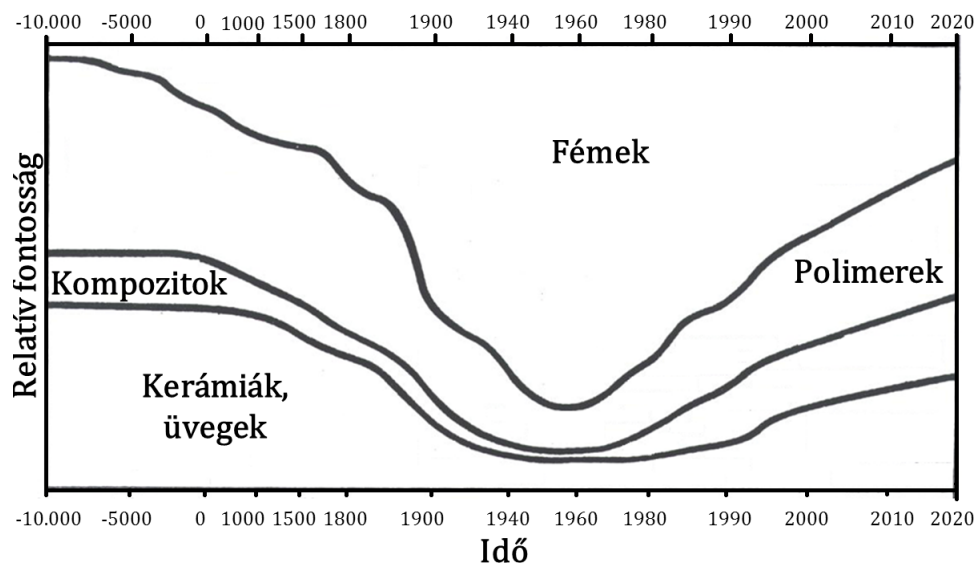
1.5. A szerkezeti anyagok relatív fontossága

A 1.4 ábra a szerkezeti anyagok relatív fontosságát szemlélteti. Ahogy látható az ősz- és ókorban a természetes eredetű anyagokból, úgymint kerámiák, természetes kompozitok és növényi- állati eredetű szerves anyagokból készültek az emberi eszközök kis mennyiségű fémfelhasználás mellett. A középkorban folyamatosan nőtt a fémek felhasználási aránya a többi anyagféle rovására. Ez a trend az újkorban és a modern korban folytatódott, egészen 1950-ig, amikor az új anyagok (mesterséges eredetű szerves anyagok és kompozitok, új típusú kerámiák, üvegek) elkezdtek visszaszorítani a fémek felhasználását [Csizmazia1].

1.6. A szerkezeti anyagok és tulajdonságaik

A szerkezeti anyagok a technológiailag hasznos tulajdonságú anyagok. Megfelelő előállítási eljárás és alak kialakítás után „konstrukciós és funkciós” anyagoknak nevezik őket, és az egész emberi technikai civilizáció anyagbázisát alkotják. A műszaki termékek előállításához a szerkezeti anyagokat a megkívánt műszaki funkciókhoz célzottan kell kiválasztani optimális módon figyelembe véve [Csizmazia1]:

- a szükséges anyag és energia felhasználást,
- az eszköztől megkívánt minőséget,



1.4. ábra. A szerkezeti anyagok relatív fontossága [Csizmazia1]

- az eszköztől megkívánt megbízhatóságot,
- a környezetvédelem szempontjait,
- gazdaságossági szempontokat,
- az eszköztől megkívánt élettartamot.

Az anyagok szempontjából, az emberiség tárgyasult evolúciója miatt a szerkezeti anyagok a legfontosabbak. Ennek oka az, hogy a szerkezeti anyagokból előállított gépekkel a létfenntartáshoz szükséges anyagok és az energiahordozók előállításának eszközigénye (mint szükséges de nem elégséges feltétel) biztosítható.

Az ipari anyagok csoportosítása a makroszkopikus szerkezeti szinten mutatott tulajdonságok alapján is elvégezhető [Csizmazia1]. Így beszélhetünk:

- fémekről (legjelentősebb az Fe, Al, Cu, Ti stb.),
- fémüvegekről (A fémüveg az olvadékból olyan gyorsan lehűtött fém, amelynek nem alakul ki a kristályszerkezete, hanem a gyors hűtés miatt a folyadékban uralkodó atomi rendezetlenség fagy bele az anyagba. Amorf fémnek, fémüvegnek vagy üveges fémnek is nevezik.),
- kerámiákról (pl. porcelán (villamos szigetelő)),

- polimerekről (különféle műanyagok, pl. polietilén),
- kompozitokról – vagy másképpen társított anyagokról (pl. farost + enyv = bútortalap, vagy szénszálerősítű műanyag).

Az anyagok makroszkopikus tulajdonságait döntően meghatározza a mikroszkopikus szerkezetük. Ezért fontos ismerni az anyagok szerkezetét és szerkezetük szerinti csoportosítását, ami a következő [Csizmazia1].

Az anyagok szerkezete lehet:

- szabálytalan, amorf,
- kristályos,
- részben kristályos.

1.6.1. A szerkezeti anyagok tulajdonságai

Ahogy az előző alfejezet végén olvasható, az anyagok makroszkopikus tulajdonságait a mikroszkopikus tulajdonságok (alkotó atomok kémiai minősége – elemi összetétel, atomok közötti kapcsolat stb.) határozzák meg. Ezért fontos ismernünk az anyagok mikroszkopikus tulajdonságait és azok vizsgálati módszereit. Az ipari gyakorlatban elterjedt anyagvizsgálati eljárások vizsgálhatják az anyag [Csizmazia1]:

- makroszkopikus tulajdonságait (folyáshatár, elektromos ellenállás, össztömeg stb.),
- vagy mikroszkopikus tulajdonságait (kémiai összetétel, szövetszerkezet stb.).

A szilárd testek atomjai közötti kapcsolat, a kötés, részecskék közötti kölcsönhatás eredménye [Csizmazia1].

A kölcsönhatások:

- mindkét atom magja vonzza a másik elektronjait,
- a két atom elektronjai taszítják egymást,
- az atommagok taszítják egymást.

1.6.2. Kémiai kötések

Kémiai kötésnek nevezzük a kémia területén azt az állapotot, amikor különböző anyagok atomjai reakcióba lépnek egymással, hogy stabilis (telített) külső elektronhéj alakuljon ki. Vegyi reakciók során, a vegyérték-elektronok révén elsőrendű kémiai kötés alakul ki. A tapasztalat szerint azonos elektronegativitású kémiai elemek között kovalens, erősen különböző elektronegativitású elemek között ionos kötés jön létre. A molekulák közötti úgynevezett intermolekuláris erők másodrendű kötések hozhatnak létre (pl. a H_2O esetében). [Csizmazia1]

A kémiai kötések fajtái a következők [Csizmazia1]:

1., Elsődleges vagy primer kötések:

- az ionos kötés, mely ellentétes töltésű ionokat tartalmazó anyagokban fordul elő. Az ionok közötti elektrosztatikus vonzás és taszítás szabályos szerkezetbe, ionrácsba rendezi az anyagot alkotó ionokat, melynek a rácspontjain szabályosan váltakozva kationok és anionok találhatók. A nagy kötési energia miatt az ionrácsos anyagok általában magas olvadáspontúak (például a nátrium-klorid olvadáspontja 801°C , a magnézium-oxidé 2800°C .),
- a kovalens kötés, amelyben az atomok közös vegyértékkel rendelkeznek (ko: közös, valens: vegyértékű). Kémiai jellegükben azonos vagy különböző elemek atomjai között jön létre, vegyérték elektronjaik közössé tételével. Például két hidrogén ha találkozik „egyesülnek” mindkettőnek két elektronja lesz, azaz osztoznak azon a kettőn. Tehát: $H + H = (H_2)$,
- a fémes kötés az egész kristályra kiterjedő közös elektronfelhő által létrehozott kémiai kapcsolat, mely fémek szerkezetében jelentkezik. A fémekben az elektronok delokalizáltan helyezkednek el, így az egyes pozitívan töltött fémionok (atómtörzsek) között oszlanak meg [Csizmazia1].

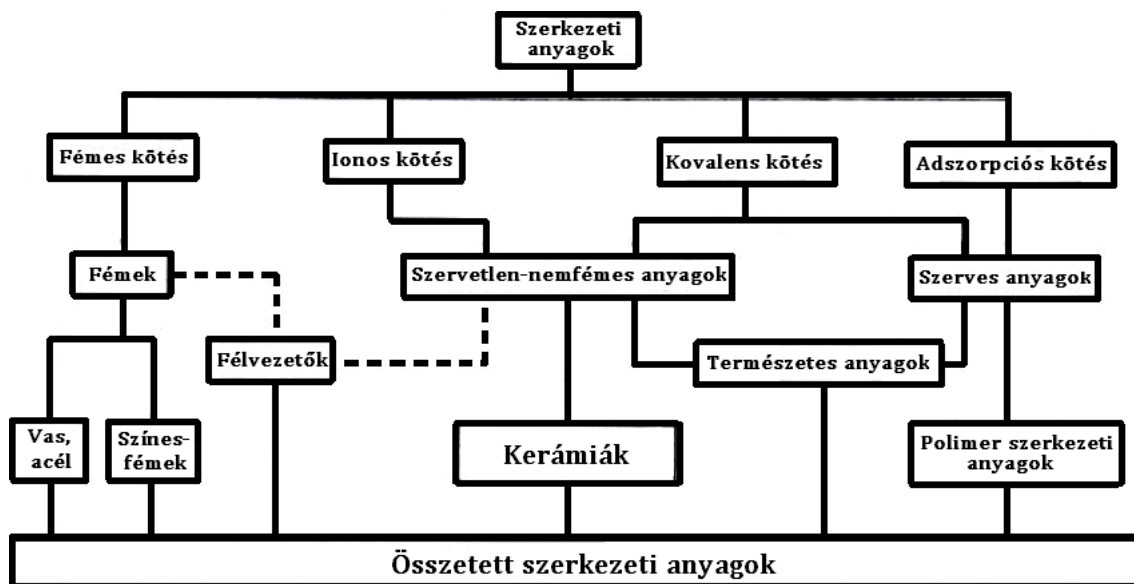
2., Másodlagos, gyenge kötések:

- a molekulaközi Van der Waals kötés (adszorpció): azokat a „molekulák közötti” kötések soroljuk ide, amelyek a molekulán belüli töltésszimmetriából következnek. A van der Waals-féle kötés lezárt elektronhéjú atomok vagy molekulák között alakul ki, energiája az elsőrendű kötések energiájának kb. huszadrésze. Ezért a molekularácsos szerkezetű anyagok (elemek és vegyületek) alacsony olvadás- és forráspontúak: közönséges körülmények között gáz halmazállapotúak vagy folyékonyak (pl. a H_2O), de ha molekulatömegük elég nagy, szilárdak is lehetnek. Kristályaik meglehetősen puhák,

- és a hidrogénkötés: a hidrogénkötés kialakulásához egy nagy elektronegativitású, kis méretű és nemkötő elektronpárral rendelkező elem atomja szükséges, amelyhez közvetlenül kapcsolódik egy hidrogénatom. Elsősorban három elem képes ilyen kötés kialakítására, a fluor, az oxigén és a nitrogén. Egy hidrogénatom és egy másik (a korábban említett tulajdonságokkal rendelkező) molekulában lévő nemkötő elektronpár alakítja ki a kötet [Csizmazia1].

A másodlagos kötések energiája nagyságrenddel kisebb, mint az elsődlegeseké. Ilyen kötések lehetnek például a kovalens kötésekkel összetartott molekulák között. Energia-közlés hatására a másodlagos kötések bomlanak fel először, a molekulák egészen maradnak. Az egynemű molekulák közti kötések határozzák meg például a halmazállapotot, keménységet stb. [Csizmazia1]

A kötésmód és a szerkezeti anyag fajtája közötti összefüggést a 1.5 ábra szemlélteti.



1.5. ábra. A kötésmód és a szerkezeti anyag fajtája közötti összefüggés [Csizmazia1]

1.7. A szerkezeti anyagok fajtáinak általános tulajdonságai

Ebben a részben a szerkezeti anyagok fajtáinak általános tulajdonságai kerülnek bemutatásra [Csizmazia1].

1.7.1. A fémek általános tulajdonságai

A fémek egymástól jelentősen eltérő tulajdonságaik, a földkéregben relatív gyakori előfordulásuk, ötvözhetőségük miatt sokrétűen felhasználható, könnyen elérhető szerkezeti anyagok [Csizmazia1].

A fémek általános tulajdonságai [Csizmazia1]:

- jó hő-, és elektromos vezetőképesség,
- fénnel nem átvilágíthatóak, ezért a felületi réteget kivéve nem lehetségesek optikai szövetszerkezeti vizsgálatok,
- fémes fényűek,
- kiváló terhelhetőséggel és szilárdsággal rendelkeznek a korábban használt (pl. fa) szerkezeti anyagokhoz képest,
- jól alakíthatóak.

1.7.2. A fémüvegek általános tulajdonságai

A fémüveget fémolvadékból igen gyors hűtéssel állítják elő. A gyors hűtés nem hagy időt arra, hogy az atomok „megtalálják egyensúlyi szerkezetüket”, azaz kikristályosodjon az anyag. A lehűtés tipikus sebessége: 100.000 K/s. Ezzel a hagyományos előállítási formával gyakori eljárás volt, hogy a fémolvadékot egy gyorsan forgó fémhengerre lőtték rá. Ezt az előállítási módot a 60-as évektől már alkalmazták a kutatók. Az olvadék szalag formában rádermedt a hengerre és így közvetlenül alakult át a gyakorlatban használható formájú fémüveg anyaggá [Csizmazia1].

Ma már a fémüvegek gyártását ötvözetekből végzik. Ilyenkor nem szükséges a korábbi igen gyors lehűtési sebességet elérni. Az eljárással néhány milliméter vastagságú fémlapot állítanak elő. Tömbös fémüvegnek is nevezik ezt. Néha 4-5 fémből alkotott ötvözetet is használnak erre a célra. Közöttük gyakoriak a titán (Ti) alapú fémüvegek. Ma már a lantán, magnézium, cirkónium, palládium, vas, réz és titán ötvözetekkel a 100 K/s-tól a 1 K/s-ig terjedő lehűtési sebességekkel is elő tudnak állítani fémüvegeket.

Számos előállítási módja mellett érdemes megemlíteni a porkohászatit és a fémgőzből való (Nem csak olvadékból állítható elő, hanem fémgőzből is!) előállítási módokat.

A fémüvegek általános tulajdonságai [Csizmazia1]:

- szerkezetük amorf,
- csak igen vékony szalagok formájában állíthatóak elő jelenleg,
- nem stabil szerkezetűek, hő hatására kristályosodnak,

- lényegesen keményebbek a fémeknél,
- kiváló villamos és hővezetők,
- a leggyakoribb felhasználásuk a kiváló mágneses tulajdonságukból adódik: a gyakorlatban jelenleg használt legjobb lágy mágneses anyagok (alkalmazási példa: a bolti lopásgátlók).

1.7.3. Szerves anyagok, polimerek általános tulajdonságai

A szerves anyagok, vegyületek azért kapták ezt a nevet, mivel az élet építőkövei. Az élő szervezetek pedig szénelapúak. A szerves anyagoknak így a szén vegyületeit nevezzük, amelyek többnyire a szén mellett ként, hidrogént, nitrogént, oxigént tartalmaznak még. A többi anyagot a szervetlen anyagok közzé soroljuk, pl. fémek, stb. A szén egyszerű szervetlen vegyületeit is a szervetlen anyagok közzé soroljuk, mint pl. a szén-dioxidot [Csizmazia1].

Szerves anyagok, polimerek általános tulajdonságai [Csizmazia1]:

- a szerves anyagok egymástól elkülöníthető molekulák, vagy vegyületek, az úgynevezett monomerek hosszú láncából állnak,
- a szerkezetük lehet szálal, elágazó vagy térben hálós,
- a szerves anyagok, mint például a gumi, a fa, a bőr stb. természetes eredetűek.

1.7.4. A kerámiák általános tulajdonságai

Minden anyagot kerámiának tekintünk, ami nem fém, fémüveg és nem szerves. Az emberi technikai civilizáció hajnalán elődeink sok kerámiából készült eszközt, főleg kőeszközöket használtak föl [Csizmazia1].

A kerámiák általános tulajdonságai [Csizmazia1]:

- szerkezetük rövid távon rendezett,
- rossz hő- és elektromos vezetők,
- nagy a villamos ellenállásuk, ami a hőmérsékletük növelésével csökken,
- nagy hőállósággal rendelkeznek,
- kemények, ridegek.

1.8. A fejezethez tartozó animációk

A fejezethez tartozó animációk a következők:

- Az anyagok körforgását szemlélteti "Az anyag körforgása" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Az_anyag_korforgasa_D01.swf

- Az anyagok csoportosítását felhasználásuk szerint szemlélteti "Az anyagok csoportosítása" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Az_anyagok_csoportositasa_felhasznalasuk_szerint_D01.swf

1.9. Ismétlő kérdések az 1. fejezet anyagához

1. Ismertesse az anyagvizsgálat általános elvét!
2. Mi az anyagvizsgálat szerepe, célja és jelenlegi trendje?
3. Adja meg az anyag fizikai és mérnöki definícióját!
4. Ismertesse az anyag körforgását!
5. Miről és mit mond ki a Gibbs féle fázisszabály?
6. Ismertesse egy rendszer állapotát befolyásoló tényezőket!
7. Mi alapján lehet csoportosítani az anyagokat? Ismertesse a csoportosítási lehetőségeket!
8. Hogy alakult a történelem során a szerkezeti anyagok relatív fontossága?
9. Milyen anyagtípusok sorolhatóak a szerkezeti anyagok közzé makroszkopikus szerkezeti szinten mutatott tulajdonságok alapján?
10. Ismertesse az anyagok szerkezetének fő fajtáit?
11. Ismertesse a kémiai kötések fajtáit!
12. Mik a fémek általános tulajdonságai?
13. Mik a fémüvegek és mik az általános tulajdonságaik?

14. Ismertesse a szerves anyagok, polimerek általános tulajdonságait!
15. Ismertesse a kerámiák általános tulajdonságait!

2. fejezet

Válogatott részletek az anyagszerkezettanból

A fejezetet összeállította: *Kiss Attila*

Az atomerőművek primer és szekunder körében általában a légkörinél jelentősen magasabb a közeg nyomása, a közeg hőmérséklete pedig általában a víz forráspontja (100°C) fölötti [Csom1], [Csom2], [Csom3]. Így a reaktortartálynak, a primer-, a szekunder kör csővezetékeinek és egyéb elemeinek jelentős belső nyomásterhelést kell elviselnie. Ebből következik, hogy az előbb említett atomerőművi rendszerelemek szerkezeti anyagai elsősorban a fémek csoportjába tartoznak, azon belül is döntő mértékben, a kiváló teherviselő képességgel és hőállósággal rendelkező acélok közzé. Ezeket a döntően acél rendszerelemeket sok fajta anyagvizsgálati módszerrel vizsgálják, ezért fontos az atomenergetikában alkalmazott anyagvizsgálati eljárások számbavétele előtt részleteiben megismerkedni a fémek anyagismeretével.

Az erős radioaktív sugárzással jellemezhető primer körű környezetben - ahol üzem közben emberi munkaerő nem alkalmazható - rengeteg elektronikus eszközt használnak a különféle távvezérléshez, mérőrendszerekhez, a szabályozó és biztonságvédelmi rudak hajtásánál, stb. Így kijelenthető, hogy a villamos vezetőanyagok (a legjobb az arany és ezüst, de ipari gyakorlatban leginkább az alumínium és réz az elterjedt) valamint a villamos szigetelőanyagok (úgy mint a különböző kerámiák és műanyagok), mint szerkezeti anyagok kiemelt fontosságúak az atomerőművi alkalmazás szempontjából [Csom2], [Csom3]. Ezen anyagok anyagszerkezetére, anyagismeretére jelen jegyzet keretében nem térünk ki, ehelyett ajánljuk a Tisztelt Olvasó figyelmébe az Atomerőművek (BMETE80 AE05 vagy BMETE80MF14) című tárgyunkat. E tárgy keretében egy 4 órás előadás külön csak a "Villamos berendezések kiépítésének speciális szempontjaival" és az "Atomerőművi villamos rendszerek, kábelek öregedésével" foglalkozik.

Ebben a fejezetben bemutatjuk a fémek metallográfiai vizsgálatát és annak jelentőségét, ismertetjük a fémtani alapokat, a színfémek és ötvözetek egyensúlyi lehűlési

folymatait és a vas-karbon ötvözetrendszerét.

2.1. A metallográfia és jelentősége

Gondolatmenetünket kezdjük egy gondolat kísérlettel. Két azonos anyagminőségű acél szeget fehér izzásig melegítünk, majd az egyiket vízbe dobva gyorsan lehűtjük, a másikat levegőn hagyjuk lehűlni. Szobahőmérsékletre való lehűlés után mindkét szeget megpróbáljuk meghajlítani egy satu és egy kombinált fogó segítségével. A hajlító terhelés hatására a gyorsan lehűtött szeg jelentősen meghajlik (jelentős képlékeny alakváltozást mutat, ami szívós-képlékeny viselkedés), a másik, levegőn lassan lehűlt szeg a hajlítás hatására rögtön eltörik (rideg anyagként viselkedik). Fontos megjegyezni, hogy a kísérlet során a két szeg összetétele nem változott, de a szegek terhelés hatására mutatott viselkedése igen! A viselkedésbeli különbség oka: az acél szegek eltérő lehűlési sebessége miatt kialakuló eltérő szövetszerkezetben keresendő [Csizmazia1], [Prohaszka], [Jarfas].

A gondolat kísérlet alapján kijelenthető, hogy a kristályos anyagok fizikai tulajdonságait a kristályszerkezet milyensége döntően befolyásolja. Erre példa az elemi szén két megjelenési formája, a grafit és a gyémánt. A grafit puha, törékeny és jól kenhető, míg a gyémánt igen kemény anyag. Az eltérő tulajdonságaik oka az eltérő kristályszerkezetük. Másik példánk a fémekkel kapcsolatos. A gépiparban előforduló szerkezeti anyagok közül legnagyobb jelentőségűek a fémek és azok ötvözeik. A fémek kristályos szerkezetű anyagok, amiről meggyőződhetünk, ha különböző fémek töret felületét megvizsgáljuk. Tulajdonságaikat csak úgy ismerhetjük, érthetjük meg teljes körűen, úgy tudjuk igényeinknek megfelelően alakítani tulajdonságaikat, ha megismerjük (rács)szerkezetüket. Ez teszi szükségessé számunkra a fémek és ötvözeik szerkezetének megismerését, mellyel egy külön tudomány, a fémszerkeztan vagy más néven a metallográfia foglalkozik [Prohaszka].

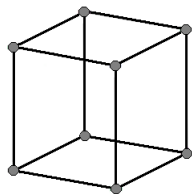
2.1.1. A fémek tipikus rácsszerkezetei és az átkristályosodás

Mint az előbbieken láttuk, a fémek tulajdonságait kristályrácsuk szerkezete nagymértékben befolyásolja. Ezért érdemes megismerni a fémek leggyakoribb rácsszerkezeteit, amit a 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 ábrák valamint az "Interaktív rácsszerkezetek" című interaktív animáció mutatnak:

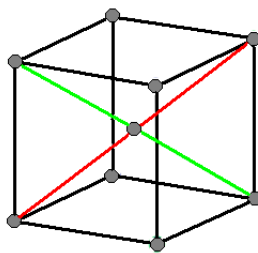
http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_racsszerkezetek_D01.swf

Amint azt a 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 ábrák is mutatják, a fémek általában szabályos, köbös illetve hexagonális (2.4) rácsba kristályosodnak [Jarfas].

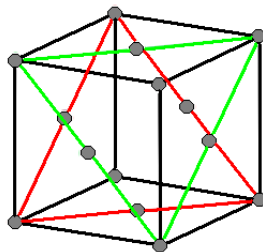
A köbös térrácsnak több változata van [Jarfas]:



2.1. ábra. Egyszerű köbös rács, jele: „EK” (pl. a Pd - palládium rácsszerkezete) [Csizmazia1], [Prohaszka]



2.2. ábra. Térközepes köbös rács, jele: „TKK” (pl. Cr; W; Mo; Fe; V rácsszerkezete) [Csizmazia1], [Prohaszka]

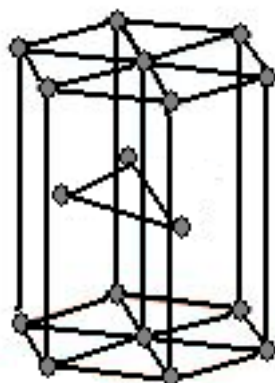


2.3. ábra. Lapközepes köbös rács, jele: „LKK” (pl.: Al; Ni; Cu; Ag; Fe rácsszerkezete) [Csizmazia1], [Prohaszka]

- egyszerű köbös rács, jele: „EK” (pl. a Pd - palládium rácsszerkezete) - lásd 2.1 ábra. A fémek kristályrácsát és az egyszerű köbös rácsot szemlélteti "A fémek rácsszerkezete" című animáció

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Femek_racsszerkezete_D01.swf

- térközepes köbös rács, jele: „TKK” (pl. Cr - króm; W - volfrám; Mo - molibdén;



2.4. ábra. Hexagonális rács, jele: „HG” (pl.: Mg; β -Ti stb. rácsszerkezete) [Csizmazia1], [Prohaszka]

az úgynevezett α -Fe - α -vas; V - vanádium rácsszerkezete) - lásd 2.2 ábra. A TKK rács esetében nemcsak a kocka csúsaiban van egy-egy fématom, hanem egy atom a kocka súlypontjában is elhelyezkedik (lásd 2.2 ábra). A fémek kristályrácsát és a térközepes köbös rácsot szemlélteti ”A fémek rácsszerkezete TKK” című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Femek_racsszerkezete_TKK_D01.swf

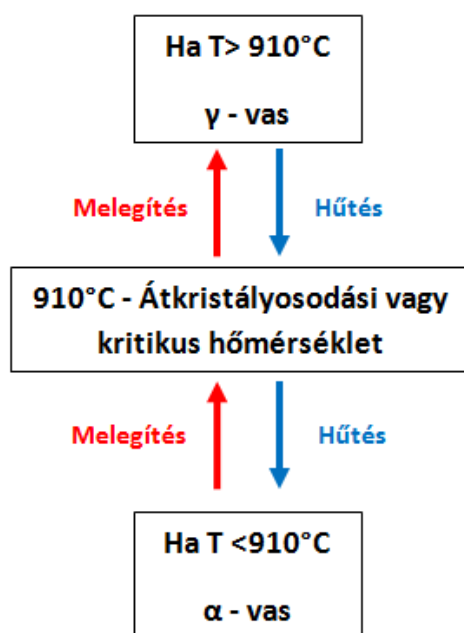
- lapközepes köbös rács, jele: „LKK” (Al - alumínium; Ni - nikkell; Cu - réz; Au - arany; γ -Fe - γ -vas rácsszerkezete)- lásd 2.3 ábra. Az LKK rácsszerkezetnél a csúcson kívül minden lap közepén is van egy-egy fématom, de a kocka súlypontjában nincs. A fémek kristályrácsát és a lapközepes köbös rácsot szemlélteti ”A fémek rácsszerkezete LKK” című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Femek_racsszerkezete_LKK_D01.swf

Ahogy az előbbiekben láttuk, a vas megtalálható mind a térközepes köbös, mind a lapközepes köbös rácsszerkezetű fémek között is, mint példa. Ennek magyarázata, hogy a vasnak a hőmérséklettől függően többféle (itt csak kettőt említünk) rácsszerkezete létezik. A térközepes köbös rácsszerkezetű vasat α - (alfa-) vasnak, a lapközepes köbös rácsszerkezetű vasat γ - (gamma-) vasnak hívjuk. A kétféle rácsszerkezetet más szóval kétféle kristálmódosulatlak (allotróp módosulatlak) hívjuk [Jarfas].

A színtiszta vas 1539°C-on szilárdul meg olvadákból. Ha a megszilárdult vasat egészen lassan hűtjük le, akkor 910°C-on a vasatomok átrendeződnek és a lapközepes köbös

rácsszerkezetű γ -vas átalakul térközepes köbös α -vassá. Ha megfordítjuk a folyamatot és a vasat szobahőmérsékletről egészen lassan melegítjük, az α -vas átkristályosodik, visszaalakul γ -vassá. Ez az ellentétes irányú, de ugyanúgy a rácsszerkezet átalakulásával járó folyamat szintén 910°C -on következik be (lásd 2.5 ábra). [Jarfas]



2.5. ábra. Példa átkristályosodásra: az α -vas - γ -vas átalakulás [Csizmazia1], [Prohaszka]

A kristályos anyagok rácsszerkezetének átrendeződési folyamatát átkristályosodásnak vagy idegen szóval allotróp átalakulásnak nevezzük. Egy anyag különböző kristályszerkezetű változatait allotróp módosulatoknak is szokás nevezni. A 2.5 ábra alapján belátható, hogy az átkristályosodás megfordítható folyamat, aminek hőmérsékletét a melegedés/hűtés sebessége is befolyásolja. A vas átkristályosodása egészen lassú melegedés, illetve hűtés esetén következik be 910°C -on. Ha a melegedés/hűtés gyors, az átkristályosodás melegítéskor 910°C -nál magasabb, hűtéskor 910°C -nál alacsonyabb hőmérsékleten jön létre. Az eltérés annál nagyobb az elméleti átkristályosodási hőmérséklethez képest minél nagyobb a hűtés, illetve a melegítés sebessége. Azt a hőmérsékletet, amelyen az átkristályosodás igen lassú hőmérséklet-változás mellett bekövetkezik, átkristályosodási vagy kritikus hőmérsékletnek nevezzük [Jarfas].

2.2. Fémtani alapfogalmak

Mielőtt tovább haladnánk a fémek olvadásával és dermedésével kapcsolatban, ebben az alfejezetben áttekintjük azokat az alapfogalmakat, amelyek a fejezet további részének megértéséhez nélkülözhetetlenek.

2.2.1. A színfém

A gyakorlatban nem létezik színfém (mindig van benne kevés idegen elem: szennyező anyagnak hívjuk, ha nem kívánt és ötvözőnek, ha kívánt az adott elem a fémünkben). Néhány kivételtől eltekintve nem alkalmaznak színfémeket a gyakorlatban (kivétel pl. különleges Al vagy Cu elektromos kábelek). A színfém előállítása drága. Általában mechanikai tulajdonságaik nem felelnek meg az elvárásoknak (pl. túl lágyak, törékenyek, ridegek stb.), ezért kevésbé időtállóak [Csizmazia1].

Az ismert elemek között kb. 70 a fémes elem, amelyek közül 30-at alkalmazunk az iparban. A színfémek nagy számuk és különböző tulajdonságaik ellenére sem elégítik ki az ipar követelményeit. A követelményeknek megfelelő tulajdonságú - kellően szilárd és kemény, korrózióálló, stb. - fémes anyagokat ötvözéssel állítják elő. Fémek ötvözetében fémek, félfémek (metalloidok, pl. C, Si stb.) és nemfémes elemek (pl. S, P, amik általános szennyező anyagok) fordulhat elő [Csizmazia1].

2.2.2. Ötvözet

Az ötvözet a fémek megszilárdult oldata. Olyan, legalább látszatra egynemű, fémes természetű elegyet értünk ötvözet alatt, amelyet két vagy több fém összeolvasztása, vagy egymásba való oldódása útján nyerünk. A gyakorlatban döntő többségben ötvözeteket használunk [Csizmazia1].

2.2.3. Ötvözetrendszer

Két vagy több fém vagy metalloid vagy vegyület alkotóból előállítható ötvözetek összességét ötvözet rendszernek nevezzük. Két, három vagy több alkotós ötvözetekről beszélhetünk [Csizmazia1].

2.2.4. Ötvöző

Ötvözetbe szándékosan bevitt ötvöző elemeket (pl. vasötvözet esetén hőállóság növelésére W - volfrám) és szándékolatlanul bevitt szennyező anyagokat különböztetünk meg (pl. vasötvözet esetén S - kén és P - foszfor). Ha az ötvözőanyag olyan kis mennyiségben

fordul elő, hogy a tulajdonságokra gyakorolt hatása elhanyagolható, akkor kísérő anyagnak nevezzük. Az ötvöző tehát az alapfémbe szándékosan bevitt, az ötvözet tulajdonságait a felhasználási cél szempontjából pozitív irányba befolyásoló anyag [Csizmazia1].

2.2.5. Mikroötvözők

Az olyan anyagot, amely az alapfémbe kis százalékaiban (jellemzően 1 százalék alatti arányban) kerül bevitelre és jelentősen befolyásolja az ötvözet tulajdonságait, mikroötvözőnek nevezzük. Két fajtája van a bejutás módja szerint [Csizmazia1]:

- szándékos, pl. olvadáspont növelésére az acélba bevitt W -volfrám,
- szándékolatlan, ami eleve az alapfémekben van.

2.2.6. Diszlokáció

A gyakorlatban használt fémek folyáshatára több nagyságrenddel kisebb, mint az elméletileg meghatározható érték. Ez azzal magyarázható, hogy a fémkristályokban rácshibák, úgynevezett diszlokációk találhatók. A diszlokáció rendszerint egy síkon az elcsúszott és az el nem csúszott tartományok határán helyezkedik el. A diszlokációk jelenléte egy fém kristályrácsában okozza azt, hogy a képlékeny alakváltozás az ideális rácshoz képest jóval alacsonyabb terhelés hatására megindul. Elméletileg, egy ideális rácshoz képest (diszlokáció mentes) fémekben a csúszás a teljes síkon egyszerre megy végbe. Ezzel ellentétben, a diszlokációkat is tartalmazó kristályokban egy adott síkban bekövetkező csúszás csak a diszlokáció körüli szűk tartományra korlátozódik [Prohaszka], [Csizmazia1].

2.2.7. Az ötvözetekben előforduló három fajta szilárd halmazállapotú fázis

Az ötvözetekben három fajta szilárd halmazállapotú fázis fordul elő [Csizmazia1]:

- színfém,
- szilárd oldat (fémötvözetek, pl. az Fe-C rendszerben szilárd oldat pl. a ferrit (α -vas) ami szobahőmérsékleten kb. 0,008% korbont képes oldani, vagy az ausztenit (γ -vas) ami 1140°C-on max. 2,1% korbont képes oldani),
- fémvegyület (a mindennapi életben használt fémötvözetekhez képest szokatlan tulajdonságú fázis, amit nem fémes kötés tart össze).

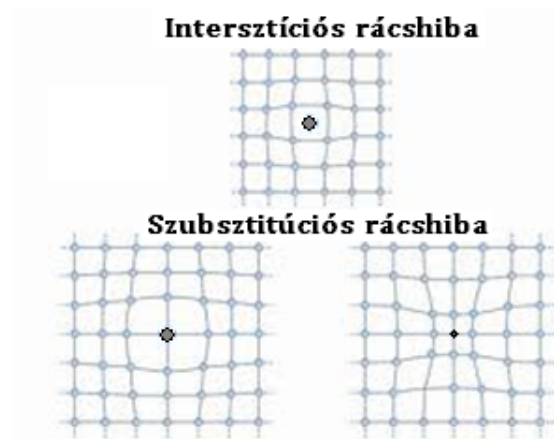
Színfém

A színfém kémiaiilag homogén, egy elemből álló fémdarab. Több komponensű rendszer esetén is előfordulhat, ha a komponensek nem oldják egymást. Ekkor a rácsszerkezetet nem együtt, hanem két külön fázisként alakítják ki [Csizmazia1].

Szilárd oldat

A szilárd oldatban a komponensek együtt alakítják ki a rácsszerkezetet (a vegyes-kristályt), vagyis csak fizikai kapcsolat alakul ki az alapfém és az ötvöző között. Az ötvözet rácsa megegyezik az alapfém (oldó fém) rácsával. Az ötvöző fém atomjai az oldó fém rácsában kétféleképpen helyezkedhetnek el (általában torzulást okozva) [Csizmazia1]:

- szubsztitúciós (helyettesítő) szilárd oldat – az ötvöző fém atomja az alapfém atomjának helyén van, lásd 2.6 ábra.
- interstíciós szilárd oldat – az ötvöző fém atomja az alapfém atomjai közé ékelődik, lásd 2.6 ábra.



2.6. ábra. A szubsztitúciós és interstíciós szilárd oldat és a bennük jelentkező rácestorzulások [Csizmazia1], [Prohaszka]

Korlátlan oldódás csak szigorú feltételek mellett jöhet létre. A feltételek korlátlanul oldódó szubsztitúciós szilárd oldat kialakításához a következők [Csizmazia1]:

- azonos rácsszerkezet alapfém és ötvöző között;
- atomátmérőben ± 15 százaléknál nem nagyobb eltérés;

- azonos vegyérték az alapfém és az ötvöző esetén;
- az alapfém és ötvöző elektrokémiai potenciálja nem nagy mértékben különbözik.

Ha az első három feltétel teljesül, akkor az utolsó is teljesül! Példa korlátlan oldódásra: Cu-Ni; Au-Ag, stb.

Korlátlan oldódás intersztíciósan is csak szigorú feltételek mellett jöhet létre. Feltételek intersztíciós szilárd oldat kialakításához [Csizmazia1]:

- azonos rácsszerkezet alapfém és ötvöző között;
- atomátmérőben +/- 15 százaléknál nagyobb eltérés.

Példa: Ni oldódása a γ -vasban; vagy a Cr oldódása az α -vasban, de a C a vasban is így oldódik, stb. [Csizmazia1]

Fontos megjegyezni, hogy az ötvöző atomok nem illenek bele tökéletesen az ötvöző fém rácsszerkezetébe méretük miatt (lásd 2.6 ábra). Az ötvözet maradó alakváltozásához annál nagyobb erőre van szükség, minél torzultabb a rács. Ezért a rácstorzulások nehezítik, de nem akadályozzák meg a csúszást (maradó alakváltozást). A maradó alakváltozás mikroszkópikus és makroszkópikus részleteit lásd a [Csizmazia1], [Csizmazia2] és [Prohaszka]. A maradó alakváltozás hatására a fém krisztallitjainak a felületén úgynevezett csúszási vonalak jelennek meg, amit később részleteiben ismertetünk. A gyakorlatban használt fémötvözetek szilárd oldatai képlékenyen jól alakíthatóak, szilárdabb anyagok, mint a színfém állapotú alapfém, amelyikből ötvöztetés útján keletkeznek.

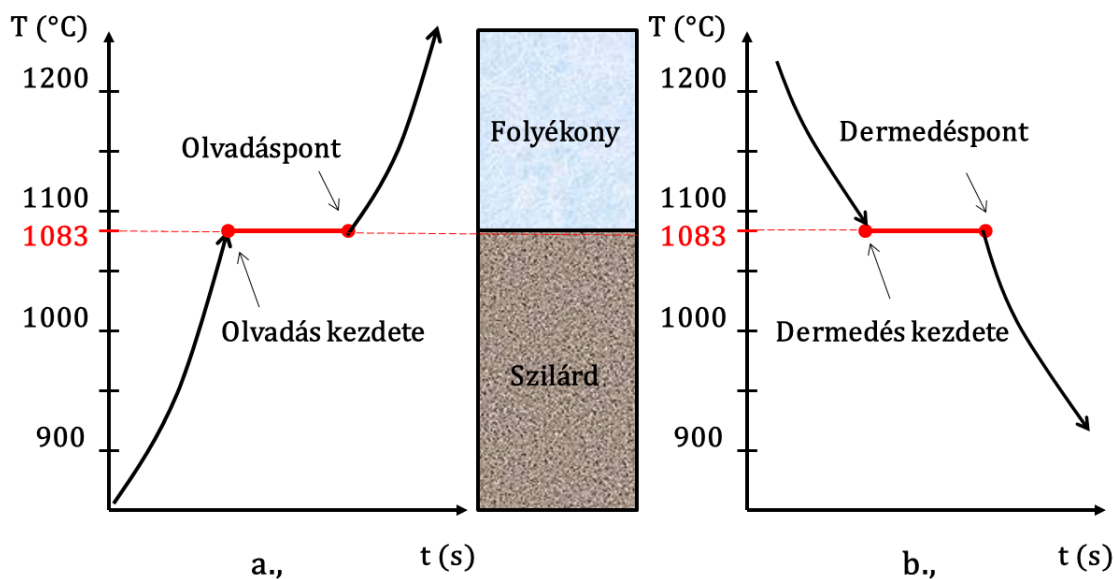
Fémvegyület

Ha az alapfém és az ötvöző rácsszerkezete nem egyezik meg, akkor fémvegyület jön létre az ötvöztetés során. Ilyenkor az alapfém és az ötvöző kémiai kapcsolatba lép egymással a közöttük meglévő nagy kémiai affinitás miatt. A fémvegyületekben az atomok között fémes kötés van, ezért a kémiai vegyületektől eltérő a tulajdonságuk: fémes fényűek, a villamos áramot és hőt jól vezetnek! A fémvegyület szerkezete úgy épül fel, hogy a fémvegyületek krisztallitjai színfémbe vagy szilárd oldatba ágyazódva fordulnak elő! Szerkezetük bonyolult ezért bennük csúszások nem jöhetnek létre, ezért általában képlékenyen nem alakíthatóak, ridegek, törékenyek, igen kemények! Példa fémvegyületekre: a Fe_3C – vaskarbid. Fontos megjegyezni, hogy tisztán fémvegyületből álló ötvöztet az iparban általában nem alkalmaznak [Csizmazia1].

2.3. A színfémek olvadási és dermedési görbéje és a kristályosodás folyamata

A fémtani alapfogalmak után nézzük meg, hogy olvadnak és dermednek a színfémek. Dermedéskor a cseppfolyós színfémből egy homogén kristályszerkezettel jellemezhető szilárd anyag alakul ki. A kristályszerkezet kialakulását kristályosodásnak nevezzük, amely folyamat az alábbiakban részletesen bemutatásra kerül.

Ha a szilárd halmazállapotú színfémeket melegítjük, hőmérsékletük növekedik, a kristályrácsukban elhelyezkedő atomok rezgőmozgása fokozódik. A nagyobb mértékű rezgőmozgás következtében megnő az anyag térfogata, csökken az atomokat összetartó erők hatása. A melegítés hatására bekövetkező hőmérséklet-növekedés nem folyamatos, mert közben megváltozik az anyag szerkezete és ez a változás energiát igényel. Ha például réztömböt melegítünk fel, és az egyenlő időközönként mért hőmérsékleti értékeket koordináta-rendszerben ábrázoljuk, a 2.7 ábrán látható grafikont kapjuk [Jarfas].



2.7. ábra. A színfémek (jelen esetben réz) felmelegítési (a) és lehűlési (b) görbéje [Csizmazia1], [Prohaszka]), [Jarfas]

Abban az esetben, ha egyszerű kristályos anyagokat, tegyük fel színfémeket olvasztunk meg, azt tapasztalhatjuk, hogy az állandó melegítés ellenére a hőmérséklet növekedése nem lesz folyamatos az olvasztási eljárás során. A hőmérséklet változását ábrázoló diagramban törések lesznek. Olvasztás esetében mindig elérkezünk egy olyan hőmérséklethez – színréz esetében ez a hőmérséklet 1083°C –, ahol a hőmérséklet egy bizonyos ideig

állandó. Ez az állandó hőmérsékletű állapot azért következik be, mert ekkor az anyag szerkezetében változás jön létre, az anyag megolvad. Az éppen olvadó anyag által elnyelt hő nem a hőmérsékletét növeli, hanem a kristályrácsának a felbomlását teszi lehetővé. Az elnyelt hő hatására az atomok kilépnek a kristályrácsból, és helyüket változtatva, rendszertelen hőmozgásba kezdenek. Ekkor megszűnik az atomok rendezett állapota (a kristályrács megszűnik), a szilárd halmazállapot és az anyag folyékony halmazállapotúvá válik. Az olvadás során a hőmérséklet (a melegítés ellenére) tovább csak akkor növekszik, ha az anyag már teljes mértékben megolvadt. Ennek megértéséhez idézzük fel a Gibbs-féle fázisszabály inkompresszibilis (olyan anyagok, ahol a nyomás nem, de a hőmérséklet nagy hatással van az egyensúlyi viszonyokra) közegekre vonatkozó összefüggését [Jarfas]:

$$F + Sz = K + 1 \quad (2.1)$$

Jelen esetben, a színfém dermedésekor csak egy komponensünk van ($K=1$), de két fázisunk ($F=2$), így adódik, hogy a szabadsági fokok száma nulla, ami azt jelenti, hogy a dermedés alatt a nyomás és hőmérséklet állandó a rendszerben [Jarfas]:

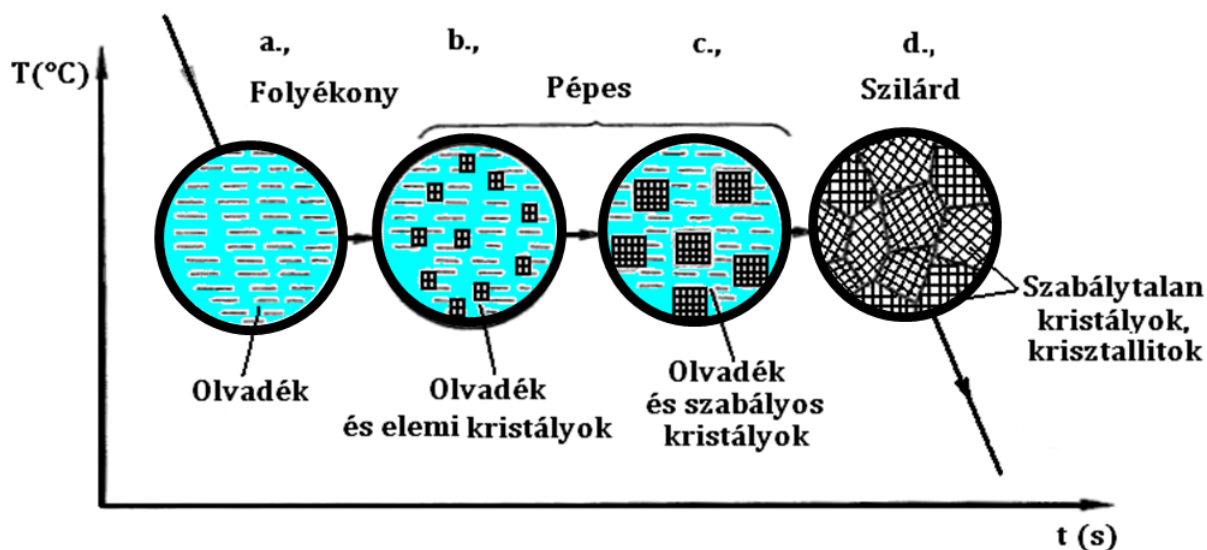
$$2 + Sz = 1 + 1 \quad (2.2)$$

$$Sz = 1 + 1 - 2 = 0 \quad (2.3)$$

Azt a diagramot, amely olvadáskor ábrázolja az anyag hőmérsékletének változását, felmelegítési görbének nevezzük [Jarfas]. Így a 2.7 (a) ábrát a réz felmelegítési görbéjének nevezzük. Ha a folyékony színfémet hűtjük, akkor hőmérséklete csökken, majd az anyag megdermed, szilárd halmazállapotúvá válik. Azt a diagramot, amely dermedéskor ábrázolja az anyag hőmérsékletének változását, lehülési görbének hívjuk. A 2.7 (b) ábrát a réz lehülési görbéjének nevezzük [Jarfas].

Mind a lehülési, mind a felmelegedési görbén egyaránt található egy olyan rész, ahol a színfém hőmérséklete a hőközlés ellenére sem változik. Ezt a diagram vízszintes tengellyel párhuzamos szakasza jelzi (az $Sz = 0$). A színréz esetében ez a rész 1083°C hőmérsékletnél található. Mind a két szóban forgó diagramon két töréspontot találunk tehát. Az egyik töréspont maga az olvadáspont, amelyet úgy jellemezhetünk, hogy az olvadásponton és az annál nagyobb hőmérsékleteken az anyag folyékony halmazállapotú. A diagramon található másik töréspont pedig a dermedéspont, amelyre azt mondhatjuk, hogy a dermedésponton és az annál alacsonyabb hőmérsékleteken az anyag szilárd halmazállapotú. Mint ahogy a 2.7 ábra szemlélteti, a színfémek olvadáspontjának és dermedéspontjának hőmérséklete gyakorlatilag azonos [Jarfas].

Hűtés során az olvadás- és dermedéspont között játszódik le a kristályosodás folyamata. A 2.8 ábra az olvadáspontig hűtött folyékony színfémekben bekövetkező folyamatot, a kristályosodás folyamatát ábrázolja [Jarfas].

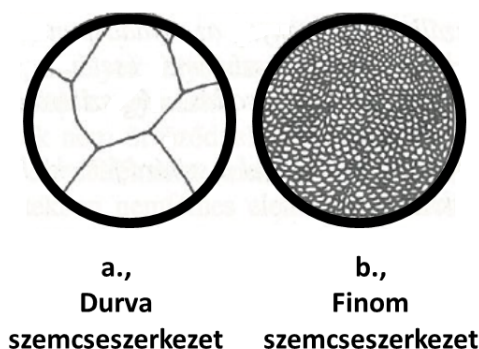


2.8. ábra. A fémek kristályosodásának folyamata [Csizmazia1], [Prohaszka], [Jarfas]

Az olvadáspontig lehűtött folyékony fémekben az atomok hőmozgása annyira lecsökken, hogy a hőmozgás energiája már nem képes legyőzni az atomok között meglévő vonzóerőket. Ezért az olvadáspontig hűlt folyékony fémekben az atomok elkezdnek összekapcsolódni és több helyen elemi térrácsok, elemi kristályok keletkeznek, ahogy azt a 2.8 b ábra szemlélteti. Az itt megjelenő elemi térrácsok a legegyszerűbb kristályok, szerkezetüket a 2.1, 2.2, 2.3 és 2.4 ábrák mutatják. Az elemi kristályok úgynevezett kristályosodási központokként funkcionálnak a kristályosodás során és belőlük indul ki a kristályosodás. A továbbiakban a folyamatos hőelvonás hatására az elemi kristályokhoz újabb atomok kapcsolódnak, s egyre nagyobb kristályok keletkeznek. Ezek a kristályok kezdetben a folyékony fémekben egymástól függetlenül, rácsszerkezetük által meghatározott alakban, szabályosan fejlődnek (lásd a 2.8 c ábrát) [Jarfas].

A kristályosodás folyamatának előrehaladásával a növekvő kristályok egymással érintkezésbe kerülnek és akadályozzák egymás szabályos növekedését. Ezért alakjuk szabálytalanná válik, mert csak abban az irányban fejlődhetnek, amerre a fém még folyékony állapotban van. Ezeket a kialakuló szabálytalan alakú kristályokat krisztallitoknak nevezzük (2.8 d ábra). A szilárd halmazállapotú színesfémek szabálytalan alakú kristályokból, krisztallitokból épülnek tehát fel. A 2.8 ábrán látható egyik töréspont az olvadáspont (2.8 a ábra), ahol a fém még folyékony állapotban van. A másik töréspont a dermedéspont (2.8 d ábra), ahol a fém már szilárd állapotú. Az olvadás- és a dermedéspont között a folyékony fémekben szilárd, növekvő kristályok találhatóak (2.8 b és 2.8 c ábra). Ezt az állapotot pépes állapotnak nevezzük. A krisztallitok a fém felületének megfelelő előké-

szítése (csiszolás, polírozás, maratás) után, fémmikroszkóp segítségével, már 100-szoros nagyítás mellett láthatók, róluk felvétel készíthető. A 2.9 ábrán két színfém mikroszkópi képét látjuk. A képeken megfigyelhető, hogy a krisztallitok szövetszerűen nőnek egymáshoz. Ezért nevezik a fémek krisztallitos szerkezetét gyakran szövetszerkezetnek, vagy más szóval szemcseszerkezetnek [Jarfas].



2.9. ábra. A durva (a) és finom (b) szemcseszerkezetű színfém mikroszkópi képe [Csizmazia1], [Prohaszka]), [Jarfas]

A kristályosodás során megszilárduló fémekben különböző nagyságú krisztallitok alakulnak ki. Ha a folyékony fém lassan hűl (relatíve lassú a hűlés sebessége), akkor benne kevés az elemi kristály, így kevés kristályosodási központ keletkezik. Ilyenkor viszonylag kevés helyen indul meg a kristályosodás, ezért a kevés elemi kristályból növekvő krisztallitok nagyra nőnek, s durva szemcseszerkezet alakul ki. Gyors lehűlés (relatíve nagy hűlési sebesség) esetén fordított a helyzet, sok elemi kristály jelenik meg a dermedő fémekben és így sok apróbb krisztallit alakul ki finom szemcseszerkezetet eredményezve [Jarfas].

A durva szemcseszerkezet általában hátrányos, mert a durva, nagy krisztallitú fémek ridegek és könnyen törnek. A fém szövetszerkezetének finomságára a töret felületéből is következtethetünk. A finomabb szerkezetű fém töret felületén látható szemcsék kisebbek, míg durva szerkezetű fém töret felületén látható szemcsék nagyobbak (a mikroszkópi képük összevetése alapján). Az öntés után a fém általában lassan hűl, az öntvény szemcseszerkezete így durva lesz. A durva szerkezetű öntvényeknél általában olyan eljárásokat alkalmaznak, amely szerkezetüket finomabbá teszi. Ezeket az eljárásokat összefoglalóan hőkezeléseknek hívjuk, amellyel a későbbiek során nem foglalkozunk bővebben. Az acélok szemcseszerkezetét szokás osztályozni és a krisztallitok nagysága szerint több (korábban például nyolc) fokozatba sorolják őket. A 2.9 (a) ábra a legdurvább, a 2.9 (b) ábra a legfinomabb fokozatot mutatja, körülbelül százszoros nagyítással [Jarfas].

A metallográfiai vizsgálatokkal a fémek és ötvözeik krisztallitos szövetszerkezetét,

szemcseszerkezetét vizsgáljuk. Ezeknek a vizsgálatoknak két nagy csoportját szokás megkülönböztetni: a mikroszkópos és a makroszkópos vizsgálatokat [Jarfas].

- A mikroszkópos vizsgálatok: A fémekben levő krisztallitok szabad szemmel nem láthatók, ezért a mikroszkópos vizsgálatok alkalmával a fémek megfelelően előkészített felületét 50-2000-szeres nagyítású fémmikroszkóppal vizsgálják. A vizsgálat-hoz 1-2 négyzetcentiméter felületű próbatestet vesznek ki a vizsgálandó anyagból. A próbatest felületét a vizsgálatnak megfelelően megmunkálják. Gyakran először köszörülik, majd egyre finomabb csiszolópapírral csiszolják és végül tükörfényesre polírozzák. A polírozott felületet megfelelő összetételű savas vagy lúgos oldattal maratják. A maratószer a különböző kémiai összetételű krisztallitokat, szövetelemeket különböző mértékben oldja fel. A kevésbé ellenálló szövetelemek mélyebben maródnak be és ez látható a mikroszkópos vizsgálat során is. Az így előkészített próbatestet a fémmikroszkópba helyezik és oldalról megvilágítják. A megvilágított felületről a fény visszaverődik, és ahol kisebb mértékben maródó kiálló részek vannak, árnyék keletkezik, a kép sötétebb. A mikroszkóp ezt a képet nagyítja fel, ami le is fényképezhető. A mikroszkópos vizsgálat határozzák meg, hogy a fém-ben milyen szövetelemek találhatók. Ezzel lehet megállapítani a szövetszerkezet milyenségét, vagy mérni például a szövetelemek mennyiségét, a szemcsenagyságot, stb. A töret felületéből megállapíthatók olyan tulajdonságai, mint az anyag szívóssága, a szemcseszerkezet finomsága is. A rideg anyag törete szemcsés, a szívós anyag viszont szálás töretű. A durva szemcseszerkezetű fém törete csillogó [Jarfas].
- A makroszkópos vizsgálatok: A makroszkópos vizsgálat alkalmával a fém úgynevezett töretének felületét szabad szemmel, esetleg kézi nagyítólencsével (maximum 7-szeres nagyítású) vizsgálják. A töreten azonosíthatók a szemmel látható méretű anyaghibák (salakszemcsék, zárványok). Fontos megemlíteni, hogy a makroszkópos vizsgálat becsülhető a munkadarabok felületén lévő, a munkadarab anyagától összetételében vagy szövetszerkezetében eltérő felületi réteg vastagsága [Jarfas].

A metallográfiai vizsgálatokat felhasználják annak megállapítására, hogy az anyag megfelel-e a szabványok előírásainak (pl. szemcseméret, zárványosság stb.). Gyakran alkalmazzák anyaghibák feltárására is [Jarfas].

2.4. Az ötvözetek

A periódusos rendszer 2006. október 16-án 117 elemet tartalmazott (a 118-as elemet előállították, de a 117-eset még nem). Az ismert 118 elem között kb. 70 a fémes elem, amelyek közül kb. 30-at alkalmazunk az iparban, mint szerkezeti anyag komponens (alapfémként vagy ötvöző elemként). Mint korábban említettük már, a színfémek nagy számuk és különböző tulajdonságaik ellenére sem elégítik ki az ipari szerkezeti anyagokkal szemben elvárt követelményeket. Ezért a követelményeknek megfelelő tulajdonsággal

rendelkező (pl. kellően nagy szilárdságú és kemény, vagy korrózióálló, stb.) fémes anyagokat ötvözéssel állítják elő. A technikai fejlődés egyik feltétele, hogy az egyre magasabb követelményeknek egyre jobban megfelelő fémes anyagok álljanak az ipar rendelkezésére. A kohászok, mint az anyagtudomány gyakorlati művelői, ennek érdekében szinte naponta hoznak létre újabb és újabb ötvözeteket. Sok olyan, a mai életben bevett technika, például a gépjárműtechnika, vagy a gázturbinás repülőtechnika sem fejlődhetett volna ki a különböző tudományok, így többek között a kohászat által az elmúlt kétszáz évben elért eredmények nélkül [Jarfas].

Összefoglalva tehát az ötvözés célja az, hogy az ipar egyre fokozódó követelményeinek megfelelő tulajdonságokkal rendelkező ötvözetet állítson elő [Jarfas].

2.4.1. Az ötvözet létrejötte

Az ötvözetek létrejöttét az ón és az ólom példáján mutatjuk be. Az ón és az ólom folyékony állapotban oldatot képeznek, sűrűség szerint pedig nem különülnek el. Az oldat megszilárdulásakor keletkező anyag ón – ólom ötvözet [Jarfas].

Vannak fémek, amelyek folyékony állapotban nem oldják egymást, sűrűség szerint elkülönülnek egymástól. Nem fémes példával élve, mint a víz és az olaj. Ilyen két fém pl. a Fe és a Pb, ezek nem ötvöződnek egymással [Jarfas].

Fémek ötvözésére más fémek mellett félfémeket (metalloidokat) is használnak, ilyenek pl. a C - szén (a vas-szén ötvözetek esetén karbonnak hívjuk), Si - szilícium stb. Az ötvözetekben nemfémes elemek is előfordulnak, mint pl. a S - kén. A metalloidok és a nemfémes elemek általában oldódnak a folyékony fémekben, azonban az így keletkező összetett szilárd anyagot csak akkor nevezzük ötvözetnek, ha az fémes tulajdonságú [Jarfas].

A fémek szilárd állapotban is ötvözhetőek. Ha a fémet az ötvözőanyagba ágyazva izzítjuk, az ötvözőanyag atomjai a fémbe diffundálnak és anélkül, hogy a fém megolvadna, ötvöződik. A szilárd anyagokban – az atomok közti nagy összetartó erő következtében – a diffúzió sebessége kicsi. Az ötvözendő fémet ezért kell az ötvözőanyagba ágyazva hosszú ideig izzítani. Így is csak a felületi rétegek ötvöződnek [Jarfas].

Az ötvözetekben előforduló anyagokat az ötvözet tulajdonságaira gyakorolt hatásuk szerint csoportosítjuk, megkülönböztetünk [Jarfas]:

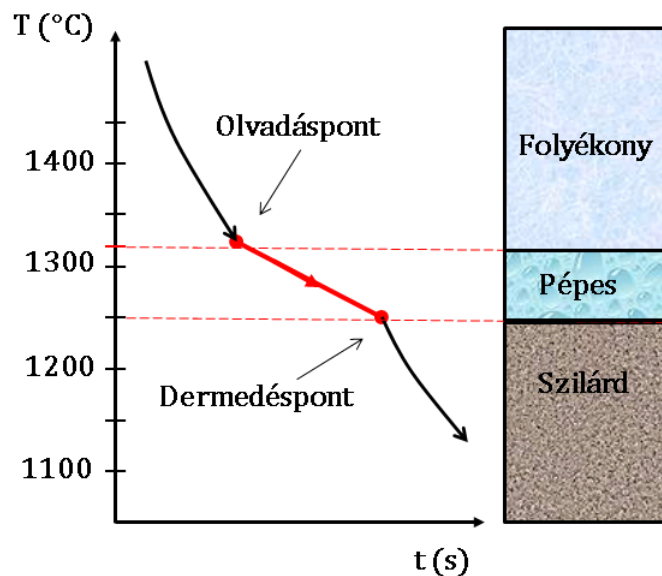
- ötvöző anyag: Az ötvözőanyagok előnyösen, céljainknak megfelelően befolyásolják az alapfém tulajdonságát. Alkalmazásukkal egymástól eltérő tulajdonságú ötvözeteket állítanak elő.
- kísérő anyag: Ha egy ötvözőanyag olyan kis mennyiségben fordul elő, hogy a tulajdonságokra gyakorolt hatása elhanyagolható, akkor kísérő anyagnak nevezzük.

- és szennyező anyagokat: A szennyező anyagok károsan befolyásolják az ötvözetek tulajdonságait, pl. az ötvözetet rideggé, törékennyé teszik. Az ötvözetek előállításakor mennyiségük csökkentésére törekszenek [Jarfas].

2.4.2. Az ötvözet olvadása és dermedése

Az ötvözetekben olvadáskor és dermedéskor bonyolultabb folyamatok játszódnak le, mint a fejezet elején ismertetett színfémekben. Az ötvözetek olvadási és dermedési görbéi eltérnek a színfémek olvadási és dermedési görbéitől az olvadási és dermedési hőmérsékleteket tekintve, mert több komponensű lesz a rendszer, így a szabadsági fokok száma egy (a Gibbs-féle fázisszabályt használva az $Sz=1$) a dermedés során is, így a hőmérséklet változik a folyamat során [Jarfas].

A 2.10 ábrán 50 % Ni - nikkeltartalmú Cu-Ni (réz-nikkel) ötvözet lehűlési görbéjét láthatjuk. A folyékony ötvözetek megszilárdulása a színfémektől eltérően nem egy hőmérsékleten, hanem két hőmérsékleti érték között következik be (lásd 2.10 ábra). A megszilárdulás egy nagyobb hőmérsékleten, az olvadásponton kezdődik és egy kisebb hőmérsékleten, a dermedésponton fejeződik be. A közbenső hőmérsékleteken az ötvözet pépes állapotban van, ahogy ez a 2.10. ábra jobb oldalán látható [Jarfas].



2.10. ábra. Az ötvözet lehűlési görbéje [Csizmazia1], [Prohaszka], [Jarfas]

Mint a 2.10 ábrán látható, az ötvözetek olvadáspontjának hőmérséklete nem egyezik meg a dermedéspont hőmérsékletével. Olvadásuk és megszilárdulásuk nem egyező hőmérsékleten, hanem két hőmérsékleti érték között következik be. Van egy eset, amely

ettől az általános esettől eltér, amikor az ötvözet megszilárdulása úgy játszódik le, mint a színfémeké. Ezzel az esettel, az eutektikum esetével még fogunk foglalkozni [Jarfas].

2.4.3. Az ötvözők állapota az ötvözetben

Fontos kérdés, hogy az ötvözőanyagok milyen állapotban vannak jelen az ötvözetekben. Az ötvözőanyagok a folyékony ötvözetekben oldott állapotban vannak jelen és sűrűség szerint nem különülnek el egymástól. A dermedés után, az ötvözet megszilárdulásakor az ötvözött fém (alapfém) és az ötvözőanyag között olyan kapcsolat alakul ki, amely nagymértékben befolyásolja az ötvözet tulajdonságait. A kialakuló közvetlen kapcsolat lehet fizikai vagy kémiai kapcsolat [Jarfas].

Fizikai kapcsolat esetében, az ötvözőanyagok atomjai az ötvözött fém kristályrácsába épülnek be. Az így kialakult kristályszerkezetet vegyeskristálynak nevezzük [Jarfas].

A másik esetben az ötvözött fém és az ötvözőanyagok atomjai kémiai kapcsolatba lépnek és úgynevezett fémes vegyületek keletkeznek. Ilyen fémes vegyület például a vas-karbid (Fe_3C), amiről a vas-karbon ötvözetrendszerrel még részletesen szólnunk [Jarfas].

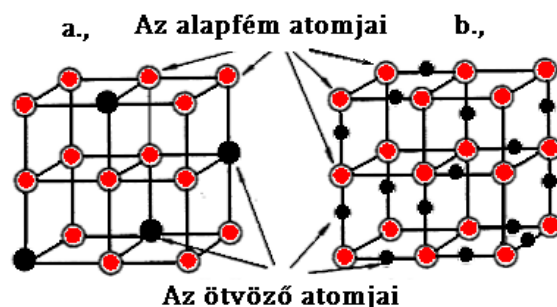
Ritkán fordul elő az, hogy megszilárdulásakor az ötvözőanyag nem lép közvetlen kapcsolatba (sem fizikai sem kémiai) az ötvözött fémmel, hanem színállapotban, külön kikristályosodik. Ez fordul elő például a öntöttvas esetében. Ilyenkor a vas (alapfém) ötvözője a karbon (szén), s megszilárdulásakor a karbon színállapotban (mint grafit lemez) külön kristályosodik [Jarfas].

A szilárd oldatok (vegyeskristályok)

Nézzük meg először a vegyeskristályok jellemzőit. A 2.11 ábrán két köbös rács rajzát láthatjuk. Rögtön feltűnnek a bennük elhelyezkedő, az alapfémétől eltérő idegen (ötvöző-) atomok, amelyeket feketével kitöltött körökkel jelöltünk [Jarfas].

Az ötvözőatomok kétféleképpen épülhetnek be az ötvözött fém kristályrácsába [Jarfas]:

- Az egyik esetben az ötvözőatomok a rácspontokban, az ötvözött fém atomjainak helyén helyezkednek el, helyettesítik az ötvözött fém atomjait a kristályrácsban (lásd a 2.11 (a) ábrát). Ez akkor jön létre, ha a két anyag atomjainak mérete között nincs nagy különbség, és a két fém rácsszerkezete azonos (a feltételeket részleteiben lásd a Fémtani alapfogalmak alfejezet vonatkozó részét). Az így kialakuló kristályt helyettesítéses (szubsztitúciós) vegyeskristálynak nevezzük [Jarfas].
- A másik esetben az ötvözőatomok az ötvözött fém kristályrácsába ékelődnek (lásd a 2.11 (b) ábrát). Ez az eset akkor következik be, ha az ötvözőatomok sokkal kisebb méretűek az ötvözött fém atomjainál (a feltételeket részleteiben lásd a Fémtani alapfogalmak alfejezet vonatkozó részét!). Az így kialakuló kristályt beékelődéses (interszticiós) szilárd oldatnak (vegyeskristálynak) nevezzük [Jarfas].



2.11. ábra. Rácsszerkezetek szilárd oldatokban (vegyeskristályokban): (a) szubsztitúciós, (b) interstíciós szilárd oldat [Csizmazia1], [Prohaszka], [Jarfas]

A vegyeskristályokban az alkotórészek között csak fizikai kapcsolat van, éppen ezért a vegyeskristályokat szilárd oldatoknak is nevezzük [Jarfas].

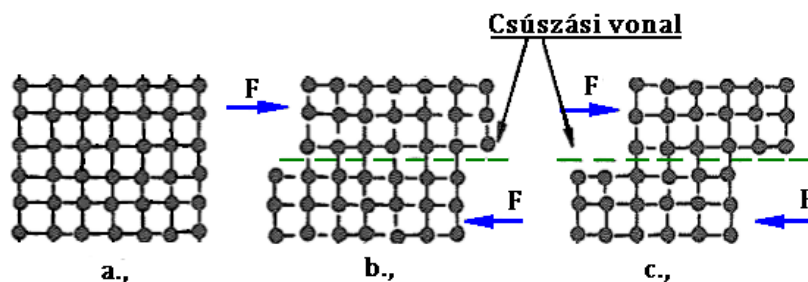
Vannak fémek, amelyeket bármilyen arányban olvasztunk össze, megszilárduláskor mindig tisztán vegyeskristály – tehát csak szilárd oldat – keletkezik. Ezek a fémek szilárd állapotban is korlátlanul oldódnak egymásban [Jarfas].

A legtöbb ötvözőanyag csak egy meghatározott mennyiségig alkot az ötvözött fémrel szilárd oldatot. Ezek az anyagok szilárd állapotban csak korlátozottan, csak egy meghatározott mennyiségig oldódnak, mint például a cukor a vízben. Az oldott ötvöző mennyisége a hőmérséklettől is függ, nagyobb hőmérsékleten több ötvöző is oldódhat. Korlátozott oldódás esetén, ha a telített szilárd oldatot hűtjük, az oldott ötvözőanyag egy része éppen úgy kiválik a szilárd oldatból, mint ahogy lehűlés alkalmával a telített cukor oldatból kiválik a cukor [Jarfas].

A 2.12 (a) ábra egy színfém rácsszerkezetét, míg a 2.12 (b) és (c) ábrák a színfém rácsszerkezetében bekövetkező maradó alakváltozás egyszerűsített lefolyását szemléltetik. Az ábrákon megfigyelhető, hogy maradó alakváltozáskor – az alakító erő hatására – a kristályrács egy adott síkjában lévő diszlokációk elmozdulnak (nem egyszerre az összes kötés vándorol, hanem a valóságban csak egy-egy diszlokáció mozdul el) és más rácspontba kerülnek. Ezt a jelenséget csúszásnak nevezzük [Jarfas].

A csúszási vonalak a fémek mikroszkópos képén is megfigyelhetők (lásd 2.13 ábra). A fémek nyújtását, hajlítását stb. általában a képlékeny alakítását a diszlokációk vándorlásának jelensége teszi lehetővé. Minél kisebb erő szükséges a csúszások létrehozásához, a fém annál képlékenyebb, és általában kisebb az anyag keménysége és szilárdsága [Jarfas].

Ahogy a 2.14 ábrán is látható, az ötvöző atomok nem illenek be tökéletesen az ötvözött fém rácsszerkezetébe, mert méretük eltér az ötvözött fém atomjának méretétől. A szilárd oldatok rácsszerkezetében az ötvözőatomok hatására torzulások lépnek fel, ahogy a 2.14 ábrán is megfigyelhető. Torzult rács esetén az atomok nehezebben, nagyobb erő



2.12. ábra. Színfém rácsszerkezete (a), a rácselmozdulás vagy csúszás egyszerűsített (az összes kötés nem egyszerre halad!) folyamata képlékeny alakváltozáskor (b és c) [Csizmazia1], [Prohaszka], [Jarfas]



2.13. ábra. A csúszási vonalak mikroszkópos képe a krisztallitokban [Csizmazia1], [Prohaszka], [Jarfas]

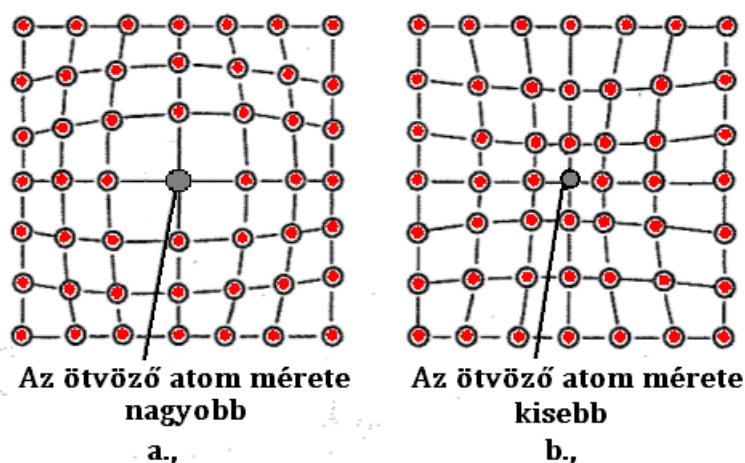
hatására mozdulnak el. Fontos tehát levonni azt a következtetést, hogy szilárd oldatoknál a maradó alakváltozáshoz annál nagyobb erőre van szükség, minél torzultabb a rácsszerkezetük [Jarfas].

Ugyanakkor a rácstorzulások nehezítik, de nem akadályozzák meg a csúszások bekövetkezését, a maradó alakváltozást. A gyakorlatban használt fémek szilárd oldatai képlékenyen jól alakíthatók, szilárdabb anyagok, mint az a színfém (alapfém vagy ötvözetek), amelyekből keletkeznek [Jarfas].

A fémvegyület

Ahogy korábban már megállapítottuk, ha például az ötvözött fém és az ötvözőanyag között elég nagy a kémiai affinitás, az ötvözet megszilárdulásakor fémes vegyület keletkezik. Fontos megjegyezni, hogy a fémes vegyületekben az alkotó atomok között fémes kötés van, ezért azok a kémiai vegyületektől eltérő tulajdonságúak: jellegzetes fémes fényűek, a villamos áramot és a hőt pedig jól vezetik [Jarfas].

A fémes vegyületek a szilárd oldatoktól eltérő, bonyolult rácsszerkezetet alakítanak ki,



2.14. ábra. Jellemző ráctorzulások szilárd oldatok kristályrácsába: a, esetben az ötvöző atom mérete nagyobb, mint az alapfémé. b, esetben az ötvöző atom mérete kisebb, mint az alapfémé [Csizmazia1], [Prohaszka], [Jarfas]

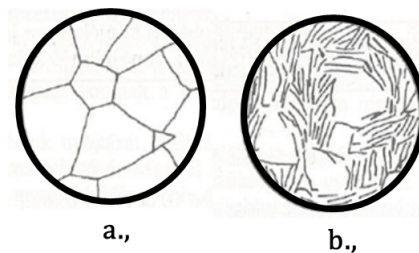
ezért bennük csúszások nem jöhetnek létre. Így a fémes vegyületek általában képlékenyen nem alakíthatók, ridegek, s igen kemény anyagok [Jarfas].

Például, az ipar számára jelenleg legfontosabb ötvözetekben, a vasötvözetekben előforduló fémes vegyületek közül leggyakoribb a vas-karbid (Fe_3C). Az elektronikában gyakran használt alumínium-réz ötvözetekben előforduló fémes vegyületre példa a $CuAl_2$, vagy rézaluminid, ami nagy villamos ellenállása miatt került anyag az elektronikában [Jarfas].

A gyakorlati alkalmazás szempontjából megemlítendő, hogy a fémes vegyületek tulajdonságai a megmunkálhatóság és az igénybevételek szempontjából igen kedvezőtlenek. Például: ridegek, könnyen (kis terhelés hatására) törnek, a nagy keménység következtében általában nem vagy igen nehezen forgácsolhatóak, képlékenyen nem alakíthatók (igen nehéz megfelelő alakadási technológiát találni hozzájuk). Ezért, tisztán fémes vegyületből álló ötvözeteket az iparban általában nem használnak [Jarfas].

Szerkezetükkel kapcsolatban megjegyzendő, hogy az iparban használatos ötvözetekben a fémes vegyületek krisztallitjai színfémbe vagy szilárd oldatba ágyazódva fordulnak elő. Ezt figyelhetjük meg a 2.15 (b) ábrán látható mikroszkópiai képen, amelyen a szilárd oldat fehér színű és a beleágyazódó fémes vegyület krisztallitjai fekete színűek [Jarfas].

A fentiek alapján világos, hogy a színfém vagy a szilárd oldat szerkezetébe ágyazódó fémes vegyület-krisztallitok nagymértékben akadályozzák a terhelés hatására bekövetkező csúszásokat (a képlékeny alakváltozást). Minél több fémes vegyület-krisztallit van az ötvözetben, annál nagyobb terhelés szükséges az anyag alakjának változtatásához és



2.15. ábra. Különböző szerkezetű vas ötvözetek mikroszkópi képe: a, homogén vagy egynemű. b, heterogén vagy különmemű szerkezetű ötvözet [Csizmazia1], [Prohaszka], [Jarfas]

alakításkor annál könnyebben jön létre törés, repedés, ami alakadási, teherviselési szempontból egy igen hátrányos tulajdonság [Jarfas].

Ugyanakkor, ha az ötvözőanyag az ötvözött fémmel fémes vegyületet alkot, a keletkező fémes vegyület-krisztallitok sokkal nagyobb mértékben növelik az ötvözet keménységét és szilárdságát, mintha az ötvözet szilárd oldat lenne, ami egy kihasználható, hasznos tulajdonság lehet. Amennyiben kemény anyagra van szükség, a fémes vegyületek megoldást jelenthetnek [Jarfas].

Az ötvözetek fajtái szövetszerkezetük szerint

Ha az ötvözet dermedésekor csak tisztán szilárd oldat jön létre, akkor az ötvözőanyagok beépülnek az ötvözött fém rácsszerkezetébe, ezért az ötvözet mikroszkópi képen nem láthatók. Ilyenkor az ötvözet egy krisztallit fajtából épül fel és homogén szerkezetű (lásd a 2.15 (a) ábrát). Az egyféle krisztallitokból álló ötvözeteket egynemű (homogén) felépítésű ötvözeteknek nevezzük. A szilárd oldatok egynemű felépítésű, homogén szövetszerkezetű ötvözetek [Jarfas].

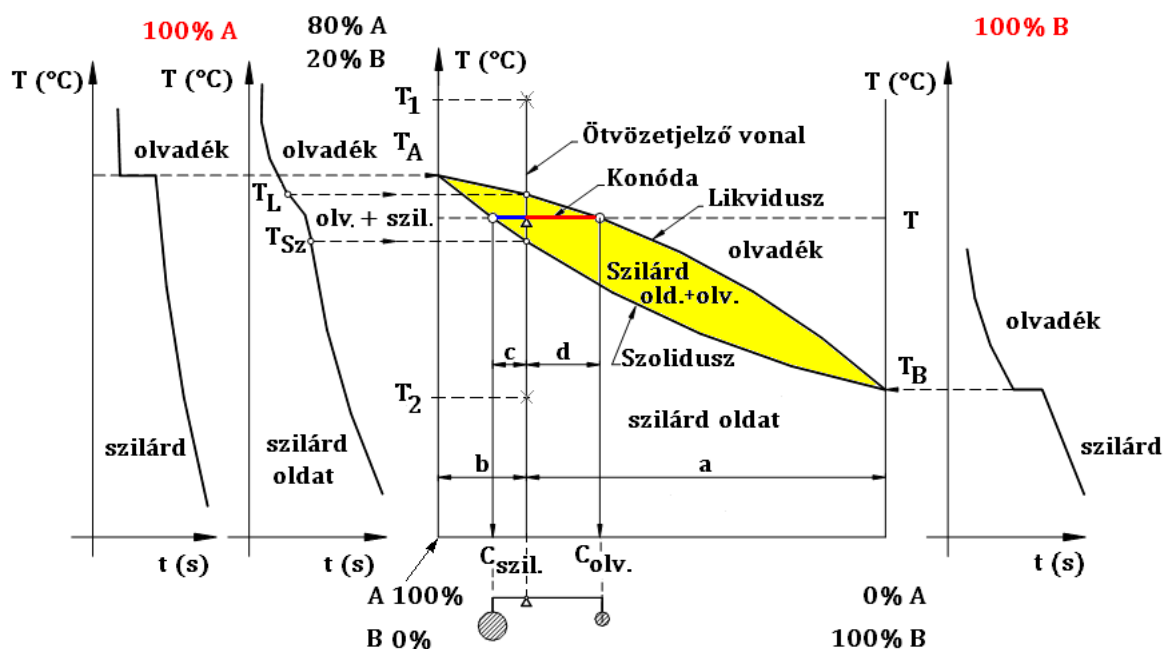
Ha viszont az ötvöző fémes vegyületet alkot az alapfémmel, vagy külön kristályosodik, az ötvözetben már kétféle krisztallit jelenik meg. Ez a mikroszkópi képen is megfigyelhető (lásd a 2.15 (b) ábrát). Ezeknek az ötvözeteknek a szerkezete heterogén, vagyis nem egynemű [Jarfas].

Vagyis a homogén szerkezetű ötvözetekben nincs jelen kétféle, két különböző potenciálú fázis. Ezért elektrolit hatására a homogén szerkezetű ötvözeteknél nem jöhet létre elektrokémiai korrózió. Így a korrózióálló (rozsdamentes, saválló) ötvözetek esetében igen lényeges, hogy homogén legyen a szerkezetük, ezért a korrózióálló ötvözetek általában szilárd oldatok [Jarfas].

2.4.4. Az ötvözetek állapotábrái

A fémek és ötvözeik viselkedésének vizsgálata a lehülési görbék segítségével megtehető. Két alkotó (két fém) minden lehetséges összetételét egyensúlyi diagramon vagy más néven állapotábrán lehet bemutatni, amelyről az ötvözetek állapota, olvadás- és dermedéspontjuk hőmérséklete meghatározható. A diagram vízszintes tengelyén az A és B komponens összes lehetséges koncentrációi, függőleges tengelyén a hőmérséklet van feltüntetve (lásd 2.16) [Jarfas].

Az állapotábra vízszintes tengelye az alapvonal - koncentráció egyenes - hossza 100%-nak felel meg (lásd 2.16). A vonal egyik végpontja A (100% A), a másik végpontja a B (100% B) alkotónak felel meg. A közbenső pontok, A-tól B felé haladva a két alkotó tömegszázalékát mutatják. A függőleges tengelyre a hőmérsékletet visszük fel, így az állapotábrába megadható az adott százalékos összetételhez tartozó olvadási és dermedési hőmérséklet (lásd 2.16, ahol 80% A és 20% B lehülési diagramja alapján határoztuk meg az olvadási és dermedési hőmérsékleteket) [Jarfas].



2.16. ábra. Egymást korlátlanul oldó két komponensű ötvözetrendszer állapotábrája és lehülési görbék [Csizmazia1]

Az összes százalékos összetételhez tartozó olvadási hőmérséklet együtt alkotja a likvidusz, míg az összes dermedési hőmérséklet a szolidusz vonalat (lásd 2.16). Ezen vonalak határolják el egymástól az ötvözet különböző fázisait (jelen példában az olvadékot, szilárd oldat + olvadék keverékét és a szilárd oldatot) [Jarfas].

Adott ötvözetben és adott hőmérsékleten az alábbi kérdéseket kell tudni megválaszolni az egyensúlyi diagramok segítségével:

- milyen fázis, vagy fázisok találhatók,
- milyen az adott fázis, vagy fázisok összetétele, koncentrációja,
- mennyi a fázis, vagy fázisok mennyisége.

Homogén, egyfázisú területen az ötvözetet egy pont, a hőmérsékleti izoterma és az ötvözetjelző metszéspontja jellemzi (lásd 2.16 T_1 és T_2 izotermák esetén). Kétfázisú területen az úgynevezett emelő szabályt használjuk: az ötvözetet a hőmérséklet jelző izotermának a likvidusz és szolidusz vonallal határolt részén az úgynevezett konóda jellemzi (lásd a 2.16) [Jarfas].

A likvidusz és a konóda metszéspontja a koncentráció egyenesre vetítve az olvadék fázis, a szolidusz és a konóda metszéspontja pedig a szilárd fázis összetételét adja meg (lásd a 2.16 $C_{szil.}$ és $C_{olv.}$ értékeit) [Jarfas].

Az úgynevezett emelő szabály a fázisok mennyiségének meghatározását teszi lehetővé a fordított karok szabálya szerint [Jarfas].

Az olvadék mennyisége [Jarfas]:

$$x = \frac{c}{c + d} \quad (2.4)$$

A szilárd fázis mennyisége [Jarfas]:

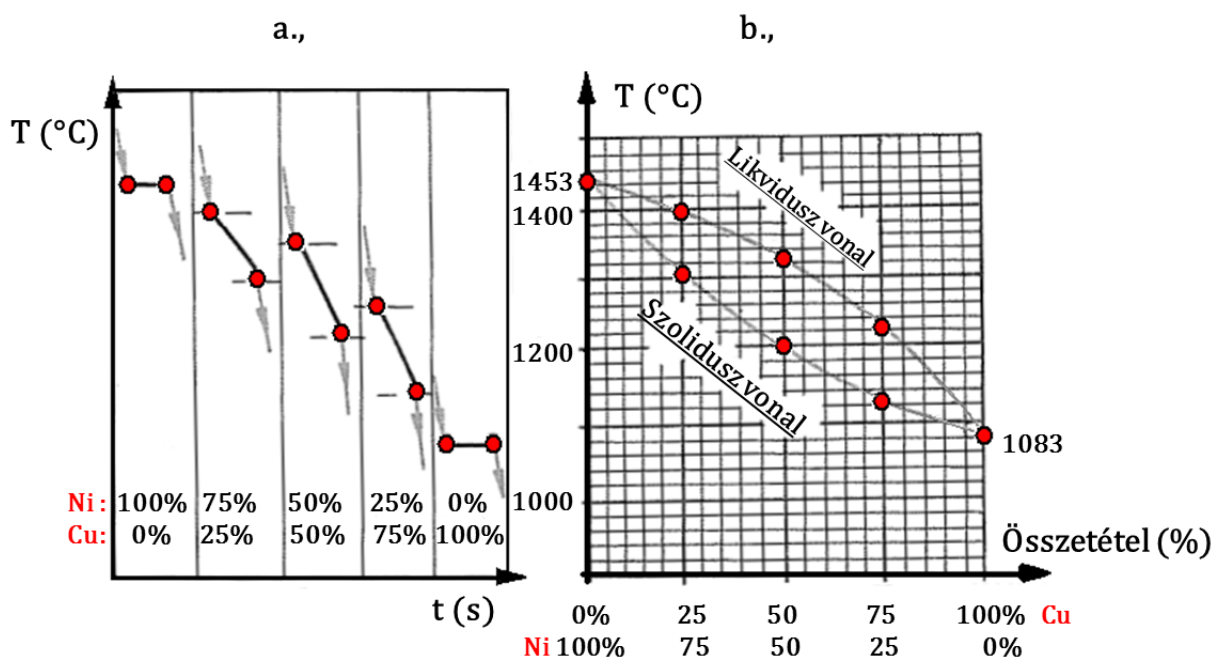
$$1 - x = \frac{d}{c + d} \quad (2.5)$$

Sajnos a gyakorlat nem ilyen egyszerű, mert a fémek ritka párosításoktól eltekintve nem oldják egymást korlátlanul, ezért eutektikus rendszereket képeznek [Csizmazia1], [Prohaszka].

Tehát az állapotábra egy ötvözetrendszer fázisainak egyensúlyi viszonyait összefoglaló diagram [Prohaszka], amely a végtelen lassú lehűlés, így az egyensúlyi körülmények esetén érvényes [Jarfas].

2.4.5. Az ötvözetek állapotábrájának gyakorlati jelentősége

A 2.17 (a) ábrán egymás mellett látjuk a 25%, az 50% és a 75% Ni-nikkel tartalmú Cu-Ni, réz-nikkel ötvözet, valamint a Cu és a Ni, mint színfém lehűlési görbéit. A lehűlési



2.17. ábra. A réz-nikkel (Cu-Ni) ötvözetek: (a) a Cu-Ni ötvözetek lehűlési görbéi, (b) a Cu-Ni ötvözetek állapotábrája [Csizmazia1], [Jarfas]

görbékét megfigyelve, azonnal szembetűnik, hogy az ötvözetek olvadás- és dermedéspontjának hőmérséklete a százalékos összetételtől függően változik, ami egy fontos különbség a színfémekhez képest [Jarfas].

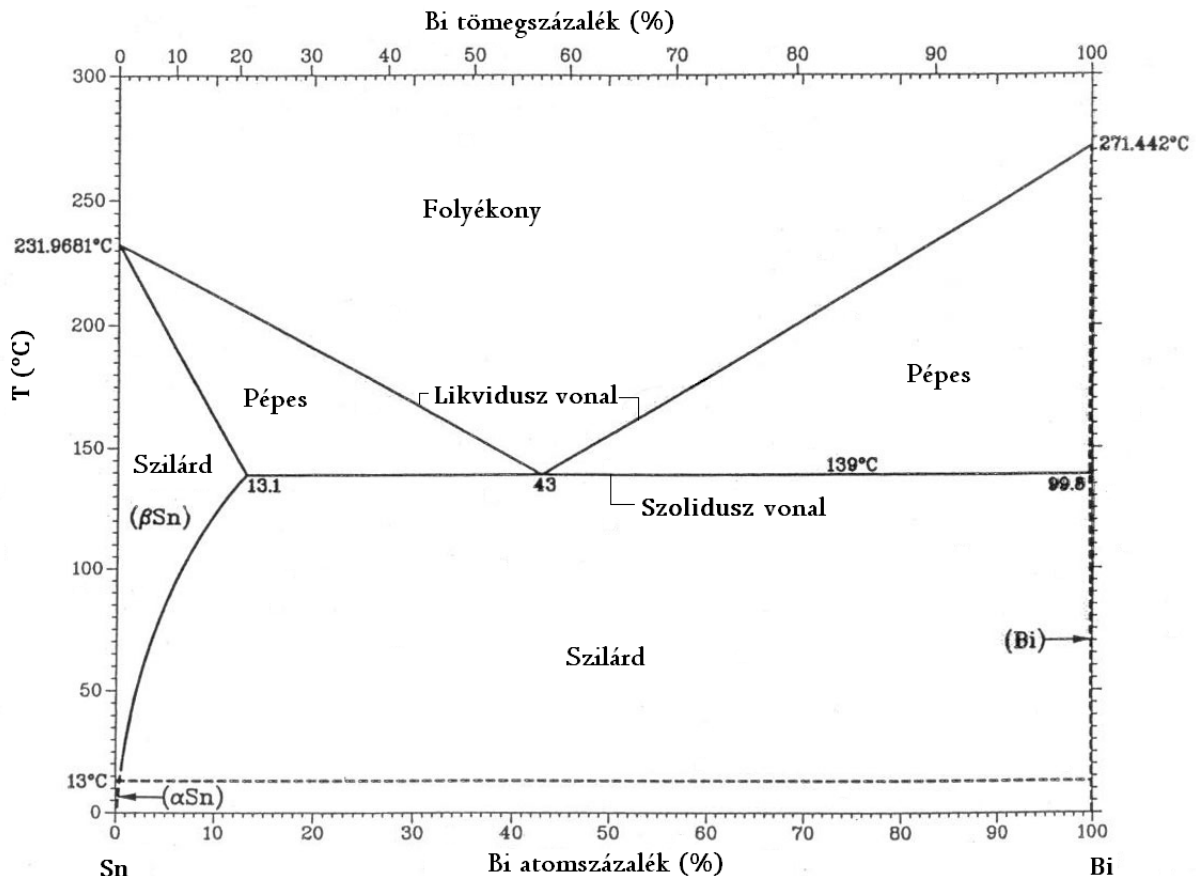
A 2.17 (b) ábrán egy koordináta-rendszert láthatunk: a vízszintes tengelyen az ötvözet százalékos összetétele, a függőleges tengelyen a hőmérséklet került ábrázolásra. Ebben a koordináta-rendszerben ábrázolták a 25%, az 50% és a 75% nikkel tartalmú Cu-Ni ötvözetek, valamint a Cu és a Ni olvadás- és dermedéspontjainak hőmérsékletét [Jarfas].

A berajzolt olvadás- és dermedéspontokat egy-egy vonallal összekötötték. Az olvadás-pontokat összekötő vonalat olvadási vagy likvidusz vonalnak, míg a dermedéspontokat összekötő vonalat dermedési vagy szolidusz vonalnak nevezzük. Az így nyert diagram segítségével nemcsak az ismert, hanem bármelyik összetételű Cu-Ni ötvözetéről meg tudjuk állapítani, hogy az egy választott hőmérsékleten milyen állapotú [Jarfas].

A likvidusz (olvadási vonal) feletti hőmérsékleten az ötvözet folyékony halmazállapotú, a szolidusz (dermedési vonal) alatti hőmérsékleteken az ötvözet szilárd halmazállapotú, míg a két vonal közötti hőmérsékleten pedig pépes állapotban van [Jarfas].

A 2.18 ábrán az Sn-Bi, ón-bizmut ötvözetek állapotábráját láthatjuk. Ha összeha-

sonlítjuk a Cu-Ni (2.17 (b) ábra) és az Sn-Bi ötvözetek állapotábráját, mindkettőn megtaláljuk az likvidusz- és a szolidusz vonalat, azonban a két állapotábra lényeges eltérést mutat [Jarfas].



2.18. ábra. Az ón-bizmut (Sn-Bi) ötvözetek állapotábrája [Csizmazia1], [Jarfas]

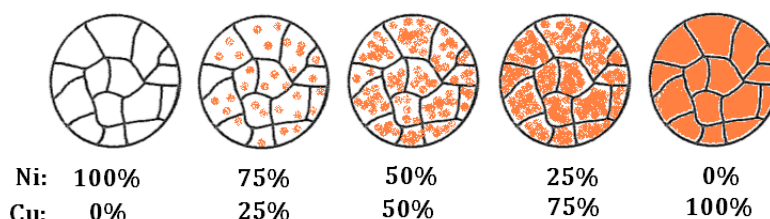
Az eltérés oka, hogy nem minden ötvöző anyag oldódik korlátlanul az ötvözött anyagban (vagy alapfémekben), hanem csak bizonyos százalékig alkotnak homogén szövetszerkezetet. A Cu-Ni ötvözet komponensei szilárd állapotban korlátlanul oldódnak egymásba, így a 2.17 ábrán látható állapotábra jellemzi, ahol mind az likvidusz-, mind a szolidusz vonal görbe. Ezzel szemben az Sn-Bi ötvözetrendszer korlátozottan oldódik egymásba, így a likvidusz vonal görbe, míg a szolidusz vonal egyenes (lásd 2.18 ábra) [Jarfas].

Az állapotábra tulajdonságai, ha az alkotók korlátlanul oldják egymást

A korábban tárgyalt Cu és a Ni ötvözetek szilárd állapotban korlátlanul oldódnak egymásba, megszilárdulásakor minden összetételnél csak homogén szövetszerkezetű szilárd

oldat keletkezik. A Cu-Ni ötvözetek állapotábrájával már megismerkedtünk (lásd 2.17 ábra). Ennek jellemzői általában érvényesek azokra az ötvözetekre is, amelyeknél megszilárdulásakor tisztán szilárd oldat keletkezik. Ha megoldottuk a 2.17 ábrához tartozó feladatot (lásd a fejezet végén), akkor egyúttal megismertük ezen ötvözetek állapotábrájának legfontosabb jellemzőit [Jarfas]:

- Ha az ötvözetek megszilárdulásakor kizárólag szilárd oldat keletkezik, az állapotábrán a likvidusz és a szolidusz vonal egyaránt görbe. A kizárólag szilárd oldatot alkotó ötvözetek között nincs olyan összetételű, amelynek olvadási és dermedési hőmérséklete azonos (nem létezik eutektikum). Ezért nincs olyan összetétel, amelynél az állapotábrán az likvidusz vonal érintkezne a szolidusz vonallal. Az állapotábra minden összetételénél mutat pépes állapotot [Jarfas].
- Ha csak szilárd oldat keletkezik olyan ötvözetben, ahol a komponensek korlátlanul oldják egymást, az ötvözet szerkezete bármely összetétel esetén egynemű (homogén), az ötvözetekben csak egyféle kristallit van jelen. Ezt figyelhetjük meg a Cu-Ni ötvözetek mikroszkópi képein is (lásd a 2.19 ábrát). Az ötvözetek színe változik, mennél több réz van az ötvözetben, annál narancssárga színűbb [Jarfas].



2.19. ábra. A réz-nikkel (Cu-Ni) ötvözetek szövetszerkezeti képe különböző százalékos összetételnél [Csizmazia1], [Jarfas]

Az állapotábra tulajdonságai, ha az alkotók nem oldják egymást

Abban az esetben, ha az ötvözetek megszilárdulásakor nem keletkezik szilárd oldat, vagyis ha az ötvöző szilárd állapotban csak korlátozottan oldódik az alapfémbe (pl. az Sn-Bi ötvözetek, lásd 2.18 ábra), az állapotábrára a következők a jellemzők [Jarfas].

A likvidusz és alacsony ötvözőtartalom esetén a szolidusz vonal görbe, a szolidusz vonal egy adott összetétel után már egyenes. Van olyan összetételű ötvözet, amelynek az olvadási és dermedési hőmérséklete azonos (eutektikum jön létre), az ötvözet úgy szilárdul meg, mint a színfémek külön-külön. Ennél az előbb említett eutektikus összetételnél az likvidusz vonal érintkezik a szolidusz vonallal, lehűlés közben nincs úgynevezett "pépes" állapot [Jarfas].

Az eutektikus ötvözetek és tulajdonságaik

Ha már többször megemlítettük a korábbiakban az eutektikumot, most bemutatjuk részletesen az alábbiakban. Annál az ötvözet-összetételnél, amelynél az likvidusz vonal érintkezik a szolidusz vonallal, az ötvözet olvadáspontjának hőmérséklete azonos a dermedéspont hőmérsékletével. Így a lehűlés közben nincs pépes állapot és ezért itt a legkisebb az olvadáspont hőmérséklete [Jarfas].

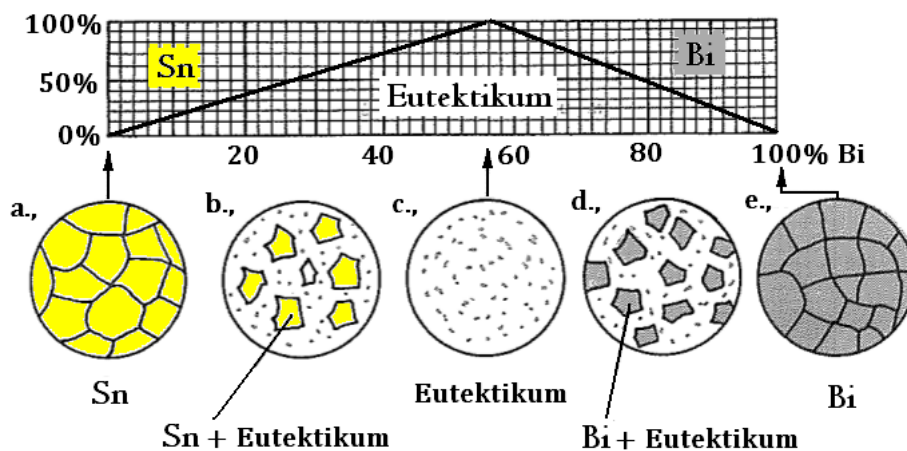
Azt mondhatjuk tehát, hogy az olyan ötvözetet, amelynél az állapotábrán az likvidusz vonal érintkezik a szolidusz vonallal (a színfém összetételen felül), eutektikus (vagyis jól olvadó) ötvözetnek nevezzük. Erre példa, hogy az Sn-Bi ötvözeteknél az eutektikus ötvözet százalékos összetétele: 56% Bi, 44% Sn, ami a 2.18 ábrán jól látható [Jarfas].

Fontos gyakorlati jelentőségük van az eutektikumoknak [Jarfas]:

- Az eutektikus ötvözetek kis olvadáspontjuk következtében különösen alkalmasak öntvények készítésére. Az eutektikus ötvözetek alkalmazása öntvények előállítására azért előnyös, mert alacsony olvadáspontjuk következtében könnyebben megolvaszthatók. Lehűlés közben nincs pépes állapot, ezért megszilárdulásakor a legkisebb mértékben zsugorodnak.
- További példa eutektikumok felhasználására a lágyforrasztás, ahol forrasztóanyagként általában eutektikus ötvözeteket használnak. Ha a forrasztandó anyagot nem szabad nagyobb hőmérsékletre melegíteni és forrasztáskor gyors megszilárdulásra van szükség, az eutektikus ötvözetet használjuk.

Az eutektikus ötvözet megszilárdulásakor az alkotórészek fázisainak finom eloszlású keveréke keletkezik. Ezt az ötvözetszerkezetet eutektikumnak nevezzük. Az eutektikum szerkezetét a 2.20 (c) ábra mutatja. Az ábrán az eutektikum sötét színnel ábrázolt Bi és fehér színnel ábrázolt Sn fázisainak keverékéből áll össze [Jarfas].

A 2.20 (a) és (e) ábrákon a két szélsőséges esetet láthatjuk: 100% Sn és 100%Bi, mint színfém, homogén szövetszerkezetet alkot. Ha az ötvözet összetétele eltér az eutektikus összetételtől, az ötvözet lehűlésekor már van pépes állapot. Pépes állapotban az ötvözetnek az az alkotórésze kristályosodik (szilárdul meg), amelyikből az ötvözetben az eutektikus összetételhez viszonyítva több található az oldatban. Például az 56%-nál kevesebb Bi-ot tartalmazó Sn-Bi ötvözeteknél Sn válik ki a pépes állapotban. Ha az ötvözet 56%-nál több Bi-ot tartalmaz, akkor a pépes állapotban Bi válik ki és jelenik meg a megszilárdulás után [Jarfas]. Ha az ötvözet összetétele eltér az eutektikus ötvözet összetételétől, a megszilárdult ötvözetben az eutektikum mellett megtaláljuk azokat a krisztallitokat, amelyek a pépes állapotban alakultak ki. Az 56%-nál kevesebb Bi-ot tartalmazó ötvözetekben az eutektikum mellett Sn szilárd fázist találunk (lásd 2.20 (b) ábrát). Az 56%-nál több Bi-ot tartalmazó ötvözetekben az eutektikum mellett Bi szilárd fázis van jelen a dermedés után (lásd a 2.20 (d) ábra). A 2.20 ábrán egy diagramot is



2.20. ábra. Az ón-bizmut (Sn-Bi) ötvözetek szövetdiagramja és szövetszerkezeti képe különböző százalékos összetételnél [Csizmazia1], [Jarfas]

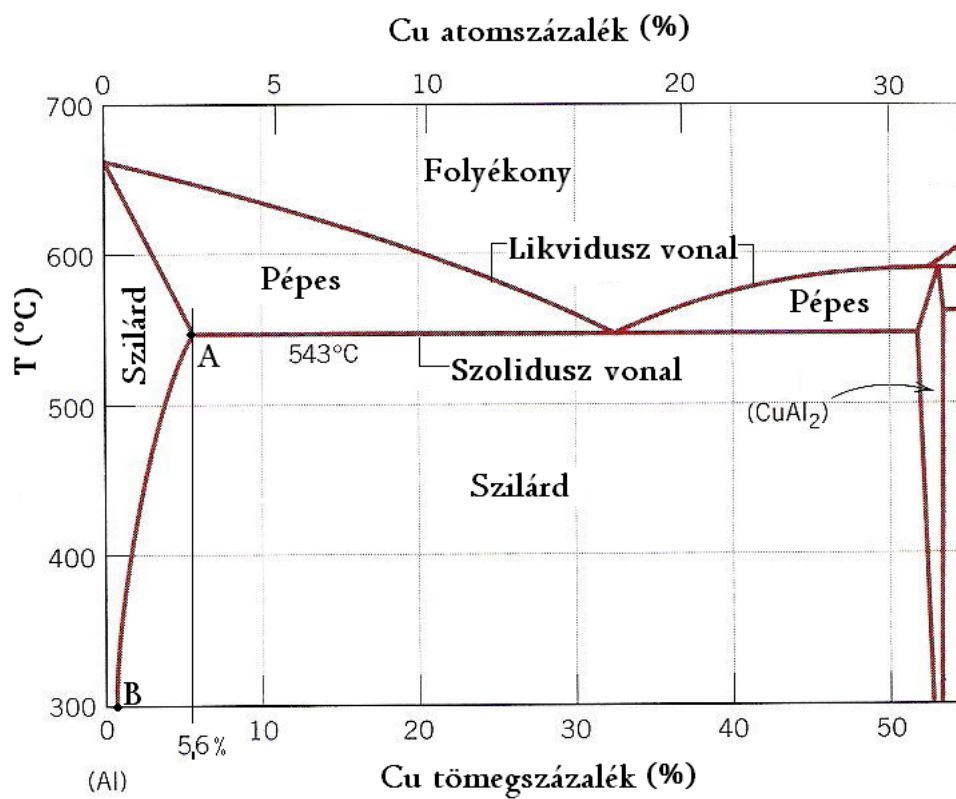
találunk a jellemző szövetszerkezeti képek fölött, amelynek alapján meghatározhatjuk, hogy egy adott összetételű Sn-Bi ötvözet milyen kristallitokból (szövetelemekből) épül fel, és azok milyen mennyiségben fordulnak elő az ötvözetben [Jarfas].

Definícióként elmondhatjuk, hogy azt a diagramot, amely alapján az ötvözetek szövetszerkezete és a szövetelemek mennyisége meghatározó, szövetdiagramnak nevezzük: például a 2.20 ábrán, a jellemző szövetszerkezeti képek fölött az Sn-Bi ötvözetek szövetelem diagramját láthatjuk. A szövetdiagramot úgy készítik, hogy szobahőmérsékletre (esetleg más hőmérsékletre) minden egyes tömegszázalékos összetételre meghatározzák a szilárd szövetelemek (pl. az eutektikum, a színfém, szilárd oldat) százalékos mennyiségét, majd a tömegszázalék függvényében felrajzolják a szilárd szövetelemek mennyiségét. Így adott hőmérsékleten és százalékos összetétel mellett meghatározható, hogy egy adott ötvözetnek milyen a szövetszerkezete [Jarfas].

Az állapotábra jellemezői, ha alkotók korlátozottan oldják egymást

Most nézzük meg, hogy mi a jellemző az olyan ötvözetekre, amelyekben az alkotók szilárd halmazállapotban csak korlátozottan oldják egymást. Erre jó példa a réz, amely a szilárd alumíniumban korlátozottan oldódik csupán és csak egy meghatározott réztartalomig keletkezik szilárd oldat. A szilárd állapotban nem oldódó réz az alumíniummal fémes vegyületet alkot, amelynek tapasztalati képlete a $CuAl_2$ -vel fejezhető ki. Az alumínium-réz (Al-Cu) ötvözetek állapotábráját a 2.21 ábra mutatja [Jarfas].

Az Al-Cu ötvözetek állapotábráján (lásd a 2.21 ábrát) a szolidusz vonal 5,6% Cu-tartalomig görbül. Dermedéskor 5,6% réztartalomig szilárd oldat keletkezik. Az alumí-



2.21. ábra. Az alumínium-réz (Al-Cu) ötvözetek állapotábrájának egy részlete 54% Cu tartalomig [Csizmazia1], [Jarfas]

niium rézoldó képessége csak 543°C -on 5,6%. Ezt a pontot az állapotábrán "A" betűvel jelöljük. Ha a szilárd oldat hűl, akkor a rézoldó képessége csökken. A telített szilárd oldatból lehűléskor a réz fémes vegyület formájában kiválik (CuAl_2). Az alumínium rézoldó képessége a szobahőmérsékleten már csak 0,5%. Ezt a pontot "B" betűvel jelöltük a 2.21 ábrán. A szilárd oldatból a CuAl_2 fémes vegyület kiválása az "A" és a "B" pontokat összekötő "AB" vonal mentén játszódik le. Fontos megjegyezni, hogy az ötvöző kiválása a szilárd oldatból megfordítható folyamat. Ha például a tisztán szilárd oldatból lehűléskor ötvöző vált ki és az ötvözetet melegítjük, az ötvöző újra feloldódik, és ismét tisztán szilárd oldatot kapunk. Ennek a tulajdonságnak a kihasználása céljából elvégzett műveletnek (a 2.21 ábra AB vonala fölötti hőmérsékletű állapotban elvégzett művelet) az anyagok képlékeny alakításakor van nagy jelentősége. Az ötvözet képlékenyen akkor alakítható jól, ha tisztán szilárd oldat (homogén a szövetszerkezete). A melegalakítás erre teremt lehetőséget azzal, hogy a szobahőmérsékleten szilárd oldat és fémes vegyület keverékeként (heterogén szövetszerkezet) létező ötvözetet felmelegítjük az allotróp átalakulás vonalának hőmérséklete fölé (például a 2.21 ábra AB vonala) és ott a szilárd oldat

jól alakítható tulajdonságát kihasználva alakot adunk az ötvözetnek [Jarfas].

Amint az a 2.21 ábra alapján látható, az 5.6%-nál több rézet tartalmazó ötvözetek szolidusz vonala egyenes. Ezekben az ötvözetekben a réz nem oldódik teljes mértékben még a megszilárdulás hőmérsékletén sem. Az ilyen jellegű ötvözetek melegítés hatására sem alakulnak szilárd oldattá, ezért képlékenyen általában nehezen alakíthatóak. A likvidusz vonal 33% Cu-tartalomnál érintkezik a szolidusz vonallal, ez az eutektikus (vagy másképpen jól olvadó) Al-Cu ötvözet. Az ilyen összetételű ötvözetek jól önthetők. A $CuAl_2$ fémes vegyület réztartalma 54%. Ilyen réztartalom esetén az ötvözet már tisztán fémes vegyületből áll. A tisztán fémes vegyületből álló ötvözeteknek hátrányos tulajdonságaik (ridegség, képlékenyen nem vagy nehezen alakíthatóság) következtében általában nincs gyakorlati jelentőségük (a keménységük miatt találni alkalmazási példákat), így az Al-Cu állapotábrát csak 54%-ig szokás ábrázolni (lásd a 2.21 ábra) [Jarfas].

2.5. A vas-karbon ötvözetrendszer

Mivel jelenleg a vas-ötvözetek a gyakorlatban (az atomerőművi gyakorlatban is, gondoljunk csak a primer kör csöveire, a különlegesen ötvözött és plattírozással bevont reaktor-tartályra, vagy a turbinák acél lapátsoraira) használt legfontosabb szerkezeti anyagok, így velük indokolt egy külön alfejezetben foglalkoznunk a továbbiakban [Jarfas].

2.5.1. A vas, a karbon és a vas-karbon ötvözetek

A vas ezüstfehér színű fém, amelynek olvadáspontja 1539°C a sűrűsége pedig $7,87\text{ kg/dm}^3$. A vas a nedves levegőn, a CO_2 -tartalmú vízben igen gyorsan oxidálódik, hétköznapi néven rozsdásodik. A keletkező rozsdaréteg nem képez összefüggő bevonatot, hanem porózus, így nem védi meg a vasat a további oxidációtól. Ezért a vas idővel teljes tömegében eloxidálódik, átalakul vas-oxidá (vasrozsdává) [Jarfas].

Így nem meglepő, ha azt mondjuk, hogy a vas a természetben vegyületek formájában fordul elő (például Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , FeCO_3 , FeS_2). Ezekből a vasvegyületekből a technika fejlődésével egyre nagyobb tisztaságú vasat tudtunk előállítani. A napjainkban előállítható legnagyobb tisztaságú vas 99,99%-os tisztaságú színvas [Jarfas].

A színvas, mint a legtöbb színfém, kis szilárdságú, igen lágy anyag. Előnyös mágneses tulajdonságai (amik, pár % szilícium hozzáadásával tovább javíthatók) alapján a színvasat a villamos iparban mint lágy mágneses anyagot használják. Szilárdsági értékei nem elégítik ki a szerkezetek, gépalkatrészek és szerszámok anyagaival szemben felállított követelményeket. Ezért a szilárdsági jellemzőit ötvözéssel javítják: a fémiparban használatos vasanyagok kivétel nélkül ötvözetek, a vas legfontosabb ötvözője a karbon (C - szén) [Jarfas].

A vasötvözetekben található elemi szén – elsősorban a kohászatban – karbonnak hívjuk, megkülönböztetésül a grafitól, amely szintén a karbon egyik megjelenési formája: a karbon egyik allotróp módosulata. A vas a kARBONT a nyersvasgyártás során, a nagyolvasztónak nevezett kemencében beadagolt kokszból veszi fel [Jarfas].

Természetesen az ipari vasötvözetekben a karbon mellett más anyagok is előfordulnak, mint például a mangán (Mn), a szilícium (Si), a króm (Cr), a kén (S) és a foszfor (P), stb. Ezeknek az előbb említett anyagoknak vas tulajdonságaira gyakorolt hatásaival most nem foglalkozunk, mivel ebben az alfejezetben csak a vas-karbon ötvözetekről lesz szó [Jarfas].

A karbon, mint ötvöző a vasban, mint alapfémekben korlátoltan oldódik, atomjai a vas kristályrácsába ékelődnek. A vas kristálymódosulatainak karbonoldó képessége az egyes hőmérsékleteken különböző [Jarfas]:

- A lapközepes köbös térrácsú γ -vasban dermedéskor legfeljebb 2,1% karbon oldódik, ám a vas karbonoldó képessége a hőmérséklettel együtt csökken. Az átkristályosodási hőmérsékleten, 910°C-on (mielőtt a γ -vas átalakulna α -vassá), már csak 0,86% karbonnal képez szilárd oldatot a vas. A γ -vas fémszerkezettani (metallográfiai) elnevezése Robert Austen után az ausztenit. Az ausztenit paramágneses, képlékenyen jól alakítható anyag [Jarfas].
- Hűtés során, átkristályosodáskor keletkező tércözepes köbös térrácsú α -vas karbonoldó képessége lényegesen kisebb az ausztenithez képest. Létrejöttékor, az átkristályosodási hőmérsékleten 0,02%, mőhelyhőmérsékletre (20°C) lehűtve csak 0,008% kARBONT old fel. Az α -vas metallográfiai neve ferrit, karbonoldó képessége 0,02%-tól 0,008%-ig terjed. Fontos jellemzője, hogy igen kevés kARBONT old, ezért gyakorlatilag szőnvasnak tekinthető. További fontos tulajdonsága, hogy ferromágneses anyag [Jarfas].

A vas-karbon ötvözetekben azonban mindig több karbon található, mint amennyi karbonnal a vas szobahőmérsékleten szilárd oldatot képezni képes. A szilárd állapotban nem oldódó karbon vagy kristályos elemi karbon, mint grafit található az ötvözetben, vagy a vassal fémes vegyületet képez. Ilyenkor az ötvözetben, mint vas-karbid (Fe_3C) fordul elő a karbon. A vas-karbid (Fe_3C) egy fémes vegyület, amelynek a metallográfiai neve cementit. Elmondható róla, hogy kemény és rideg anyag. Karbontartalma 6,67% [Jarfas].

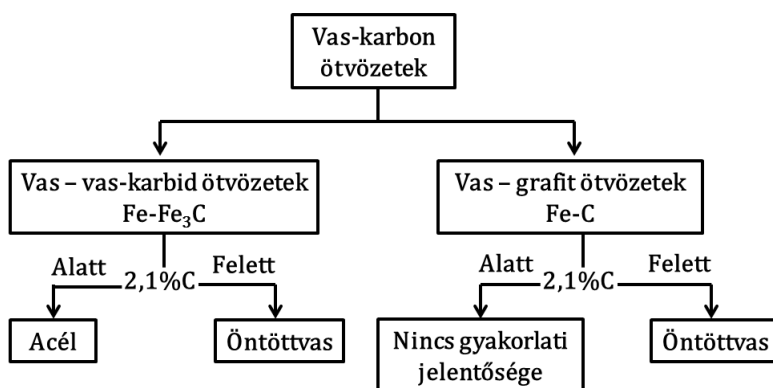
A karbon több féle módon juthat a vas-ötvözetbe, például a kohászat során. Ha a megfelelő összetételő vas-karbon ötvözetet 400°C-nál nagyobb hőmérsékleten hosszabb ideig hevítjük, a benne lévő cementit a következő egyenlet szerint vásra és grafitra bomlik: $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$. Az előbb ismerttetett folyamat során a cementit bomlásakor keletkező grafit metallográfiai neve temperszén [Jarfas].

2.5.2. A vas-karbon ötvözetek fajtái

Ebben az alfejezetben bemutatjuk a vas-karbon ötvözetek fajtáit, amelyek között a karbon ötvözetben való előfordulási módja tesz különbséget [Jarfas]:

- A vas-karbon ötvözetek első csoportját azok az ötvözetek képezik, amelyekben szilárd állapotban nem oldódó elemi karbon, mint vas-karbid (Fe_3C) fordul elő. Ezeket az ötvözeteket szokták vas – vas-karbid ($Fe - Fe_3C$) ötvözeteknek hívni. A vas – vas-karbid ötvözetekhez tartoznak a 2,1%-nál kevesebb karbont tartalmazó úgynevezett acélok, és a 2,1%-nál több de 6,67%-nál kevesebb karbont tartalmazó úgynevezett öntöttvasak.
- A vas-karbon ötvözetek második csoportját azok az ötvözetek alkotják, amelyekben az elemi karbon grafit formájában található meg. Ezek az úgynevezett vas-grafit ($Fe-C$) ötvözetek. A vas-grafit ötvözetekhez tartoznak a 2,1%-nál nagyobb, de 6,67%-nál kisebb elemi karbont tartalmazó öntöttvasak. A 2,1%-nál kevesebb karbont tartalmazó vas-grafit ötvözeteknek nincs gyakorlati jelentőségük.

A vas-karbon ötvözetek előzőekben ismertetett csoportosítását mutatja be a 2.22 ábra [Jarfas].



2.22. ábra. A vas-karbon ötvözetek csoportosítása és fajtái [Csizmazia1], [Prohaszka], [Jarfas]

Az ipari gyakorlatban a vasötvözetek közül a legnagyobb mértékben az acélokat alkalmazzák. Ebből kifolyólag, a vas – vas-karbid ($Fe - Fe_3C$) ötvözeteknek nagyobb a gyakorlati jelentőségük. Ez teszi számunkra szükségessé a vas – vas-karbid ötvözetek állapotábrájával való megismerkedést. A vas – vas-karbid ($Fe - Fe_3C$) ötvözetek állapotábrája eltér a vas-grafit ($Fe-C$) ötvözetek állapotábrájától. Az eltérés nem nagymértékű, ezért elég gyakran a két diagramot egy ábrán egymásra rajzolva ábrázolják,

amelyet megalkotójuk után a Heyn-Charpy féle ikerdiagramnak hívunk. Az ikerdiagramon az $Fe - Fe_3C$ ötvözetekre vonatkozó vonalakat folytonos, míg az Fe-C ötvözetekre vonatkozóakat szaggatott vonallal rajzolják be [Jarfas].

2.5.3. A vas-vaskarbid ötvözetek állapotábrájának tulajdonságai

Az előzőekben tárgyaltak okán az ötvözetek állapotábráival kapcsolatban már vannak ismereteink, amik alapján számos jellegzetességet felismerhetünk a 2.23 ábrán található $Fe - Fe_3C$ állapotábrán (az egyszerűség kedvéért a következőkben a Heyn-Charpy féle ikerdiagram betűjelöléseit használjuk, de az Fe-C ötvözetekhez tartozó szaggatott vonalakat nem tüntetjük fel az ábrákban). Például az rögtön látható, hogy több kristálly módosulat is létezik ebben az ötvözetrendszerben, amelyek 910°C-tól kezdve alakulnak át a "GSE" vonalak mentén. Vagy például, hogy 4,3 C% esetén eutektikum keletkezik, ami 1147°C-on olvad/dermed meg. Az "A"- "H"- "B" és "H"- "J"- "N" peritektikus részt a gyakorlatban használt úgynevezett egyszerűsített diagramok elhanyagolják, mivel ezeknek a területeknek csak az alacsony karbonszázalékú acélok esetén, hegesztéskor van jelentősége [Jarfas].

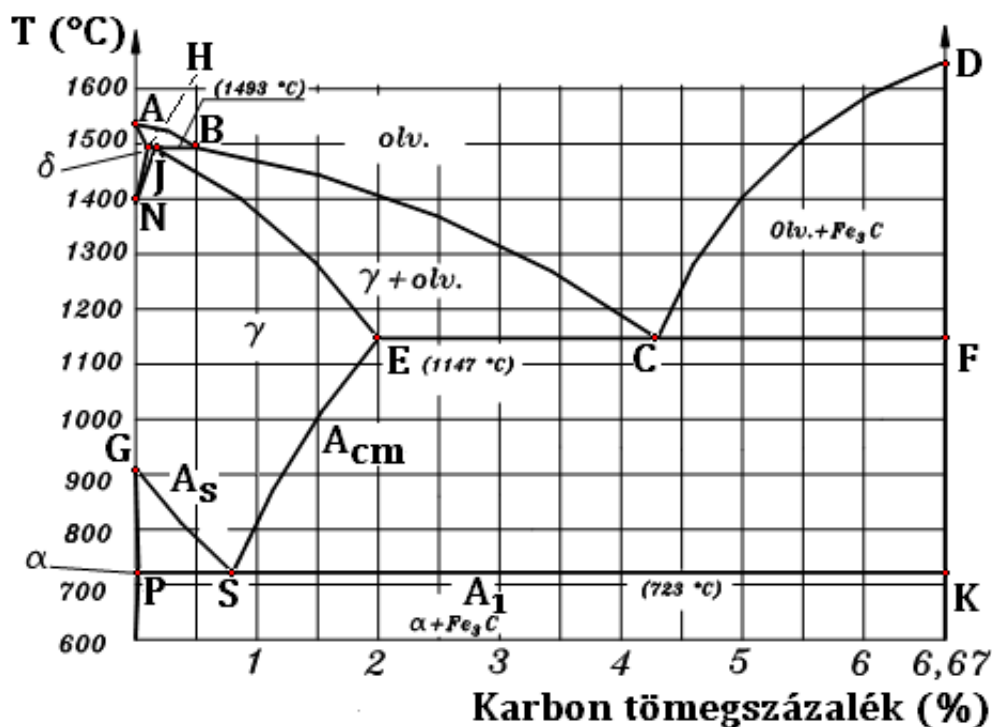
A 2.24 ábrán a $Fe - Fe_3C$ ötvözetrendszer állapotábrájába berajzoltuk az egyes szilárd állapotokhoz tartozó jellemző szövetszerkezeti képeket [Jarfas].

Ahogy korábban említettük az eutektikus (jól olvadó) vas-karbon ötvözet karbontartalma 4,3%. Ennél a karbontartalomnál érintkezik a likvidusz vonal a szolidusz vonallal. Ennek a vas-karbon ötvözetnek a legkisebb az olvadáspontja (1143°C) és megszilárdulásakor eutektikum jön létre. A vas – vas-karbid ötvözetek eutektikumának metallográfiai neve lédeburit, amely kemény és képlékenyen nem alakítható anyag [Jarfas].

Az eutektikum az ötvözet alkotórészeinek krisztallitjaiból épül fel, azok finom eloszlású keveréke. A lédeburit mikroszkópi képének rajzán megfigyelhető (lásd az 2.24 (m) ábra), hogy perlit- és cementit krisztallitok keverékéből épül fel. Tulajdonságai ezért hasonlítanak a cementit tulajdonságaihoz [Jarfas].

A 4,3%-nál több karbont tartalmazó ötvözeteknél vas-karbid, a kevesebb karbont tartalmazó ötvözeteknél γ -vas válik ki és szilárdul meg a pépes állapotban. Ezek a kivált anyagok a megszilárdult ötvözetekben is megtalálhatók [Jarfas].

Csak tisztán lédeburitot tartalmazó anyagot egyedül a 4.3% karbont tartalmazó ötvözetben (eutektikum) találunk. A 4,3%-nál több karbont tartalmazó ötvözetek (6,67% C-tartalomig) megszilárduláskor lédeburitból és cementit krisztallitokból épülnek fel (lásd 2.24 (d) ábra). A 4,3%-nál kevesebb karbont tartalmazó ötvözetek szövetszerkezetét (egészen a 2,1% karbontartalomig) megszilárdulás után ausztenit krisztallitok és lédeburit alkotják (lásd 2.24 (b) ábra) [Jarfas].



2.23. ábra. A vas-vas-karbid ($Fe - Fe_3C$) ötvözetek állapotábrája [Csizmazia1], [Prohaszka], [Jarfas]

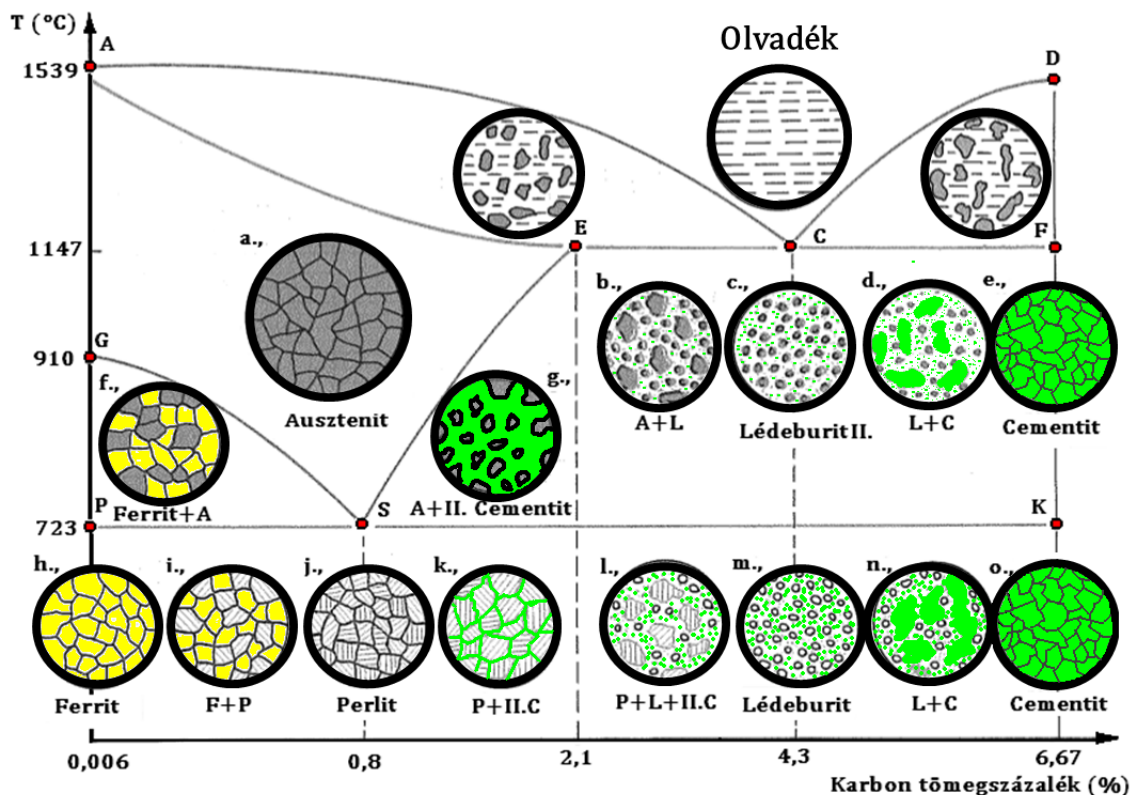
2,1% karbontartalomig megszilárduláskor tisztán szilárd oldat, ausztenit keletkezik. Ezt a tényt az is jelzi az állapotábrában, hogy 2,1% karbontartalomig a szolidusz vonal görbült, és a γ -vas (az ausztenit) maximális karbonoldó képessége 2,1%-nál van [Jarfas].

A vas – vas-karbid ötvözetek megszilárdulásakor (1147°C) kialakuló szövetösszetétele a szövetdiagram alapján állapítható meg (lásd 2.24 ábra) [Jarfas]:

- a vas – vas-karbid ötvözetek dermedésekor 2,1% karbon tartalomig homogén szerkezetű ötvözet keletkezik és ezek az ötvözetek a képlékenyen alakítható acélok.
- dermedéskor a 2,1%-nál nagyobb és 6,67%-nál kisebb karbon tartalom esetén vas-karbid (cementit) is keletkezik és heterogén szövetszerkezetű ötvözet jön létre. Ezek az ötvözetek pedig a képlékenyen nem alakítható öntöttvasak.

A vas-vaskarbid ötvözetek kristályosodása

Most nézzük meg, hogy milyen szilárd állapotban bekövetkező (allotróp) átalakulásokkal találkozunk a vas – vas-karbid rendszerben. Az előzőek tükrében nem meglepő, ha azt



2.24. ábra. A vas-vas-karbid ($Fe - Fe_3C$) ötvözetek jellemző szövetszerkezeti képei az állapotábrában [Csizmazia1], [Jarfas]

mondjuk, hogy a megszilárdult vas – vas-karbid ($Fe - Fe_3C$) ötvözetek lehűlés közben átalakulnak [Jarfas].

A dermedés után megszilárdult vasötvözetekben a legfontosabb átalakulás az átkristályosodás. A lehűlés alkalmával bekövetkező átkristályosodáskor a γ -vas átalakul α -vassá és cementitté. A keletkező α -vasnak lényegesen kisebb a karbonoldó képessége, ezért a keletkező térszerű köbös rácsszerkezetből a karbonatomok kiválnak (kidiffundálnak). A rács szerkezetéből kiváló karbonatomok a vasatomokkal vas-karbiddá (cementitté) egyesülnek és cementit lemezeket hoznak létre. Tehát, az ausztenit átkristályosodáskor α -vasra (ferritre) és cementit lemezké alakul át. Ez az ausztenitből keletkező szövetelem ferritbe (α -vasba) ágyazódó cementit lemezekből áll és a metallográfiai elnevezése perlit [Jarfas].

Fontos megjegyezni, hogy a perlitben lévő cementit lemezek nehezítik az igénybevételek alkalmával kialakuló csúszásokat, így a perlit képlékeny alakváltoztatásához nagyobb erőre van szükség, mint az ausztenit esetében. A perlit szívós szövetelem, szer-

kezetét 100%-os perlittartalom esetén a 2.24 (j) ábrán figyelhetjük meg, de az (i) ábrától az (l)-ig jelen van változó mennyiségben [Jarfas].

Az átkristályosodás megfordítható (reverzibilis) folyamat, mert ha a perlitet melegítjük, akkor a benne lévő α -vas és cementit visszaalakul γ -vassá. Ekkor, a γ -vasban a cementit lemezek feloldódnak, a perlit visszaalakul ausztenitté. Ez a fordított irányú átkristályosodás figyelhető meg például akkor, amikor az acélt kovácsolás előtt felizzítjuk. A cementit lemezek feloldódnak, az acél ausztenites szerkezetű lesz, és így könnyen alakíthatóvá válik [Jarfas].

A vas – vas-karbid állapotábrában 723°C-nál található az a vonal, amely alatt, vagyis amelynél kisebb hőmérsékleten ausztenit (vagyis γ -vas) már nem fordul elő, mivel nem stabil. A „P”, az „S” és a „K” betűkkel jelzett pontokat összekötő, az α -vas - γ -vas allotróp átalakulás vonal alatt az ötvözetekben kristályszerkezeti átalakulások már nem fordulnak elő. Ezért a „PSK” vonalat alsó átalakulási vonalnak szokás nevezni, de jelölik A_1 vonalként is. Az átkristályosodás (ahogyan a színfémek esetében) csak egensúlyi körülmények között, lassú hűtés, vagy lassú melegítés esetén játszódik le 723°C-on. Gyors hűtés esetén kisebb, gyors melegítés esetén pedig nagyobb hőmérsékleten következik be az átalakulás [Jarfas].

Az átkristályosodás során az ausztenitből mint szilárd oldatból különböző fázisok válnak ki. Ez a folyamat hasonló a megszilárduláshoz. Ezt az is jelzi, hogy az „A”, a „C” és a „D” összekötő likvidusz vonal alakja hasonlít a „G”, az „S” és az „E” pontokat összekötő vonal alakjához (lásd 2.23 ábra) [Jarfas].

Ha az ausztenit 0,86%-nál több korbont tartalmaz, akkor lehűléskor belőle másodlagos vagy másképpen szekunder cementit válik ki. Ennek a szokásos jelölése a szekunder (II.) cementit. A szilárd oldatban az ausztenitből kiváló cementitet megkülönböztetik az olvadékból kiváló cementitől. Ezért nevezik másodlagos vagy szekunder cementitnek. Ez a kiválás az „SE” vonal mentén indul meg (lásd a 2.23 ábrán) és az ausztenitből kivált másodlagos cementit az ötvözetben a 723°C-nál bekövetkező átkristályosodás után is megmarad [Jarfas].

A 0,86%-nál nagyobb de 2,1%-nál kisebb mennyiségű korbont tartalmazó acélok 723°C-nál kisebb hőmérsékleten perlit- és szekunder cementit krisztallitokból épülnek fel ahogyan az a 2.24 (k) ábrán látható [Jarfas].

Amennyiben az ausztenit 0,86%-nál kevesebb korbont tartalmaz, akkor belőle α -vas (ferrit) és cementit keletkezik allotróp átalakulás során. Ez a kiválás a „GS” vonal mentén indul meg (lásd a 2.23 ábrán) és az ausztenitből kivált ferrit az ötvözetben átkristályosodás után is megtalálható [Jarfas].

A 0,86%-nál kevesebb korbont tartalmazó acélok 723°C-nál kisebb hőmérsékleten ferrit- és perlit krisztallitokból épülnek fel (lásd a 2.24 (i) ábra) [Jarfas].

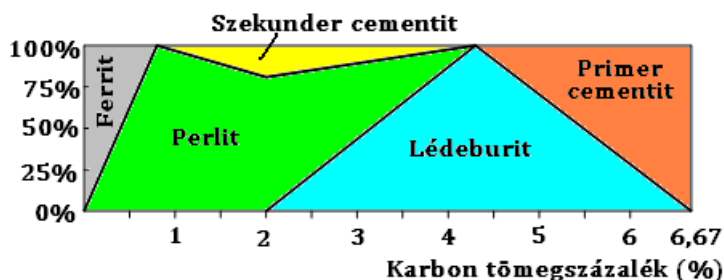
Az acélok lehűlésekor az ausztenit átalakulása a 2.23 ábrán látható „GS” és az „SE” vonal mentén indul meg. Ezért szokás a „GS” és az „SE” vonalakat felső átalakulási vonalnak nevezni. A „GS” vonalat jelölik még A_S vagy A_3 , az SE vonalat pedig A_{cm} vonalnak is, míg a 723°C -on behúzott vonalat szokás A_1 vonalnak jelölni (lásd a 2.23 ábrán) [Jarfas].

Az átkristályosodási hőmérsékleten csak 0,86% karbontartalomnál van tiszta ausztenit (ami az állapotábrán „S” betűvel jelzett pont). Az átkristályosodás után ez az ötvözet viszont csupán perlitet tartalmaz, ezért a 0,86% karbont tartalmazó acél 723°C -nál kisebb hőmérsékleten kizárólag perlit kristallitokból épül fel (lásd a 2.24 (j) ábra). Fontos megjegyezni, hogy az ausztenit lehűlésekor a 2,1%-nál több karbont tartalmazó ötvözetekben is átalakul [Jarfas].

A 2,1%-nál több míg a 4,3%-nál kevesebb karbont tartalmazó vasak közvetlenül a megszilárdulás után ausztenitet és lédeburitot tartalmaznak (lásd a 2.24 (b) ábra). A lehűlés során a öntöttvasakban lévő ausztenitből is kiválik a szekunder cementit, s 723°C -on a bennük lévő ausztenit szintén átalakul perlitte. A 2,1 és 4,3% közötti karbont tartalmazó vasak 723°C -nál kisebb hőmérsékleten perlit-, lédeburit- és szekunder cementit kristallitokból épülnek fel, ahogy azt a 2.24 (l) ábra mutatja [Jarfas].

Az átkristályosodáskor a lédeburitban lévő ausztenit is átalakul: míg 723°C -nál magasabb hőmérsékleten a lédeburit ausztenit és cementit kristallitok keveréke, addig alacsonyabb hőmérsékleten ferrit kristallitokból és cementit kristallitokból áll [Jarfas].

Végezetül a 2.25 ábra mutatja a 723°C -nál kisebb hőmérsékleten kialakuló szövetösszetételeket. A szövetdiagramot úgy készítik, hogy szobahőmérsékletre (esetleg más hőmérsékletre) minden egyes tömegszázalékos összetételre meghatározzák a szilárd szövetelemek százalékos mennyiségét, majd a tömegszázalék függvényében felrajzolják a szilárd szövetelemek mennyiségét. Így adott hőmérsékleten és százalékos összetétel mellett meghatározható, hogy egy adott ötvözetnek milyen a szövetszerkezete [Jarfas].



2.25. ábra. A vas - vas-karbid ($Fe - Fe_3C$) ötvözetek szövetdiagramja 20°C -on [Csizmazia1], [Jarfas]

Az előzőekben ismertetettek alapján a vas – vas-karbid ötvözetek dermedésekor, valamint lehűlésekor bekövetkező átalakulásokat már megismertük. Összefoglalásként elmondható, hogy az átalakulásokat és azok hőmérsékletét az állapotábrán látható vonalak jelzik (lásd a 2.23 ábrát). Az állapotábrán való kiigazodáshoz ezért elengedhetetlen az ábrán található vonalak és pontok alapos ismerete: tudni azt, hogy az adott vonalak milyen átalakulást jelentenek illetve az adott terület milyen fázisnak felel meg. Az állapotábra (lásd a 2.23 ábrát) vonalaival jelzett átalakulások, mint már tudjuk, megfordítható (reverzibilis) folyamatok: melegítéskor a folyamatok fordítottan következnek be [Jarfas].

2.5.4. A vas-vaskarbid ötvözetekben bekövetkező átalakulások függése a hűlési sebességtől

A színtémeknél leírtakhoz hasonlóan, az ötvözetek szerkezetének átalakulásai csak egészen lassú hőmérséklet-változás esetén következnek be az állapotábrán megadott hőmérsékleteken: mert gyors felmelegítéskor az átalakulások magasabb, gyors hűtéskor alacsonyabb hőmérsékleteken játszódnak le. Lássunk egy példát: az ausztenit átalakulása perlitté, illetve a perlit visszaalakulása ausztenitté csak egészen lassú hőmérséklet-változás esetén következik be 723°C-on. Ha az ausztenit lehűlése gyors, az átalakulás, az átkristályosodás kisebb hőmérsékleten jön létre [Jarfas].

Alacsonyabb hőmérsékleten az anyag részecskéinek hőmozgása kisebb intenzitású. Ennek következtében a kristályrácsban az idegen atomok lassabban vándorolnak, vagyis a diffúzió sebessége kisebb [Jarfas].

Abban az esetben, ha vas-karbon ötvözetekben a gyors lehűlés következtében az átkristályosodás 723°C-nál alacsonyabb hőmérsékleten következik be, a karbonatomok kisebb sebességgel diffundálnak ki a keletkező α -vas rácsából. A lassabban lejátszódó diffúzió következtében a karbonatomok a térrácsban kisebb távolságra vándorolnak, ezért a keletkező cementit lemezek vékonyabbak és közelebb helyezkednek el egymáshoz. A 723°C-nál alacsonyabb hőmérsékleten bekövetkező átkristályosodás esetében az ausztenitből keletkező perlit finomabb szerkezetű, más tulajdonságú [Jarfas].

Akkor, ha az ausztenitet elég gyorsan hűtjük, elérhetjük, hogy az átkristályosodás 300°C-nál kisebb hőmérsékleten játszódik le. 300°C-on a vasatomok hőmozgása már olyan kismértékű, hogy a karbonatomok nem diffundálnak ki a keletkező α -vasból. Az ausztenit ilyenkor nem perlitté alakul át, mert a karbonatomok a keletkező α -vasban, ferritben maradnak [Jarfas].

2.6. A fejezethez tartozó animációk

A fejezethez tartozó animációk a következők:

- A fémek köbös rácsainak a három fajtáját szemlélteti az "Interaktív rácsszerkezetek" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_racsszerkezetek_D01.swf

- A fémek kristályrácsát és az egyszerű köbös rácsot szemlélteti "A fémek rácsszerkezete" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Femek_racsszerkezete_D01.swf

- A fémek kristályrácsát és a térközepes köbös rácsot szemlélteti "A fémek rácsszerkezete TKK" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Femek_racsszerkezete_TKK_D01.swf

- A fémek kristályrácsát és a lapközepes köbös rácsot szemlélteti "A fémek rácsszerkezete LKK" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Femek_racsszerkezete_LKK_D01.swf

2.7. Ismétlő kérdések a 2. fejezet anyagához [Jarfas]

1. A karbonnak több kristályos formája létezik, ezek milyen tulajdonságúak? Mik az eltérő tulajdonságok okai?
2. Milyen részecskékből épülhet fel a fémek kristályrácsa?
3. Mi az oka a fémek jó villamos és termikus vezetőképességének?
4. Vizsgálja meg az 2.1, 2.2, 2.3 ábrákat és állapítsuk meg, hogy mit ábrázolnak! Az ábrázolt rácsszerkezetek miben térnek el egymástól? Válaszához használja fel az "Interaktív rácsszerkezetek" című interaktív animációt.
5. Mi történik a kristályos anyagokban átkristályosodáskor?
6. Mit nevezünk átkristályosodási hőmérsékletnek?
7. A vasnak milyen kristálmódosulatai léteznek, mi alapján különböztetjük meg őket és azokat hogyan nevezzük?

8. Hány fok a vas átkristályosodási hőmérséklete? A hőmérséklet-változás sebessége azt hogyan befolyásolja?
9. Melegítés hatására az anyagok kitágulnak. Ez a jelenség miért következik be?
10. A réz melegítésekor készített diagramon (lásd 2.7 ábra) figyeljük meg a hőmérséklet növekedését. Mi tűnik fel az ábrán?
11. Milyen hasonlóság figyelhető meg a lehűlési és a felmelegítési görbék között, rajtuk hány töréspontot figyelhetünk meg? A töréspontokban milyen halmazállapotú az anyag?
12. Figyeljük meg a 2.8 ábrát, és állapítsuk meg, hogy mivel kezdődik és mivel fejeződik be a kristályosodás?
13. A 2.8 ábra alapján állapítsuk meg, hogy a két töréspont, az olvadáspont és a dermedéspont között milyen halmazállapotú a dermedő anyag?
14. Milyen alakúak a köbös rendszer esetén a szabályos kristályok?
15. Mi történik a folyékony színfémekben a megszilárdulásakor, ha gyorsan hűl le? Ilyenkor milyen szemcseszerkezet alakul ki és miért?
16. Mi történik a folyékony színfémekben a megszilárdulásakor, ha lassan hűl le? Ilyenkor milyen szemcseszerkezet alakul ki és miért?
17. Mi történik a színfémekben olvadásakor? Miért nem növekedik a hőmérséklete a melegítés ellenére?
18. Milyen halmazállapotú a színfém az olvadásponton és a dermedéspontban, mi a jellemző ezek hőmérsékletére?
19. Hogyan indul meg a kristályosodás színfémekben?
20. Miért használhatók ipari célokra korlátozottan a színfémek? Mi teszi szükségessé a fémek ötvözését?
21. Mi történik fémek egymásba történő oldódásakor? Az oldódás milyen változás: fizikai vagy kémiai?
22. Mit értünk pépes állapoton? Milyen hőmérsékletű ötvözetek vannak pépes állapotban?
23. Ötvözhetőek-e és ha igen, akkor hogyan a fémek szilárd állapotban (ilyenkor mi játszódik le)?

24. Az ötvözőanyagok milyen állapotban fordulnak elő a folyékony ötvözetekben?
25. A szilárd oldatoknak milyen fajtái vannak? A keletkezésüknek mi a feltétele?
26. Miképpen jön létre a fémes anyagokban a képlékeny (maradó) alakváltozás? A kristályrácsba beépülő idegen atomok azt hogyan és milyen irányba befolyásolják?
27. Mikor egynemű és mikor különmemű az ötvözet szerkezete? Milyen a szövetszerkezetük?
28. Mi szükséges ahhoz, hogy elektrokémiai korrózió létrejöjjön?
29. A korrózióálló acéloknak milyen a szövetszerkezete? Mi biztosítja a korrózióállóságot?
30. A 2.17 és 2.18 ábrákon látható állapotábrákat összevetve határozza meg, hogy: a., Milyenek a likvidusz vonalak alakjai, egyenes vagy görbe? b., Milyenek a szolidusz vonalak alakjai, egyenes vagy görbe? c., Van-e az állapotábrákon olyan összetételű ötvözet, amelynek olvadás- és dermedéspontja azonos hőmérsékletű, ha igen melyiken és hol?
31. Fel lehet-e ismerni az állapotábrán azt az ötvözetet, amelynél lehűlés közben nincs pépes állapot? Ha igen, hogyan? Az Sn-Bi ötvözetek esetében ennek az ötvözetnek milyen a százalékos összetétele (lásd (2.18 ábra)?
32. Figyeljük meg az Al-Cu ötvözetek állapotábráját (2.21 ábra), és az eddig tanultakat alkalmazva, oldjuk meg a következő feladatokat:
33. Milyen fajta vonalakat tudunk megkülönböztetni az állapotábrákon? Felhasználásukkal mit tudunk megállapítani?
34. Mi a jellemző az állapotábrára, ha az ötvözetek megszilárdulásakor csupán szilárd oldat jön létre?
35. Mi a jellemző az állapotábrára, ha az ötvözetek megszilárdulásakor szilárd oldat nem keletkezik?
36. Miről tudjuk felismerni az állapotábrán az eutektikus összetételt? Hogyan szilárdulnak meg az eutektikus összetételű ötvözetek?
37. Mi a gyakorlati jelentőségük az eutektikus összetételű ötvözeteknek?
38. Azon a részen, ahol az állapotábrán a szolidusz vonal görbült, az ötvözetek megszilárdulásakor mi keletkezik? Ezek az ötvözetek képlékenyen jól alakíthatók-e? Ha igen, akkor miért?

39. Azon a részen pedig, ahol az állapotábrán a szolidusz vonal egyenesen (és az alapvonnallal párhuzamosan) fut, abból mire következtethetünk? Általában lehet-e ezeket az ötvözeteket képlékenyen alakítani?
40. Milyen összetételű ötvözetek rendelkeznek jól önthető tulajdonsággal és miért?
41. Mik a vas főbb fizikai tulajdonságai?
42. A vas a természetben milyen formában fordul elő?
43. A vasnak milyen kristálmódosulatai léteznek? A vas átkristályosodása hány fokon történik meg?
44. Mit jelent az, hogy az ötvöző korlátoltan oldódik szilárd állapotban a megszilárdult ötvözetben? Mi történik a telített szilárd oldattal, hűtés során?
45. Miért szükséges a vas ötvözése?
46. Milyen formákban fordul elő a karbon a megszilárdult vas-karbon ötvözetekben?
47. Sorolja fel, hogy mi a vas kristálmódosulatainak metallográfiai neve! Jellemezze azokat, például azzal, hogy milyen a karbonoldó képességük!
48. A szilárd állapotban nem oldódó elemi karbon milyen formában fordulhat elő a vas-karbon ötvözetekben és mi a jellemző ezekre az anyagokra? Ezen megjelenési formák szerint hogyan csoportosítjuk a vas-karbon ötvözeteket? Melyik csoportnak van nagyobb gyakorlati jelentősége?
49. Hogyan ismerhető fel az állapotábrán az eutektikus összetételű ötvözet? Megszilárdulás után milyen a szerkezete? Hány százalék a karbontartalma az eutektikus vas-karbon ötvözetnek? Mi az eutektikum fémszerkezettani neve és mik a tulajdonságai?
50. Melyik alkotórész válik ki pépes állapotban azokból az ötvözetekből, amelyek összetétele kisebb, illetve nagyobb mennyiségű karbont tartalmaz, mint az eutektikus vas ötvözet?
51. Tudunk-e valamire következtetni a görbült szolidusz vonalból az ötvözet szerkezetére vonatkozóan?
52. Vas-karbon ötvözetek esetén hány százalék karbontartalomig görbe a szolidusz vonal?
53. Milyen folyamatok játszódnak le a vasban a lehűléskor bekövetkező átkristályosodás alatt?

54. Mi a jellemző a γ -vas (ausztenit) és az α -vas (ferrit) karbonoldó képességére?
55. Vas-vas-karbid ötvözetekben megszilárduláskor hány százalék karbontartalomig keletkezik szilárd oldat? Mi a szilárd oldat fémszerkezettani neve és milyen tulajdonságú?
56. Milyen hatással van a karbon a vas átkristályosodási hőmérsékletére? A vas – vas-karbid lassú lehűlésekor hány foknál következik be az átkristályosodás? Mi történik a lassú lehűlés alkalmával bekövetkező átkristályosodáskor?
57. A perlit miből épül fel és milyen tulajdonságú szövetelem? Hány százalék karbontartalomnál találunk tisztán perlitet a vas-vas-karbid ötvözetek esetén?
58. Mi az ausztenit és lehűléskor milyen fázissá alakul át?
59. Milyen szövetelemeket tartalmaznak szobahőmérsékleten a 0,86%-nál több és a 0,86%-nál kevesebb karbont tartalmazó acélok?
60. Hogyan befolyásolja a hűtés, a melegítés sebessége az ötvözetek szerkezetében bekövetkező változások hőmérsékletét?
61. Hogyan keletkezik az ausztenitből perlit, az átalakulás lassú lehűlés esetén mekkora hőmérsékleten következik be?
62. Mi történik az acélban akkor, ha az ausztenit 300°C-nál kisebb hőmérsékleten kristályosodik át?
63. Mi szükséges ahhoz, hogy az ausztenit átkristályosodása 300°C alatt történjen meg?

2.8. Feladatok a 2. fejezet anyagához [Jarfas]

1. Határozzuk meg, hogy a szabályos (köbös) rácsszerkezetnek milyen fajtái vannak!
2. Az olvadásról és dermedésről tanultakat felhasználva, a lehűlési görbén fölfelé haladva (lásd a 2.10 ábrát), állapítsuk meg, hogyan játszódik le az ötvözetek olvadása. A következő kérdések segítséget adnak a feladat megoldásához: Mi játszódik le a dermedéspontra felmelegített ötvözetben? Mi jön létre, ha az ötvözetet tovább melegítjük? Mi történik az olvadáspont és a dermedéspont közötti hőmérsékleteken, valamint az olvadáspont hőmérsékletén?
3. Határozzuk azt meg, hogy milyen rácsszerkezete van a krómnak, a nikkelnak és a vasnak!

4. Hasonlítsuk össze a 2.10 ábrán látható lehülési görbét a Cu-réz lehülési görbéjével (lásd 2.7 (b) ábra)! Milyen eltérést látunk?
5. Határozzuk meg a 2.17 (b) ábra, a Cu-Ni, réz-nikkel ötvözetrendszer állapotábrája segítségével az ötvözet olvadási- és dermedéspontjának hőmérsékletét az alábbi százalékos összetételeknél: a, 75% nikkel, b, 25% réz, c, 50% nikkel, d, 75% réz.
6. Határozzuk meg a 2.18 ábra alapján, hogy a következő hőmérsékleteken milyen összetételű Sn-Bi ötvözetek találhatók folyékony, pépes, valamint szilárd halmazállapotban! a, $271,442^{\circ}\text{C}$ fölött, b, $231,9681^{\circ}\text{C}$ és $271,442^{\circ}\text{C}$ között, c, 139°C és $231,9681^{\circ}\text{C}$ között d, 13°C és 139°C között.

A 2. fejezethez tartozó feladatokat és azok megoldásait mutatja be a "Feladatmegoldások letöltése a 2. fejezethez" című interaktív animáció.

3. fejezet

Energetikai és mechanikai alapok az atomerőművi anyagvizsgálatokhoz

A fejezetet összeállította: *Dr. Gémes György András*

Ebben a fejezetben bemutatásra kerül néhány energetikai és mechanikai alapfogalom, amelyek megkönnyítik a későbbi fejezetek megértését.

Az erőművek feladata a mindenkori fogyasztói igényeknek megfelelő villamos és hőenergia kielégítése. Az erőművek azonban összetett rendszerek, melyek főberendezésekre bonthatók, úgy mint:

- a tüzelőanyagban kötött energia hőenergiává történő átalakítása (pl. reaktor, kazánok),
- a hőenergia mechanikai energiává történő átalakítása (gőzturbina),
- a mechanikai energia villamos energiává történő átalakítása (generátor).

Alapfogalmak:

A berendezés élettartama: Az az időtartam, ameddig a berendezés működésképes. Az élettartamot főként műszaki megoldásuk, minőségük, használati módjuk, karbantartásuk és felújításuk határozza meg [Polinszky].

A berendezés elhasználódása: A berendezés használhatóságának az idő előrehaladásával bekövetkező csökkenése. Két fő részből, a műszaki elhasználódásból és az erkölcsi avulásból tevődnek össze [Polinszky].

Szerkezeti anyag felépítése: az anyag természete, különbséget téve a vegyi összetétel, a kötési mód és a mikroszerkezet tekintetében.

Igénybevétel: befolyásoló tényezők, amelyek a szerkezeti anyagokra, azok felhasználása során hatnak.

Tulajdonságok: olyan jellemzők, amelyek a szerkezeti anyagok viselkedését különböző igénybevételek mellett leírják.

Az igénybevételek fajtái:

- mechanikai,
- kémiai,
- termikus,
- elektromos, mágneses,
- akusztikus,
- biológiai,
- optikai,
- sugárzásból származóak.

A felsorolt igénybevételek az anyag károsodását idézhetik elő, melyek a következők lehetnek:

- törés,
- korrózió,
- szövetszerkezeti elváltozás,
- biológiai anyagkárosodás,
- öregedés.

Az atomenergetikában alkalmazott szerkezeti anyagok főleg fémötvözetek, amelyeknél a domináns anyagkárosodási módok a törés, korrózió és szövetszerkezeti elváltozások. A biológiai anyagkárosodás a hűtő oldalon a kondenzátorok esetében jellemző, míg az öregedés jellemzően a villamos berendezésekben és vezetékek szigetelésénél jelentkezhet. (A villamos berendezések és vezetékek szigeteléséről, öregedési folyamatairól bővebben az Atomerőművek (BMETE80AE05) című tárgy keretében tudható meg több információ!)

3.1. Mechanikai igénybevétel - Szilárdságtani alapok

Szilárd testekben a terhelés hatására felületegységre eső belső erő jelentkezik, amelyet feszültségnek nevezünk. Anyagvizsgálatok végzésekor, a megfelelő módszer kiválasztásához, a várható hibák meghatározásához, az eredmények értékeléséhez rendkívül fontos a feszültségállapot ismerete. Egy adott test adott terhelésre jellemző feszültségállapotát (lásd még a 3.1 ábrát) a feszültségtenzorral írjuk le:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

$$= \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

ahol:

- $\mathbf{T}$: a feszültségtenzor,
- σ : normál feszültség,
- τ : csúsztatófeszültség,
- az első alsó index a feszültségkomponens által terhelt felület normál vektorának irányát adja meg (lásd 3.1 ábra),
- míg a második alsó index a feszültségvektor irányát jelöli, amit a σ feszültségek esetén el szokás hagyni (lásd 3.1 ábra)!

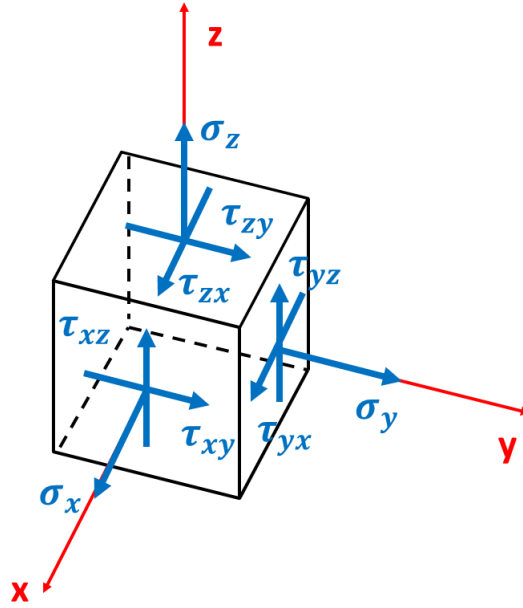
Főfeszültségek számítása háromtengelyű feszültségi állapot esetén az alábbi egyenlet σ -ra való megoldásával történik:

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 - I_2\sigma - I_3 = 0 \quad (3.3)$$

ahol I_1, I_2, I_3 a feszültség tenzor skalár invariánsai:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (3.4)$$

$$I_2 = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \sigma_z & \tau_{xz} \\ \tau_{zx} & \sigma_x \end{pmatrix} \quad (3.5)$$



3.1. ábra. A feszültségállapot szemléltetése: az elemi kis kocka és a terhelő feszültségkomponensek [Rajz: Kiss A.]

$$I_3 = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad (3.6)$$

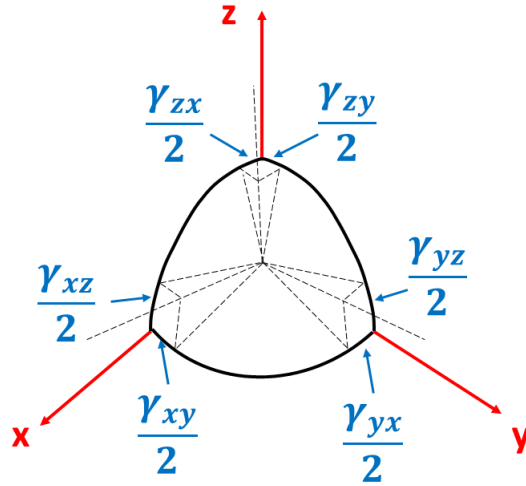
A feszültségi állapot, vagyis a terhelés következtében a szerkezeti anyag deformálódik. Ez a deformáció egy alakváltozási állapottal (lásd a 3.2 ábra) jellemezhető, melynek tenzoros leírása a következő:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \epsilon_x & 1/2 * \gamma_{xy} & 1/2 * \gamma_{xz} \\ 1/2 * \gamma_{yx} & \epsilon_y & 1/2 * \gamma_{yz} \\ 1/2 * \gamma_{zx} & 1/2 * \gamma_{zy} & \epsilon_z \end{pmatrix}, \quad (3.7)$$

ahol:

- $\mathbf{S}$: az alakváltozási tenzor,
- ϵ : az adott irányú fajlagos nyúlás,
- γ : az adott síkban történő szögváltozás,

- a fajlagos nyúlás alsó indexe az alakváltozási komponens által terhelt felület normálvektorának irányát adja meg,
- míg a szögváltozás alsó indexei azt a síkot jelölik, ahol a szögváltozás történik (lásd a 3.2 ábra).



3.2. ábra. Az alakváltozási állapot szemléltetése [Rajz: Kiss A.]

Az alakváltozási állapot és feszültségállapot közötti kapcsolatot a Hook-törvény írja le, melynek egyenletei a következők:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_1 + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \right] \quad (3.8)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_2 + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \right] \quad (3.9)$$

$$\sigma_3 = \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_3 + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \right] \quad (3.10)$$

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (3.11)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (3.12)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (3.13)$$

ahol

- ν : a Poisson-tényező (-),
- E : a rugalmassági modulus (MPa).

3.2. Törésmechanikai alapok

Griffith eredményei alapján a szerkezeteken bekövetkező törések vonatkozásában az alábbi megállapításokat tehetjük a törés folyamatára:

1. repedés keletkezése,
2. repedés terjedése,
3. törés bekövetkezése.

A repedés terjedésének kritériumához, a repedés terjedésének leírásához az energia-változásokat kell vizsgálni.

Ha a lemez csak rugalmas alakváltozást szenved, akkor minden egységnyi térfogatában:

$$\frac{1}{2}\sigma\epsilon = \frac{1}{2E}\sigma^2 \quad (3.14)$$

rugalmas energia van felhalmozva.

A teljesen ép lemezben tárolt energia a 3.3 ábra jelöléseit felhasználva:

$$W_1 = \frac{1}{2E}\sigma^2 ABL \quad (3.15)$$

Vizsgáljuk meg azt az esetet, amikor a lemezben a húzásra merőlegesen egy „2c” hosszúságú repedés van. Így a lemezben tárolt energia:

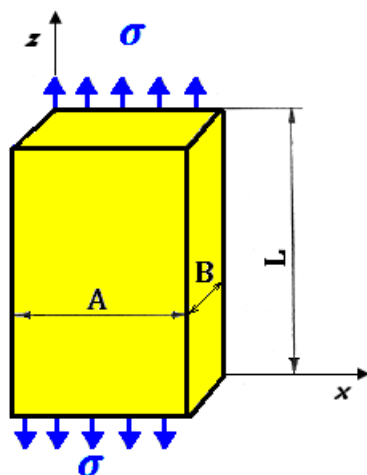
$$W_2 = \frac{1}{2E}\sigma^2 (ABL - V) \quad (3.16)$$

ahol a „V (m^3)” a repedés által a teherviselésből kivont térfogat lásd 3.4 ábra jelöléseit, amely:

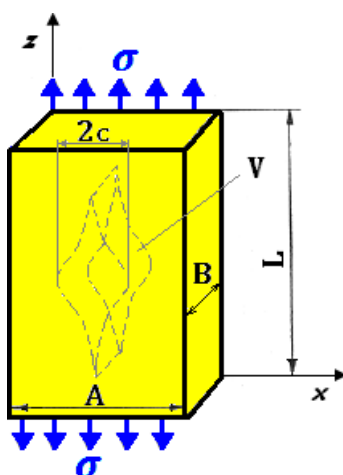
A teherviselés alól kivont térfogatot a „2c” átmérővel jellemezhető és „B” magasságú hengeres oszlop térfogatának a kétszeresével közelítettük.

$$V = 2(c^2\pi)B \quad (3.17)$$

Így a repedés következtében felszabadult energia:



3.3. ábra. A teljesen ép (repedést nem tartalmazó) anyagtömbben tárolt energia meghatározásához [Rajz: Kiss A.]



3.4. ábra. A repedést tartalmazó anyagtömb energiaviszonyainak [Czoboly] a szemléltetéséhez [Rajz: Kiss A.]

$$\Delta W_r = W_1 - W_2 = \frac{1}{2E} \sigma^2 V \quad (3.18)$$

Alkalmazva a 3.17 egyenletet a repedés következtében felszabadult energia:

$$\Delta W_r = W_1 - W_2 = \frac{\sigma^2}{E} c^2 \pi B \quad (3.19)$$

A repedés növekedése során felszabaduló energia:

$$d\Delta W_r/dc = \frac{d}{dc} \left(\frac{\sigma^2}{E} c^2 \pi B \right) = \frac{2\sigma^2}{E} c \pi B \quad (3.20)$$

$$d\Delta W_r = \frac{2\sigma^2}{E} c \pi B dc \quad (3.21)$$

A repedés felületi energiája:

$$\Delta W_\gamma = 4cB\gamma \quad (3.22)$$

A repedés felületi energiájának változása a repedés növekedése során:

$$d\Delta W_\gamma/dc = 4\gamma B \quad (3.23)$$

$$d\Delta W_\gamma = 4\gamma B dc \quad (3.24)$$

ahol: γ fajlagos felületi energia (J/m^2)

Innen adódik a repedésterjedés feltétele:

$$d\Delta W_r \geq d\Delta W_\gamma \quad (3.25)$$

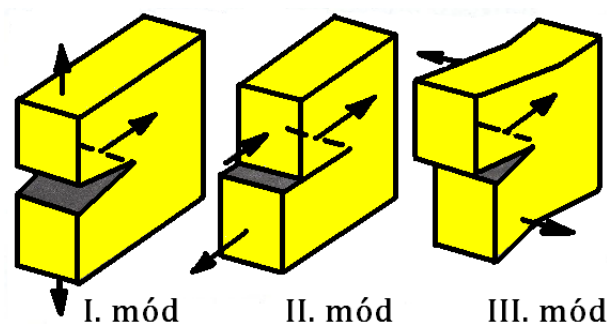
Határesetben:

$$\sigma_{kritikus} = \sqrt{\frac{2\gamma E}{c\pi}} \quad (3.26)$$

$$\sigma_{kritikus} \sqrt{c\pi} = C_{IC} \quad (3.27)$$

ahol C_{IC} a feszültségintenzitási tényező ($MPa\sqrt{m}$). A "I" jelöli a terhelési módot (lásd 3.5 ábra), amely hatására bekövetkezik a repedés, míg a C a kritikus értékre utal.

A 3.5 ábra az elemi törési módokat szemlélteti, ahol az I. mód - a szakító (vizsgálat szempontjából a leggyakoribb, mert könnyű létrehozni). A II. mód - nyíró és III. mód a tépő-csavaró (összetett igénybevétel), amit nehezebb modellezni.



3.5. ábra. Az elemi törési módok [Rajz: Gemes Gy.]

3.3. Kisciklusú fáradás

Jellemzői:

- ismétlődő (ciklikus) igénybevétel,
- 10^4 -nél kevesebb igénybevétel hatására eltörik,
- a feszültség a folyáshatár közelében, esetleg felette van,
- makroszkopikus alakváltozással kell számolni.

A repedésterjedés sebességét befolyásoló tényezők:

- a repedéshez közeli feszültségmező,
- a repedés csúcsa előtt elhelyezkedő anyag viselkedése,
- szerkezet geometriája,
- repedés alakja, mérete,
- terhelő erők nagysága és iránya,
- anyagtulajdonságok,
- a terhelés frekvenciája.

A fáradásos repedésterjedést az alábbi három módon írhatjuk le:

$$\frac{da}{dN} = c_1 a^n \quad (3.28)$$

$$\frac{da}{dN} = c_2 \sigma a^n \quad (3.29)$$

$$\frac{da}{dN} = c_3 f(K) \quad (3.30)$$

ahol:

- "a" a repedés hossza,
- "N" a ciklusszám,
- " σ " a terhelő feszültség,
- "K" a repedés csúcsa előtti anyagrészre jellemző feszültségintenzitási tényező,
- c_1, c_2, c_3, n állandók.

Az első mód esetében (3.27) a repedés terjedése a ciklusszám függvényében, a repedés-hossz hatványfüggvényeként került leírásra. Idealizált állapot, matematikailag könnyen kezelhető leírást ad, de nem veszi figyelembe az anyag tulajdonságait.

A második mód esetében (3.28) a repedés terjedését a hatványfüggvénnyel történő leírás mellett a terhelő feszültséggel súlyoztuk. Ez a leírási mód már közelebb áll a jelenség természetéhez.

A harmadik módnál (3.29) a repedés terjedését a repedéscsúcs előtt lévő anyagrészre jellemző feszültségintenzitási tényező függvényében írjuk le a jelenséget. Az így kapott függvények megoldása esetenként nehézséget jelenthet.

3.4. Ismétlő kérdések a 3. fejezet anyagához

1. Milyen főberendezésekre bonthatóak az erőművek?
2. Hogy definiáljuk egy berendezés élettartamát?
3. Hogy definiáljuk egy berendezés elhasználódását?
4. Hogyan definiáljuk az igénybevétel fogalmát?
5. Milyen fajtái vannak az igénybevételeknek?
6. Az igénybevételek az anyag károsodását idézhetik elő, melyek ezek a károsodási folyamatok?
7. Mi a feszültség tenzor jelentősége?

8. Milyen kapcsolat áll fenn a feszültség és alakváltozási állapot között?
9. Milyen fázisokból áll a törés folyamata?
10. Hogyan határozható meg a teljesen ép anyagtömbben tárolt energia?
11. Mi jellemzi a teljesen ép anyagtömb energiaviszonyait?
12. Mi a repedésterjedés feltétele?
13. Milyen elemi törési módokat ismerünk?
14. Mik a kisciklusú fáradás jellemzői?
15. Mik a kisciklusú fáradás esetében a repedésterjedés sebességét befolyásoló tényezők?
16. Milyen módon írhatjuk le a fáradásos repedésterjedést?

4. fejezet

A roncsolásos anyagvizsgálatok

A fejezetet összeállította: *Kiss Attila*

Ahogy a bevezetőben már említettük, az anyagvizsgálatok két nagy csoportra oszthatók:

- a roncsolásos anyagvizsgálatok,
- és a roncsolásmentes anyagvizsgálatok.

E két csoportot szemlélteti néhány példával az "Anyagvizsgálatok felosztása" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Anyagvizsgalatok_felosztasa_D01.swf

Atomerőművi gyakorlatban az alábbi roncsolásos és roncsolásmentes anyagvizsgálatokat használják a leggyakrabban.

Roncsolásos anyagvizsgálatok:

- metallográfia,
- nedvesanalitikai kémiai eljárások,
- szakító vizsgálat,
- nyomó vizsgálat,
- hajlító vizsgálat,
- Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat,
- fárasztóvizsgálat,

- különböző technológiai próbák (pl. hegeszthetőség, forraszthatóság).

Roncsolásmentes anyagvizsgálatok:

- szemrevételezéses,
- ultrahangos,
- radiográfiai,
- mágnesezhető poros,
- folyadékbehatolásos,
- akusztikus emissziós,
- örvényáramos vizsgálatok.

Ebben a fejezetben a roncsolásos anyagvizsgálatok néhány fajtájával ismerkedünk meg a teljesség igénye nélkül.

A roncsolásos anyagvizsgálatok esetében általában egy anyagmintát veszünk a vizsgált rendszerből és adott terhelésnek vetjük alá. Az anyagminta a vizsgálat során maradó alakváltozást szenved (roncsolódik, tönkremegy), így a vizsgált objektumot megváltoztatjuk és a vizsgálat végére más állapotba kerül, mint amilyenben a vizsgálat kezdetén volt. A maradó alakváltozás folyamata során rögzítjük azokat a paramétereket (például méretváltozás, terhelés nagysága stb.), amik az anyagminta megváltozását jellemzik és abból a különböző jellegű (például statikus vagy dinamikus időbeli lefutású, fárasztó, törésmechanikai stb.) terhelésekre méretezhető az eredeti rendszer.

A roncsolásos anyagvizsgálatok egy atomerőmű esetében döntően a tervezési és építési szakaszban használatosak, ami egy atomerőmű történetének első 10-15 éve. Miután üzembe kerül (a mai korszerű atomerőművek 60 éves üzemidővel rendelkeznek) túlnyomó részt roncsolásmentes anyagvizsgálatokkal ellenőrzik az igen drága és nem cserélhető alkatrészek (úgy mint reaktor tartály, gőzfejlesztők, primer körű vezetékek stb.) szerkezeti elemeit is. Ezért az mondható, hogy az atomerőművi alkalmazás tekintetében a roncsolásmentes vagy hibakereső eljárások vannak az alkalmazás előterében. Így, a roncsolásos anyagvizsgálatokat csak röviden, a teljesség igénye nélkül (összesen csupán négy anyagvizsgálatot), vázlatosan mutatjuk be ebben a rövid fejezetben: a statikus szilárdságtani méretezés szempontjából fontos hármát (szakítóvizsgálat, nyomóvizsgálat, hajlítóvizsgálat) és a Charpy féle ütővizsgálatot.

Elöljáróban e négy anyagvizsgálat elvét szemlélteti az "Interaktív roncsolásos anyagvizsgálatok" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Roncsolasos_anyagvizsgalatok_D01.swf

Az anyagvizsgálati módszereknek megbízhatónak (egyértelműnek és reprodukálhatónak) kell lenni. Ezt elősegíti a vizsgálatok szabványosítása. Szabvány hiányában a vizsgálati körülményeket egyértelműen meg kell adni a vizsgálatról készült dokumentumban, a jegyzőkönyvben. A mérésekről mérési (vizsgálati) jegyzőkönyvet kell készíteni, amely alapján anyagvizsgálati dokumentum készül. Az anyagvizsgálati dokumentum:

- minősíti az anyag valamely tulajdonságát a gyártó vagy felhasználó számára,
- jelzést ad a gyártási folyamat fázisainak helyességéről az anyag kiválasztása és a technológia szempontjából egyaránt,
- rögzíti a feltárt károsodást, illetve annak okát.

A jegyzőkönyvben rögzíteni kell minden olyan körülményt, adatot, amelyből egyértelműen megállapítható a próbatest azonossága, minősítése és amely alapján a mérés megismételhető.

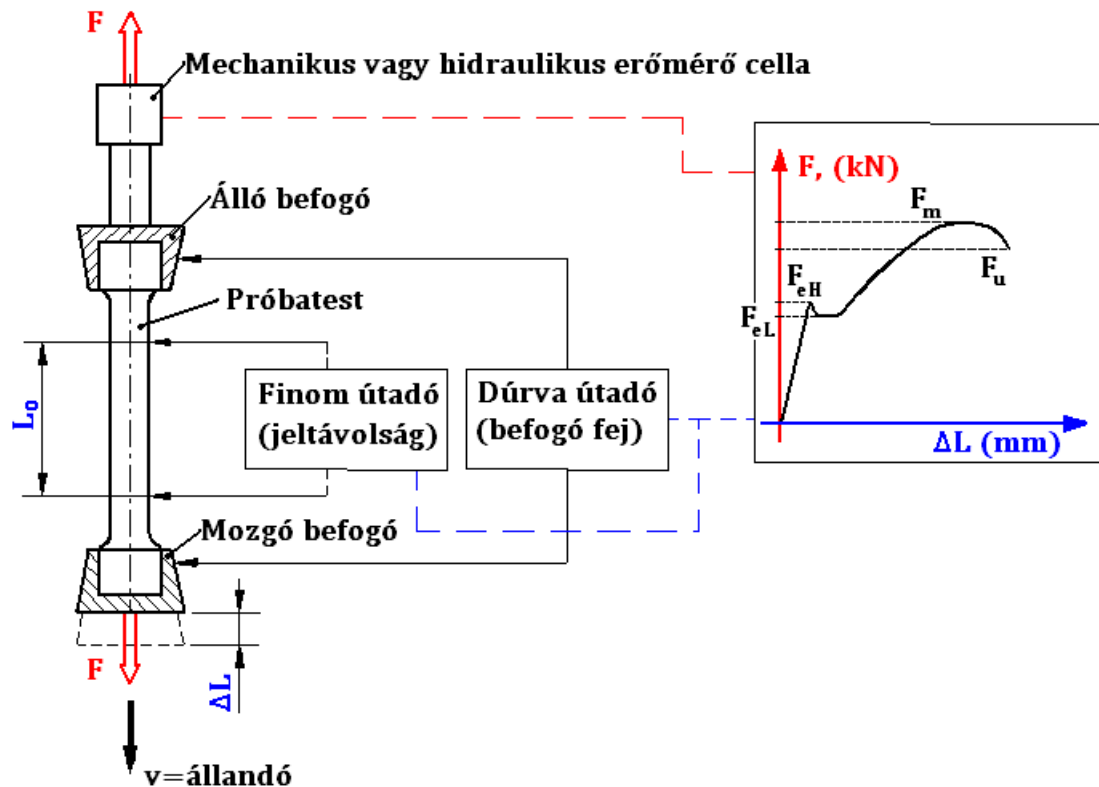
A vizsgálat eredménye nagymértékben függ a próbavétel szakszerűségétől. A vizsgálati mintát úgy kell kiválasztani és kivenni, hogy hűen reprezentálja a teljes minősíteni kívánt tételt vagy darabot. Általában szabványok vagy a műszaki dokumentáció rögzíti a próbavétel módját.

4.1. A szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat célja az anyagminta (vagy próbatest) húzó igénybevétellel szembeni ellenállásának meghatározása a szakítódiagram felvétele és kiértékelése útján. A szakítóvizsgálatot az ISO 6892-1 szabvány alapján lehet elvégezni. A szabvány meghatározza a fémes anyagok szakítóvizsgálatát, és azokat a mechanikai tulajdonságokat, melyek szobahőmérsékleten meghatározhatóak. A teszthez tartozik a próbatest szakítás hatására történő alakváltozása egészen a törésig, mellyel egy vagy több mechanikai tulajdonság is meghatározható.

A szakítóvizsgálat elve (lásd 4.1 ábrát) a következő: vegyünk egy szabványos kialakítású próbatestet, amelyet a szakítógéppel álló és mozgó pofájába befogva húzzunk meg állandó "v" sebességgel. Eközben mérjük az álló pofán jelentkező húzóerőt és a próbatest hosszváltozását. Tehát a szakítógép a próbatest összes megnyúlásának a függvényében rajzolja meg a próbatest alakításához szükséges erőt:

- a függőleges tengelyen az erőt (jele: F) N-ban vagy kN-ban,



4.1. ábra. A szakítóvizsgálat elve [Csizmazia2], [Jarfas]

- a vízszintes tengelyen pedig a jeltávolság megnyúlását (jele: ΔL) tüntetjük fel mm-ben.

A szakítóvizsgálat elvét mutatja be a "Szakítóvizsgálat" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Szakitovizsgalat_D01.swf

A szakítóvizsgálatot a gyakorlatban a "video 1 szakitovizsgalat.flv" és a "video 2 szakitovizsgalat.flv" videók mutatják be [Csizmazia2]:

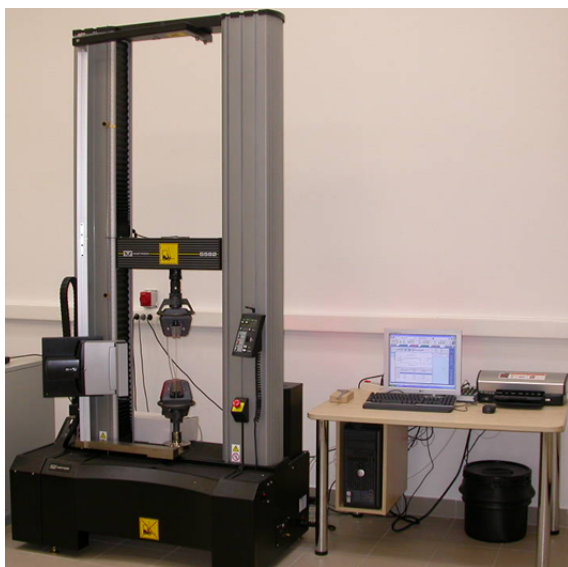
http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_1_szakitovizsgalat.flv

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_2_szakitovizsgalat.flv

A tananyaghoz tartozó videók letölthetőek a "Videók letöltése" című interaktív animáció segítségével:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Videok_letoltese_D01.swf

Egy korszerű szakítógépet a 4.2 ábrán láthatunk. Jól látható az alsó álló és felső mozgó befogópofa. A korszerű szakítógépeket számítógépekkel is összekapcsolják, így a mérés után közvetlenül szoftveres úton elvégezhető a mérés kiértékelése, az eredmény pedig ezt követően nyomtatható.



4.2. ábra. Egy korszerű szakítógép [Csizmazia2]

A szakító próbatestek méreteit szabvány írja elő, amit a 4.3 ábra szemléltet.

A 4.4 ábrán különféle típusú szakító próbatestek láthatóak terheletlen és szakítás utáni állapotban.

A szakítódiagram jellegzetes szakaszokból áll, amit a lágyacél, mint tipikusan szívós anyag példáján keresztül mutatunk be (lásd 4.5 ábra).

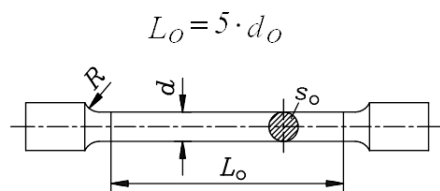
Az I. szakasz a rugalmas alakváltozás szakasza, ahol az alakváltozás és a feszültség lineáris összefüggésben van és a Hook-törvény érvényes (4.1 ábra):

$$\sigma = E * \epsilon \quad (4.1)$$

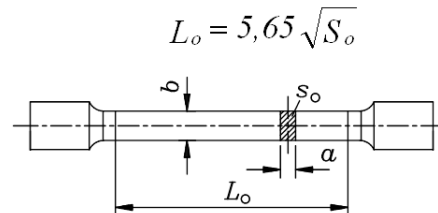
$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (4.2)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.3)$$

a., Hengeres próbatest esetén a jeltávolság:



b., Lemezes próbatest esetén a jeltávolság:



4.3. ábra. A hengeres (a) és a lemezes (b) szakító próbatestek méretei: d - az átmérő (mm), a és b - a téglalap keresztmetszet oldalhosszai (mm), s - a keresztmetszet (mm^2), L - a hossz (mm), alsó index: 0 - a terheletlen méret [Csizmazia2], [Jarfas]



Lemezszakító próbatest



Hengeres próbatest
menetes befogással

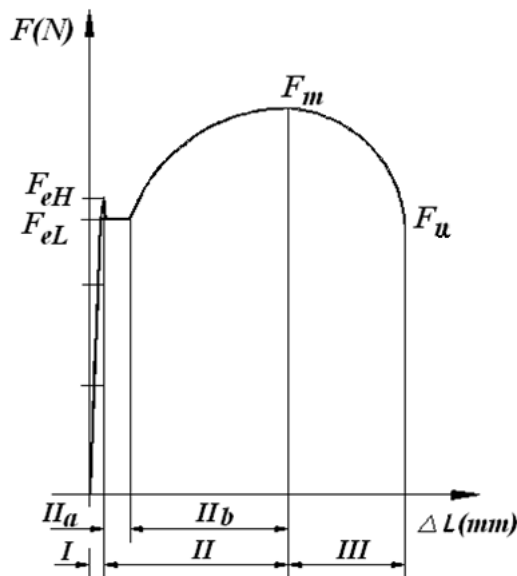


Nem szabványos
betonacél próbatest

4.4. ábra. Terheletlen és elszakított szakító próbatestek [Csizmazia2]

ahol

- σ - a mérnöki feszültség (MPa vagy N/mm^2),
- E - a Young féle rugalmassági modulus (MPa),



4.5. ábra. A lágyacél szakítódíagramja [Csizmazia2], [Jarfas]

- ϵ - a mérnöki alakváltozás (-),
- F - a terhelő húzó erő (N),
- S_0 - a terheletlen keresztmetszet felülete (mm^2),
- ΔL - a hosszváltozás, másképpen megnyúlás (mm),
- L_0 - a jeltávolság (mm).

A Young féle rugalmassági modulus gyakorlatilag az I. szakasz meredeksége a szakítódíagram feszültség – alakváltozás dimenzióba áttanszformált változatában.

A Hook-törvény érvényessége azt jelenti, hogy a próbatest alakváltozása a lineáris-rugalmas alakváltozás tartományában marad. Ez azt jelenti, hogy tehermentesítés után a próbatest visszanyeri a kiindulási (terheletlen) alakját. A szakítódíagram I. szakaszát mutatja be a "Szakítódíagram I. szakasza" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_szakitodiagram_I_D01.swf

A II.a. szakasz az úgynevezett folyási szakasz. A folyási szakasz az F_{eH} (N) - az úgynevezett felső folyáshatárhoz tartozó erőnél kezdődik, és azt jelenti, hogy a próbatest valamennyi krisztallitjában megindul a maradó alakváltozás. A felső folyáshatár jele az R_{eH} (MPa), amit az alábbi összefüggéssel számolhatunk ki (4.1 ábra):

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad (4.4)$$

A folyási szakasz egy átmeneti részrel kezdődik, ahol egy maximális erőértékről (F_{eH} (N)) lecsökken a folyás során mérhető erő. Ez a lecsökkent erőérték (F_{eL}) az alsó folyáshatárhoz (σ_{eL} (MPa)) tartozik, ami a képlékeny folyás során mért legkisebb feszültség (4.1 ábra):

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (4.5)$$

Ha ebből a folyási szakaszból tehermentesítjük a próbatestet, akkor a terheletlen állapotban is kimérhető lesz bizonyos fokú maradó alakváltozás. A szakítódiagram II.a. szakaszát mutatja be a "Szakítódiagram II. szakasza" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_szakitodiagram_II_D01.swf

A II.b. szakasz az egyenletes alakváltozás szakasza, ahol a próbatest minden keresztmetszete egyenletesen, maradó módon alakváltozik. Ebből a szakaszból való tehermentesítés után a terheletlen állapotban is jelentős maradó alakváltozás mérhető ki a jeltávolság változás meghatározásával a próbatesten. A II.b. szakasz végén mérhető ki a maximális erő (F_m (N)), amely a szakítódiagramban megjelenő legnagyobb terhelés értékét jellemzi. A maximális erőből határozható meg a szakítószilárdság (R_m (MPa)):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (4.6)$$

A szakítódiagram II.b. szakaszát mutatja be szintén a "Szakítódiagram II. szakasza" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_szakitodiagram_II_D01.swf

A III. szakasz a kontrakciós szakasz, ahol a próbatest alakváltozása egy meghatározott részre korlátozódik csupán (lásd a "Szakítóvizsgálat" című animációt és a "video 1 szakítóvizsgálat.flv" és a "video 2 szakítóvizsgálat.flv" videókat). Itt fokozatosan elvékonyodik (kontrahálódik) a keresztmetszet, majd végül elszakad a próbatest. A szakítódiagram III. szakaszát mutatja be a "Szakítódiagram III. szakasza" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_szakitodiagram_III_D01.swf

Összefoglalóan mutatja be a szakítódiagram mind a három szakaszát az "Interaktív szakítódiagram" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_szakitodiagram_D01.swf

A különböző anyagok szakítódiagramjait (lásd 4.6 ábrát) összehasonlítva osztályozhatóak az anyagok terhelés hatására mutatott viselkedésük szerint:

- A rideg anyagok (lásd a 4.6 ábra a, lemezgrafitos öntöttvas és b, edzett acél vagy kerámia részét) csak rugalmas alakváltozásra képesek, képlékenyre nem. A szakadás felülete szemcsés és merőleges az igénybevétel tengelyére. A rideg anyagok szakítódiagramját mutatja be a "Rideg anyagi viselkedés a szakítódiagramban" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_anyagi_viselkedes_rideg_D01.swf

- A szívós anyagok (lásd a 4.6 (c) ábra, amin határozott folyást nem mutató anyagok pl. réz vagy alumínium és a 4.6 (d) részt, amin a lágyacél szakítódiagramja látható) produkálják közel az összes klasszikus szakaszt a szakítódiagramnak. Így mind a lineáris-rugalmas, folyási, egyenletes alakváltozási és kontrakciós szakasz is megfigyelhető a szakítódiagramjukon. A szívós anyagok szakítódiagramját mutatja be a "Szívós anyagi viselkedés a szakítódiagramban" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_anyagi_viselkedes_szivos_D01.swf

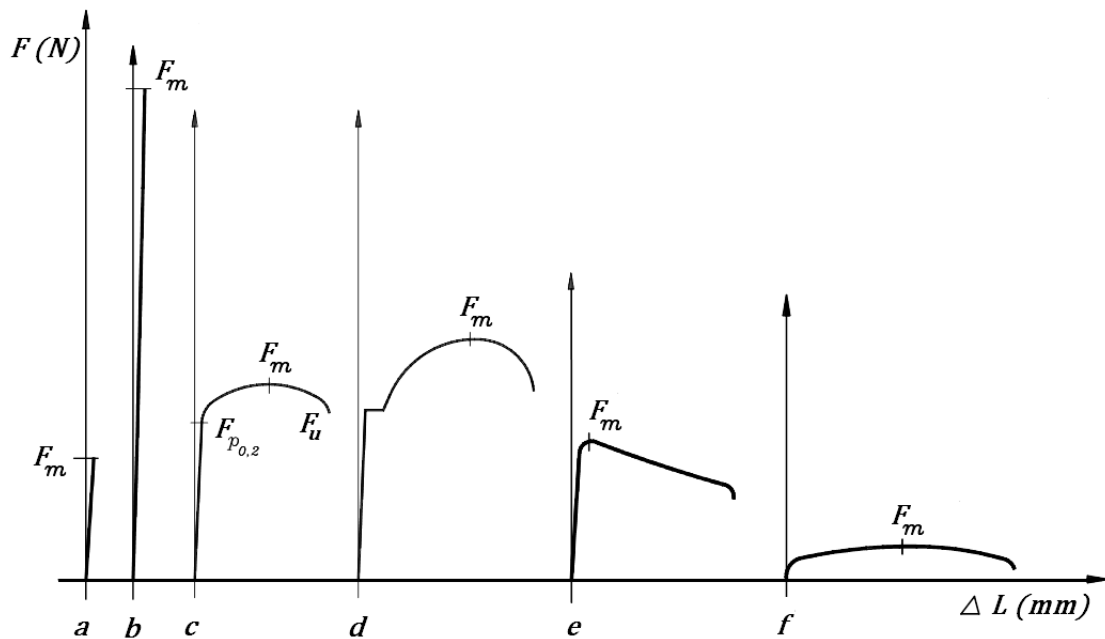
- A hidegen alakított fémek (lásd a 4.6 (e) ábra) felkeményednek: A felkeményedett anyagok, rugalmas alakváltozást követő igen rövid egyenletes alakváltozás után kontrahálnak. Lényegében nincs egyenletes alakváltozási szakaszuk.
- A képlékeny fémek (lásd a 4.6 (f) ábra) minimális rugalmas alakváltozás után képlékenyen alakváltoznak. Az f, ábrán nem keményedő, képlékeny fém pl. ólom (Pb) szakítódiagramja látható. A diagramnak szinte csak maradó alakváltozási része van. A képlékeny anyagok szakítódiagramját mutatja be a "Képlékeny anyagi viselkedés a szakítódiagramban" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_anyagi_viselkedes_keplekeny_D01.swf

Összefoglalásként egyszerre mutatja be a ridegen-, a szívósan- és a képlékenyen viselkedő anyagok szakítódiagramját az "Anyagi viselkedés az interaktív szakítódiagramban" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_anyagi_viselkedes_D01.swf

A szakítódiagram alapján kétféle rendszer szerint értelmezhetünk értékeket:



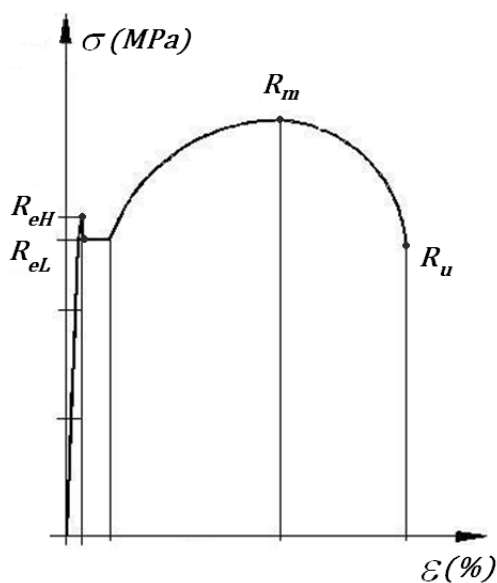
4.6. ábra. Különböző anyagok szakítódigramjai: a, lemezgrafitos öntöttvas és b, edzett acél vagy kerámia, mint példa a ridegen viselkedő anyagokra; c, határozott folyáshatárt nem mutató anyagok pl. réz vagy alumínium és d, a lágyacél szakítódigramja, mint példa a szívósan viselkedő anyagokra; e, hidegen alakított fém; f, képlékenyen viselkedő fém [Csizmazia2], [Jarfas]

- a mérnöki rendszerben, az erő és alakváltozás értékeket az eredeti, kiinduló keresztmetszet értékekhez viszonyítjuk. A mérnöki gyakorlatban ez a használatos rendszer.
- míg a valódi rendszerben a változásokat a pillanatnyi, tényleges keresztmetszet értékekhez viszonyítjuk.

Mint korábban említettük, a szakítódigramnak, mint terhelő erő - hosszváltozás diagramnak létezik egy módosított változata, ahol a vízszintes tengelyen a mérnöki alakváltozás (fajlagos nyúlás), míg a függőlegesen a mérnöki feszültség található (lásd a 4.7 ábrát). Ez azért praktikusabb, mert így könnyen leolvasható a "módosított" szakítódigramról a folyáshatár (R_{eH}), szakítószilárdság (R_m) értéke. A statikus szilárdságtani méretezés alapja pedig a szerkezeti anyagok folyáshatára (a szilárdsági számítás során kiszámolt σ_{Max} - maximális feszültségnek kisebbnek vagy egyenlőnek kell lennie a biztonsági tényezővel ($n > 1$, általában $n = 1,5 - 2$) osztott folyáshatárnál, ami a megengedett feszültség:

$$\sigma_{meg} = \frac{R_{eH}}{n} \quad (4.7)$$

A 4.7 ábra a mérnöki feszültség - mérnöki alakváltozás kapcsolatát mutató szakítódiagramot szemlélteti.



4.7. ábra. A szakítódiagram átszámított, mérnöki feszültség - mérnöki alakváltozás formája [Csizmazia2], [Jarfas]

A szakítóvizsgálattal meghatározhatók:

- szilárdsági anyagjellemzők,
- és képlékenységi anyagjellemzők vagy alakváltozási mérőszámok.

A szilárdsági mérőszámok a következők:

- a Young modulus (mértékegysége: N/mm^2 vagy MPa), amely tulajdonképpen a szakítódiagram rugalmas szakaszának a meredeksége (lásd a 4.7 ábrát):

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (4.8)$$

- a folyáshatár, amely a maradó alakváltozás kezdetét jelentő feszültség (lásd a 4.7 ábrát):

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad (4.9)$$

Mértékegysége: N/mm^2 vagy MPa. A folyáshatár valódi feszültség, fizikai tartalommal ellátott, azt jelenti, hogy ennél a feszültségnél a próbatest minden kristallitjában megindul a képlékeny alakváltozás. A folyáshatár a statikus méretezés alapja!

- a maradó alakváltozás kezdetét jelentő feszültséget abban az esetben is meg kell tudni határozni, ha nem mutatkozik kifejezett folyáshatár. Ebben az esetben megállapodás szerinti értékeket határozzunk meg. Ilyen az egyezményes folyáshatár (jele: $R_{p0,2}$ (mértékegysége N/mm^2 vagy MPa), lásd a 4.6 c ábrát), amely a 0,2%-os maradó mérnöki alakváltozáshoz tartozó erő és a kiinduló keresztmetszet hányadosa:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad (4.10)$$

- a szakítószilárdság (lásd a 4.7 ábrát) a vizsgálat során mért legnagyobb terhelő erő és az eredeti keresztmetszet hányadosa:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (4.11)$$

Mértékegysége: N/mm^2 vagy MPa.

Ahogy korábban láttuk, a próbatest a szakító vizsgálat során megnyúlik, keresztmetszete lecsökken. A szabványos alakváltozási mérőszámok a mérnöki rendszer szerinti nyúlásnak és a keresztmetszet csökkenésnek egy jól definiálható ponthoz, általában a szakadáshoz tartozó értékei.

A képlékenységi anyagjellemzők vagy alakváltozási mérőszámok a következők:

- a szakadási nyúlás vagy nyúlás:

$$A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} * 100 \quad (4.12)$$

Jele: "A". Mértékegysége: (%). Ahol az L_u (mm) a szakadáskori megnövekedett hossz, L_0 (mm) pedig a jeltávolság.

- a keresztmetszet csökkenés vagy kontrakció:

$$Z = \frac{(S_0 - S_u)}{S_0} * 100 \quad (4.13)$$

Jele: "Z". Mértékegysége: (%). Ahol az S_u (mm^2) a szakadáskori lecsökkent, kontrahált keresztmetszet.

4.1.1. A valós rendszer

Mint korábban írtuk, a valódi rendszerben a feszültségeket, alakváltozásokat a pillanatnyi, tényleges keresztmetszet értékekkel számítjuk ki. Így a valódi rendszerben a feszültséget az alábbi módon számolhatjuk ki [BME ATT]:

$$\sigma_v = \frac{F}{S}(MPa) \quad (4.14)$$

Ahol az S (mm^2) a valós (aktuális) keresztmetszet.

Az alakváltozás (a mérnöki rendszerben megszokottól eltérő jelöléssel: ϕ meghatározható [BME ATT]:

$$\phi = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{S_0}{S}(-) \quad (4.15)$$

Ahol az S_0 (mm^2) a kezdeti, terhelés előtti keresztmetszet.

A fajlagos törési munka (W_C), mint fontos szívóssági mérőszám a következő [BME ATT]:

$$W_C = \int_0^U \sigma d\epsilon. \left(\frac{J}{cm^3} \right) \quad (4.16)$$

ahol:

$$U = \epsilon_u \quad (4.17)$$

illetve a σ - a mérnöki rendszerben számolt feszültség (MPa).

$$W_C = \int_0^V \sigma_v d\phi. \left(\frac{J}{cm^3} \right) \quad (4.18)$$

ahol:

$$V = \phi_u \quad (4.19)$$

A fajlagos törési munka meghatározható egy közelítő képlettel is. A közelítő meghatározásra az alábbi képletet szokták használni [BME ATT]:

$$W_C = \frac{R_m + \sigma_u}{2} * \phi_u\left(\frac{J}{cm^3}\right) \quad (4.20)$$

Ahol az "u" alsóindex jelöli a szakadáskori értékeket.

4.2. A nyomóvizsgálat

A nyomóvizsgálat célja az anyag nyomó igénybevétellel szembeni ellenállásának meghatározása a nyomóvizsgálat elvégzése útján. Ez a vizsgálat is szabványosított. Például a szálerősítésű műanyag kompozitok kétdimenziós nyomóvizsgálatát az ISO 14126 szabvány írja le.

A nyomóvizsgálat elvét a 4.8 ábra szemlélteti: vegyünk egy szabványos kialakítású próbatestet vagy egy mintadarabot, amelyet a nyomógép két pofája között nyomunk meg állandó "v" sebességgel. Eközben mérjük a pofákon jelentkező nyomóerőt és a próbatest magasságváltozását. Tehát a nyomógép a próbatest összes megrövidülésének a függvényében rajzolja meg a próbatest által felvett erőt:

- a függőleges tengelyen az erőt (jele: F) N-ban vagy kN-ban,
- a vízszintes tengelyen pedig a megrövidülést (jele: Δh) tüntetjük fel mm-ben.

A nyomóvizsgálat elvét mutatja be a "A nyomóvizsgálat elve" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Nyomovizsgalat_D01.swf

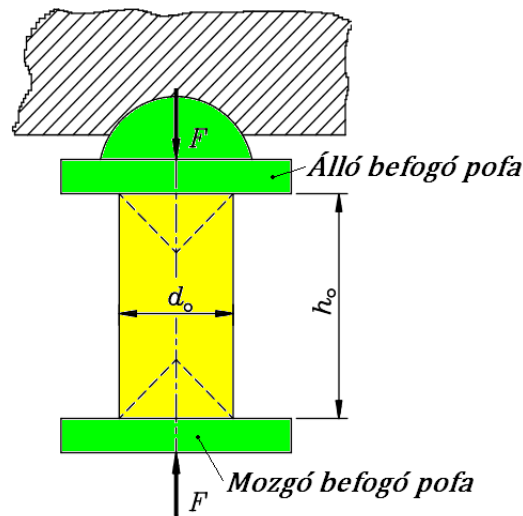
Az anyagok viselkedése nyomó igénybevétel során két fő jelleget mutathat:

- a rideg anyag (lásd a 4.9 (c) ábra) rugalmas alakváltozás után általában 45 fokos síkok mentén eltörik. Meghatározható a nyomószilárdság vagy törő szilárdság (R_v , mértékegysége: N/mm^2 vagy MPa.):

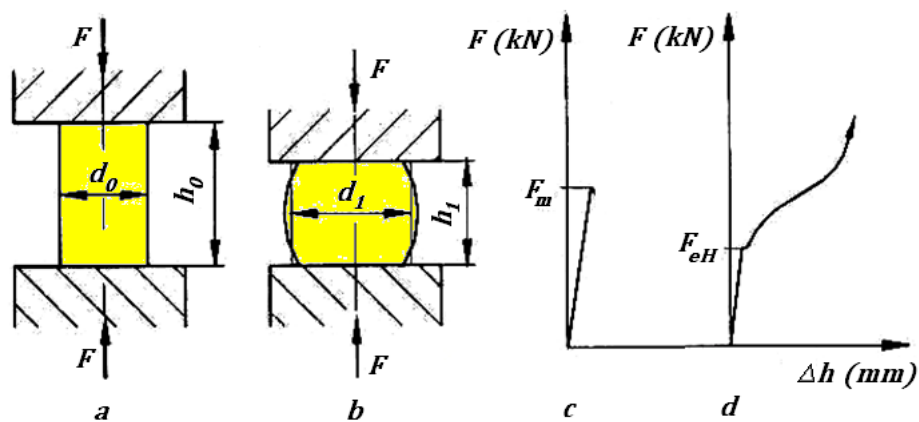
$$R_v = \frac{F_v}{S_0} \quad (4.21)$$

ahol F_v - a törés előtti nyomóerő (N).

- a szívós, és képlékeny anyagok (lásd a 4.9 (d) ábra) nyomóvizsgálat során nemcsak rugalmas, de képlékeny alakváltozást is szenvednek. A próbatest és a szerszám (álló és mozgó befogó pofák) közötti súrlódás miatt úgynevezett hordósodás figyelhető meg. Az ilyen anyagoknál bizonyos alakváltozás után felületükön repedések jelennek meg és egyértelmű törést nem mutatnak.



4.8. ábra. A nyomóvizsgálat elve egy hengeres próbatesten szemléltetve, ahol F - a terhelő nyomóerő (N), d_0 - a terhelés előtti átmérő (mm), h_0 - a terhelés előtti magasság (mm), [Csizmazia2]



4.9. ábra. Az anyagok viselkedése nyomó igénybevétel során: a, terheletlen-, b, terheelt mintadarab és méretei, c, rideg anyag-, d, szívós-képlékeny anyag nyomódiagramja, [Csizmazia2]

Mivel csak a rideg anyagok törnek a nyomóvizsgálat hatására, ezért a nyomóvizsgálatot elsősorban rideg anyagok vizsgálatára alkalmazzuk. A rideg anyagok, mint például az öntöttvas, a beton vagy a kerámiák jóval ellenállóbbak nyomó igénybevétellel szemben. Ezért olyan területen (épületek) alkalmazzák azokat, ahol a nyomás a fő terhelés

(építőanyag).

A legfontosabb szilárdsági mérőszám rideg anyagok nyomóvizsgálatánál a már korábban említett nyomószilárdság, ami a mérnöki rendszerben:

$$R_v = \frac{F_v}{S_0} \quad (4.22)$$

Mértékegysége: N/mm^2 vagy MPa.

A szívós, képlékeny anyagoknál úgynevezett zömítővizsgálatot végeznek el:

- ez zömítést (összenyomás) jelent az első repedés megjelenéséig.
- mérőszáma a zömülés nevet viseli. Jele: Z_v . Mérőszáma:

$$Z_v = \frac{(h_o - h_1)}{h_o} * 100 \quad (4.23)$$

Mértékegysége: (%).

- minél nagyobb a repedés megjelenéséig tapasztalható magasságcsökkenés, annál jobb az alakíthatóság.

A 4.10 ábra két gyakorlati példát mutat nyomóvizsgálat alkalmazására.

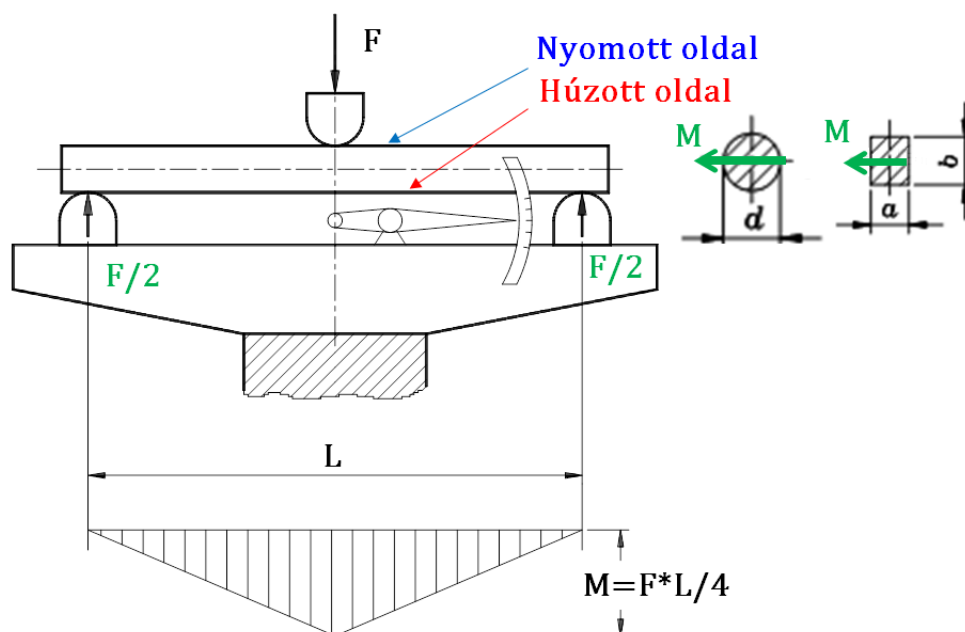


4.10. ábra. Példák a nyomóvizsgálatra: a, Kő, korrozív környezetben, b, a PET palack nyomóvizsgálata, [Csizmazia2]

4.3. A hárompontos hajlítóvizsgálat

A hárompontos hajlítóvizsgálat célja az anyag hajlító igénybevétellel szembeni ellenállásának meghatározása a hajlítóvizsgálat elvégzése útján. A vizsgálatot az MSZ EN ISO 7438:2006 szabvány alapján végzik el.

A hajlítóvizsgálat elvét a 4.11 ábra szemlélteti: vegyünk egy szabványos kialakítású próbatestet vagy egy mintadarabot, amelyet a hajlítógép két tartópontja között közepén nyomunk meg a próbatest szimmetriatengelyére merőlegesen, állandó "v" sebességgel mozgó hajlító fejjel. Eközben mérjük a pofákon jelentkező reakcióerőt ($R = F/2$) és a próbatest elhajlását.



4.11. ábra. A hajlítóvizsgálat elve, ahol az F a terhelő erő (N), M - a hajlító nyomaték (Nm), [Csizmazia2]

A hajlítóvizsgálat elvét mutatja be a "A hajlítóvizsgálat elve" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Hajlitovizsgalat_D01.swf

A terhelést adott szögig, vagy a húzott oldalon repedés megjelenéséig folytatják. A rideg anyagokat viszont tönkremenetelig terhelik.

Elsősorban rideg anyagok pl. öntöttvas teherbírásának a meghatározására használják,

mivel a szívós anyagok a terhelés során jelentős maradó alakváltozást szenvednek és ez a kiértékelést megnehezíti.

A hajlítóvizsgálattal meghatározható szilárdsági mérőszám a hajlító szilárdság:

- ennek jele: R_{mh} ,
- mértékegysége: N/mm^2 vagy MPa,
- meghatározható:

$$R_{mh} = \frac{M}{K} \quad (4.24)$$

ahol "M" a maximális hajlítónyomaték (Nm), a "K" a keresztmetszeti tényező (m^3), ami kör keresztmetszet esetén (lásd még a 4.11 ábra jobb oldalát):

$$K_{kor} = \frac{d^3 * \pi}{32} (mm^3) \quad (4.25)$$

ahol d - az átmérő (mm), négyszög keresztmetszetre (lásd még a 4.11 ábra jobb oldalát):

$$K_{negyszog} = \frac{a * b^2}{6} (mm^3) \quad (4.26)$$

- mértékegysége: N/mm^2 vagy MPa.

A szívós-képlékeny anyagok hidegalakíthatóságának vizsgálata más vizsgálati módszerek mellett a hárompontos hajlítóvizsgálattal is elvégezhető. Ilyenkor adott szögig, vagy a húzott oldalon repedés megjelenéséig terhelik a próbadarabot.

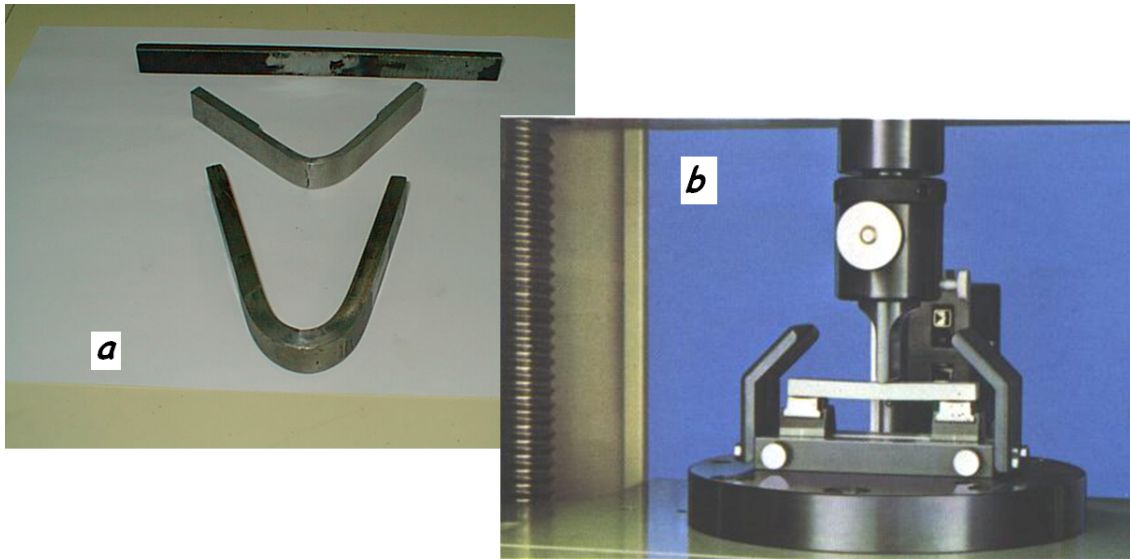
A hajlítóvizsgálat gyakorlati alkalmazásáról mutat két fényképet a 4.12 ábra.

4.4. A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat

Az olyan anyagok, mint az acélok bizonyos körülmények között ridegen törhetnek. A jelenségre, hogy az acéloknál bizonyos körülmények között nem ad elegendő biztonságot a hagyományos méretezés, katasztrófák (pl. tartályhajók kettétörése, vasúti kocsik tengelyeinek eltörése stb.) hívták fel a figyelmet.

Ezekben a katasztrófákban közös volt:

- a nagyméretű szerkezetek előzetes alakváltozás nélkül törtek,



4.12. ábra. Hajlítóvizsgálat a gyakorlatban: a, fönt egy terheletlen, alatta két elhajlított próbatest, b, hajlítóvizsgálat a gyakorlatban, [Csizmazia2]

- a terhelés jóval a statikus méretezés szerinti megengedett terhelés alatt volt,
- a repedés nagy sebességgel terjedt,
- a katasztrófák minden esetben hidegben következtek be,
- az anyagok a hagyományos vizsgálatoknak (R_{eH} , R_m , A , Z , *stb.*), a statikus méretezés alapján megfeleltek.

A megfigyelésekből leszűrhető volt, hogy a nagy méretű, hidegben üzemelő, dinamikusan igénybevett szerkezetek esetében a hagyományos méretezés nem nyújt elegendő biztonságot. Ezért szükség volt egy új vizsgálati eljárásra, ami a rideg törésre való hajlandóságot jellemzi. A rideg töréssel szembeni biztonság vizsgálata, tehát azt jelenti, hogy meghatározzuk, hogy adott anyag és szerkezet, milyen feltételek esetén fog szívósan illetve ridegen viselkedni.

A probléma több oldalról is megközelíthető:

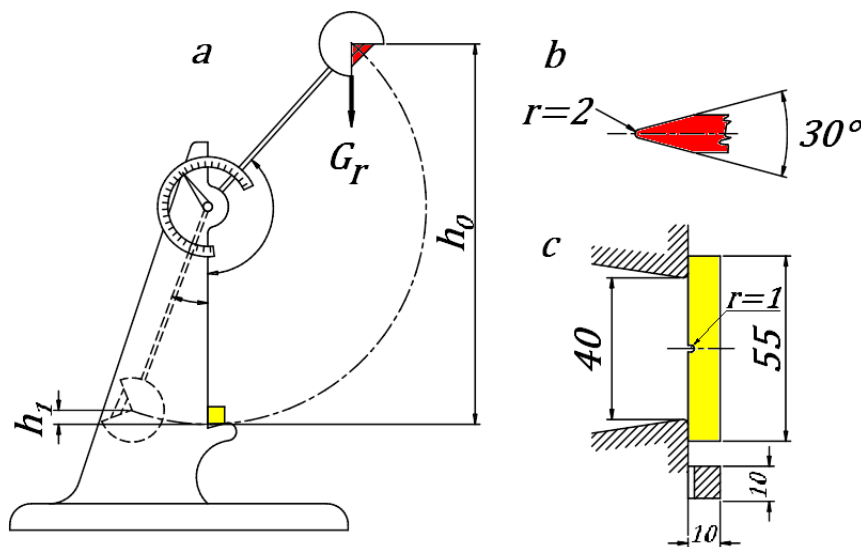
- a szívósság ellenőrzése az átmeneti hőmérséklet alapján,
- a szívósság ellenőrzése a határhőmérséklet elv alapján,
- a törésmechanika oldaláról.

A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat elve a szívósság ellenőrzésén alapszik az átmeneti hőmérséklet meghatározása útján. Az átmeneti hőmérséklet az "S" alakú ütőmunka-hőmérséklet görbe inflexiós pontjához tartozó hőmérséklet, amely alatt az anyag jellemzően rideg anyagként, míg fölötte jellemzően szívós anyagként viselkedik. Az ütőmunka-hőmérséklet görbét úgy kapjuk, hogy a Charpy féle ütvehajlító vizsgálatot elvégezzük sokszor a szabványban meghatározott hőmérséklettartományon belül adott hőmérsékleti lépésközönként, majd a hőmérséklet függvényében felrajzoljuk a kapott ütőmunka értékeket. Így megkapjuk az "S" alakú ütőmunka-hőmérséklet görbét. A szabványosított ütvehajlító vizsgálat célja az anyag dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállásának meghatározása. A dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállás: a szívósság.

A 4.13 ábra szemlélteti a Charpy féle ütvehajlító vizsgálat elvét: egy ismert súlyú ($G_r = m * g$) és kezdeti helyzetű kalapáccsal (a 4.13 (b) ábra) eltörünk egy szabványos méretű próbatestet (a 4.13 (c) ábra). A kísérlet során a próbatestben elnyelt munka az ütőmunka, amely a kalapács törés utáni- és a kezdeti helyzete alapján meghatározható. Jele: "K(U/V)". A 4.13 ábra jelölései szerint az ütőmunka:

$$K = G_r * (h_0 - h_1)(J) \quad (4.27)$$

Értéke csak a mérés kori próbatest hőmérsékleten érvényes ütőmunkát adja meg.



4.13. ábra. A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat: a, az elv, b, a kalapács-, c, az U alakú próbatest geometriája, [Csizmazia2]

A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat elvét mutatja be a "A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat elve" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Charpy_fele_utvehajlito_vizsgalat_D01.swf

A Charpy féle ütvehajlító vizsgálatot a gyakorlatban a "video 3 Charpy 1.flv" és a "video 4 Charpy 2.flv" videók mutatják be [Csizmazia2]:

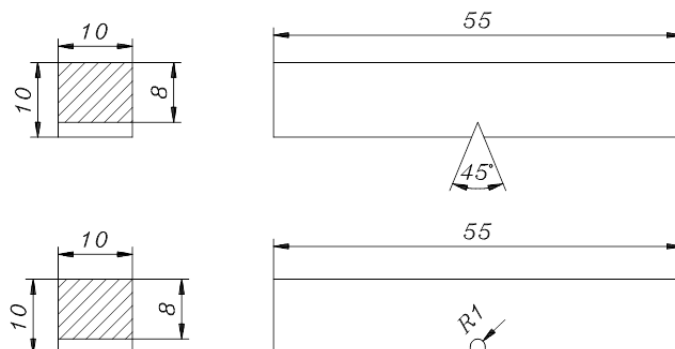
http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_3_Charpy_1.flv

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_4_Charpy_2.flv

A tananyaghoz tartozó videók letölthetők a "Videók letöltése" című interaktív animáció segítségével:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Videok_letoltese_D01.swf

A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat próbatestje 10x10x55 mm méretű és 2 mm mély szabványos V (korábban U alakú bemetszést is használtak) alakú bemetszéssel van ellátva, amit a 4.14 ábra szemléltet.

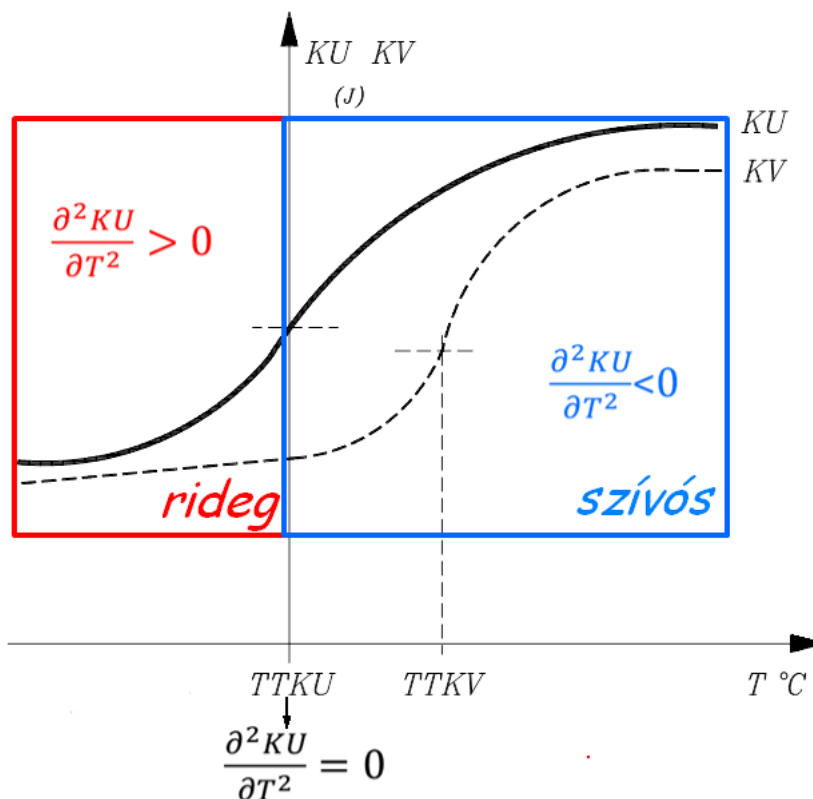


4.14. ábra. A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat szabványos V és nem szabványos U típusú próbatestének geometriája, [Csizmazia2]

Az ütőmunkát:

- V alakú bemetszéssel ellátott próbatesten KV-vel (ma már csak ez szabványos) illetve,
- U alakú bemetszéssel ellátott próbatesten KU-val jelöljük,
- és érvényes az alábbi reláció $KV < KU$, vagyis egy „V” alakú bemetszés jobban gyengíti az anyagot, mint az „U” alakú. Másképpen fogalmazva az anyagok érzékenyebbek a „V” alakú bemetszésre, mint az „U” alakúra.

A hőmérséklet függvényében felvett ütőmunka görbék lehetővé teszik a szívós és a rideg állapot közötti átmenet hőmérsékletének (TTKU, TTKV) kijelölését. Egy ilyen hőmérsékletfüggő ütőmunka diagramját mutatja a 4.15 ábra.



4.15. ábra. A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat által meghatározható ütőmunka-hőmérséklet diagram és annak jelentősége, [Csizmazia2]

Nagyszámú kísérleti eredmény alapján minimum 27 J TTKV-t szoktak előírni acél szerkezeti anyagokra.

4.5. A fejezethez tartozó videók

- A szakítóvizsgálatot a gyakorlatban a "video 1 szakitovizsgalat.flv" és a "video 2 szakitovizsgalat.flv" videók mutatják be, [Csizmazia2]:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_1_szakitovizsgalat.flv

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_2_szakitovizsgalat.flv

- A Charpy féle ütvehajlító vizsgálatot a gyakorlatban a "video 3 Charpy 1.flv" és a "video 4 Charpy 2.flv" videók mutatják be, [Csizmazia2]:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_3_Charpy_1.flv

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_4_Charpy_2.flv

4.6. A fejezethez tartozó animációk

A fejezethez tartozó animációk a következők:

- Az anyagvizsgálatok két csoportját szemlélteti az "Anyagvizsgálatok felosztása" című interaktív animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Anyagvizsgalatok_felosztasa_D01.swf

- Az ebben a fejezetben bemutatott négy anyagvizsgálat elvét szemlélteti az "Interaktív roncsolásos anyagvizsgálatok" című interaktív animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Roncsolasos_anyagvizsgalatok_D01.swf

- A szakítóvizsgálat elvét mutatja be a "Szakítóvizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Szakitovizsgalat_D01.swf

- A tananyaghoz tartozó videók letölthetők a "Videók letöltése" című interaktív animáció segítségével:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Videok_letoltese_D01.swf

- A szakítódiaagram I. szakaszát mutatja be a "Szakítódiaagram I. szakasza" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_szakitodiagram_I_D01.swf

- A szakítódiagram II.a és b. szakaszát mutatja be a "Szakítódiagram II. szakasza" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_szakitodiagram_II_D01.swf

- A szakítódiagram III. szakaszát mutatja be a "Szakítódiagram III. szakasza" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_szakitodiagram_III_D01.swf

- A szakítódiagram mind a három szakaszát mutatja be az "Interaktív szakítódiagram" című interaktív animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_szakitodiagram_D01.swf

- A rideg anyagok szakítódiagramját mutatja be a "Rideg anyagi viselkedés a szakítódiagramban" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_anyagi_viselkedes_rideg_D01.swf

- A szívós anyagok szakítódiagramját mutatja be a "Szívós anyagi viselkedés a szakítódiagramban" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_anyagi_viselkedes_szivos_D01.swf

- A képlékeny anyagok szakítódiagramját mutatja be a "Képlékeny anyagi viselkedés a szakítódiagramban" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_anyagi_viselkedes_keplekeny_D01.swf

- Összefoglalásként egyszerre mutatja be a rideg-, a szívós- és a képlékeny anyagok szakítódiagramját az "Anyagi viselkedés az interaktív szakítódiagramban" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_anyagi_viselkedes_D01.swf

- A nyomóvizsgálat elvét mutatja be a "A nyomóvizsgálat elve" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Nyomovizsgalat_D01.swf

- A hajlítóvizsgálat elvét mutatja be a "A hajlítóvizsgálat elve" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Hajlitovizsgalat_D01.swf

- A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat elvét mutatja be a "A Charpy féle ütvehajlító vizsgálat elve" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Charpy_fele_utvehajlito_vizsgalat_D01.swf

4.7. Ismétlő kérdések a 4. fejezet anyagához

1. Ismertesse az anyagvizsgálatok csoportosítását és jellemezze az egyes csoportokba tartozó anyagvizsgálatokat!
2. Mi az anyagvizsgálati dokumentum feladata és mit tartalmaz?
3. Mi a szakítóvizsgálat elve?
4. Mit minek a függvényében ábrázol egy szakítódiagram?
5. Milyen részekre osztható fel a szakítódiagram? Ismertesse az egyes részeket!
6. Milyen osztályokba sorolhatóak az anyagok a terhelés hatására mutatott viselkedésük alapján? Milyen szakítódiagrammal jellemezhetők?
7. Milyen szilárdsági jellemzők határozhatóak meg a szakítódiagram alapján? Ismertesse azokat!
8. Milyen képlékenységi jellemzők határozhatóak meg a szakítódiagram alapján? Ismertesse azokat!
9. Milyen módokon lehet átranzformálni a terhelő erő-nyúlás szakítódiagramot és az mire használható?
10. Mi a nyomóvizsgálat elve? Milyen jelleget ölthet az anyagok viselkedése nyomó terhelés hatására?
11. Milyen szilárdsági mérőszám határozható meg nyomóvizsgálat esetén?

12. Szívós, képlékeny anyagok esetén milyen nyomóvizsgálatot végeznek el és milyen mérőszám határozható meg általa?
13. Mi a hajlítóvizsgálat elve?
14. Milyen szilárdsági mérőszám határozható meg hajlítóvizsgálat esetén?
15. Miért volt szükség a Charpy féle ütvehajlító vizsgálat kidolgozására? Milyen jelenségek elkerülése céljából használjuk?
16. Mi az elve a Charpy féle ütvehajlító vizsgálatnak?
17. Hogyan határozható meg az ütőmunka?
18. Mi a jelentősége a Charpy féle ütvehajlító vizsgálat által meghatározható ütőmunka-hőmérséklet diagramnak?

5. fejezet

A roncsolásmentes anyagvizsgálatok

A fejezetet összeállította: *nagyrészt Dr. Pór Gábor Géza, Dr. Gémes György András (Akusztikus emissziós alfejezet), Kiss Attila (a bevezetés)*

Ahogy a bevezetőben már említettük, az anyagvizsgálatok két nagy csoportra oszthatók:

- a roncsolásos anyagvizsgálatok,
- és a roncsolásmentes anyagvizsgálatok csoportjára.

E két csoportot szemlélteti néhány példával az "Anyagvizsgálatok felosztása" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Anyagvizsgalatok_felosztasa_D01.swf

Az első csoportba tartozó roncsolásos anyagvizsgálatok néhány fajtájával már megismertedtünk az előző fejezetben.

Ebben a fejezetben a roncsolásmentes anyagvizsgálatok atomerőművi gyakorlatban leggyakoribb fajtáinak az elméleti háttérével ismerkedünk meg a teljesség igénye nélkül. Ezek közül négynek az elvével ismertet meg a "Interaktív animáció néhány roncsolásmentes anyagvizsgálat elvéről" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Roncsolasmentes_anyagvizsgalatok_D01.swf

A roncsolásmentes anyagvizsgálatok alatt olyan eljárásokat értünk, amely során a vizsgált objektum megtartja eredeti formáját, minőségét, és funkcióját, azaz rendeltetés-szerű használatra továbbra is alkalmas marad. Ebből azonnal következik hatalmas előnye a roncsolásos és/vagy mintavételezéssel történő anyagvizsgálatokhoz képest: a vizsgált objektumot nem változtatjuk meg semmilyen értelemben, olyan állapotban marad, amilyen a vizsgálat megkezdésekor volt. Ez akkor is jelentős előny, ha előfordul, hogy a

roncsolásmentes anyagvizsgálatra kiválasztott alkatrészt esetleg nem is építik vissza az eredeti berendezésbe. A roncsolásmentes vizsgálatok ennek megfelelően jelentős hasonlóságot mutatnak a beavatkozásmentes rendszervizsgálatokkal, amelyeket gyakran neveznek zajdiagnosztikának is. Annak során a rendszerbe történő behatás, beavatkozás nélkül a rendszerben, működés közben mérhető sztochasztikus fluktuációkból, zajokból határozzuk meg a rendszer állapotát, diagnosztizáljuk a rendszert, megállapítva, hogy egészséges állapotban van-e és megfelelő működésű, vagy esetleg eltér a normális állapottól és mi okozza az eltérést, a rendszer mely része és miben hibásodott meg.

A roncsolásmentes anyagvizsgálatoknál tehát olyan módszereket használunk, amely a vizsgált anyagot, a berendezés adott részét további használatra alkalmas állapotban tartja a vizsgálat után is. Ez nem jelenti, hogy semmiféle beavatkozás nem történik. Számos esetben szükséges pl. egyes felületek letisztítása, sőt lecsiszolása. Más esetben az anyagot átmágnesezzük és csak a mágnesezettség megszüntetése után (már amennyire ez lehetséges) tartjuk az adott anyagot az eredeti céljaira alkalmasnak (vö. mágnes poros vizsgálatok). Mivel az adott alkatrész használatra alkalmas marad, elég gyakran használják ezeket a módszereket nem csak a már korábban működött berendezés egyes alkotórészeinek állapotvizsgálatára, hanem a beszerelés előtti vizsgálatokat is előszeretettel végzik ezekkel a módszerekkel.

A roncsolásmentes anyagvizsgálatoknak igen széles köre ismert, mi a következőket fogjuk részben röviden, részben részletesebben áttekinteni, elsősorban az atomenergetikában betöltött szerepük szerint súlyozva őket:

- vizuális megfigyelés (inspekció),
- folyadékbehatolós módszerek (penetráció),
- mágneses penetrációs, mágnesporos tesztelés,
- elektromágneses vagy örvényáramos (angolul eddy current) teszt,
- ultrahangos vizsgálatok,
- akusztikus emisszió,
- Barkhausen-zaj,
- radiográfiák,
- hőterképezés,
- rezgésvizsgálatok
- egyéb akusztikus technikák.

5.1. Vizuális megfigyelés (Inspekció)

Meglepőnek tűnhet a 21. században, de minden anyagvizsgálatnak legfontosabb kezdő eleme a vizuális megfigyelés. Elsőként szemügyre vesszük a vizsgálandó tárgyat, és észrevételeinket rögzítjük. A hagyományos vizuális teszt jó szemet (kötelező az évenkénti szemorvosi vizsgálat) és igen tapasztalt rókákat feltételezett. Ők rögtön látták, hogy az objektumot leejtették (sarka benyomódott), a felület korróziója, egyenetlenségei, a felületre szemmel is láthatóan kirajzolódó minták alapján, hogy milyen volt az objektumnak az előélete. Aki ezek után azt hiszi, hogy ez csak tapasztalati dolog, az téved! Ezt lehet (sőt kell) tanulni, ebből lehet és kell vizsgázni, ami után az illető vizuális teszt (VT) 1 vagy 2 (hosszú gyakorlat után 3 fokozatot szerezhet. A nagyító (lupé) már régi eszköze a vizuális tesztelést végzőknek és a mikroszkóp is. A másik hagyományos eszköz az etalon, amivel a vizsgált anyagot összehasonlítja a vizsgálatot végző.

A vizuális teszt végzése ma forradalmian új eszközöket jelent. Olyan új eszközök jelentek meg, amelyek kiszélesítik és megsokszorozzák e hagyományos módszer alkalmazhatóságát. Először a száloptika jelentett egy forradalmi áttörést. A képtovábbító kötegek már 1980-ban elérhetőek voltak még hazánkban is (hajdani MOM gyártotta őket). Ezzel olyan üregekbe, csövekbe és nehezen hozzáférhető helyekre lehetett hozzáférni, amelyeket korábban a vizuális tesztelésbe nem lehetett bevonni. Atomerőművi szempontból ez áttörést jelentett. A gőzgenerátorok csöveinek belső felülete korábban vizsgálhatatlan volt. A száloptikával egy oldalra néző prizmával azonnal vizsgálhatóvá váltak ezek a felületek. A reaktorokban a sugárzás miatt szinte lehetetlen volt a vizuális vizsgálat. A száloptika (pl. endoszkóp vagy más néven fiberszkóp, lásd a 5.1 ábrát) ezt is lehetővé tette. Láthatóvá váltak akár az egyes fűtőelemek felületi karcolásai, vagy repedései. Mind a mai napig ez a legjobban használható technika az atomreaktorok sugárzásnak kitett területeinek vizuális vizsgálatához.



5.1. ábra. Olympus fiberszkóp [Olympus Hun web]

Tegyük hozzá, hogy van ennek egy változata, amit boroszkóp (lásd 5.2 ábrát) néven

szoktak forgalmazni. Ez is képtovábbító száloptika köteg, esetleg össze van olvasztva, de ez már gyártástechnika, az is előfordul, hogy csak egy üvegtest, vagy egy jól kialakított lencserendszer. Lényegi eltérés a képtovábbító száloptikához képest, hogy merev, nem hajlékony. Általában egyenes, és azért kapta a nevét, mert egyenes furatok vizsgálatára alkalmas. Kivitele és gyártástechnológiája miatt sokkal olcsóbb, mint a hajlékony képtovábbító köteg. Ugyanakkor sokkal strapabíróbb, mert nem megy tönkre a hajlításkor /mivel nem is hajlítható/. Legtöbbször saválló, mert míg a száloptikánál mindenféle összetartó szerkezetekre a szálak összetartására harisnyákat és más anyagokat használnak, amibe a savak olajok, ha behatolnak, tönkreteszik, addig a boroszkóp lényegében egyetlen sima üvegfelülettel rendelkezik (esetleg egy fémcsőbe húzva a törés elleni védelem céljából).



5.2. ábra. Olympus boroszkóp [Olympus Hun web 2]

Hogyan is működnek a képtovábbító kötegek (és boroszkópok)? Azt már elárultuk, hogy sok ezer optikai szál fogunk össze. Az optikai szálak olyan kb. 1 mikrométer vastagságú üvegszálak (néha műanyag szálak), amelyeket úgy állítanak elő, hogy a törésmutatójuk (az alig 1 mikrométeres!) keresztmetszetben is változzon, mégpedig jelentősen. Korai fajtájukban lényegében egy üvegcsőbe húzott (beleömlesztett) másik törésmutatójú másik üveghengert öntöttek bele. A hallgató feladata, hogy nézzen utána korábbi Optikai tanulmányaiban, hogy mikor történik teljes visszaverődés! A törésmutatók különbsége meghatározza azt a szöveget, amelyen belül teljes visszaverődés lesz a felületeken (szélesebb értelemben ez definiálja azt a szöveget, amelyen belül bejutó fény végighalad a teljes üvegszálon, anélkül, hogy valamennyi is kiszóródna belőle. Ezután nézze meg a pixel fogalmát, amelyet remélhetően jól ismer a számítógép képernyőjéről. Ha mindegyik szálát egy-egy pixelnek tekintünk, és a szálakat sorokba és oszlopokba rendezzük, akkor érthető, hogy az a fény, amely egyik szálon, mint pixel kezdetén belép, ugyanannak másik végén lép ki, tehát ha ugyanolyan sorrendbe rendezzük, akkor a pixelekből álló kép megjelenik a kimeneten. Meglepő lehet, hogy nem is olyan reménytelenül nehéz a rendezés: emlékezzen egy cérna spulnira, ahol szorosan egymás mellé tekercselik a cért számos rétegben. Elég egy ilyen hengeren lévő szálakat felvágni a hengerpalástra merőlegesen, és a vágás két végén kialakuló felületeken a szálak azonosan vannak rendezve. Valóban így készültek a 20. században a néhány méteres képtovábbító

kötegek. (A többbit nézze meg a kedves olvasó az interneten!) Sokan azt hiszik ennyiből áll az egész: képet kell továbbítani. Aki valaha tréningezett már endoszkóppal olyan helyen, ahová nem lehet belátni (üregben, vagy még inkább atomreaktorban), az hamar megtanulja, hogy a látás két részből áll: a képalkotásból és a képfelismerésből. Amit szemünk üvegteste és szemlencséje leképez, abból a csapok, pálcikák elektromos ingereket váltanak ki, és az az agyban alakul át képi fogalommá oly módon, hogy idegrendszerünk összeveti korábbi észleletekkel és megkeresi, mihez hasonlít legjobban. Ez történik itt is. Csak akkor tudjuk a képet értelmezni, ha van mihez hasonlítani. Ezért az a helyes eljárás, hogy előbb megtanuljuk, mit is akarunk látni.

Példaképpen elmondjuk, hogy ha egy atomreaktorban lévő fűtőelempálcákat akarunk megvizsgálni, akkor nem elég bejuttatni az endoszkóp végét a fűtőelempálcák közé, mert biztosítjuk az olvasót, hogy foltokat fog látni, és nem tudja, mi is az. A megvilágítás? Valaminek a tükröződése? Korrózió? A helyes módszer, ha előtte készítünk egy, a vizsgálandó rendszerhez-felülethez hasonló modellt, azon létrehozunk olyan felületeket, amelyeket fel szeretnénk ismerni. Például, ha karcolásokat akarunk vizsgálni, akkor karcolásokat, ha repedéseket, akkor repedéseket, ha korróziót, akkor ahhoz hasonlókat. Amikor agyunk megtanulta, hogy az adott geometriában hogyan ismerjük fel a felületeket, akkor kell a valódi vizsgálatokat elkezdeni. Akkor van esélyünk, hogy felismerjük azt, ami a célunk, vagy értelmezni tudjunk olyan akár váratlan jelenségeket is, amire talán nem is számítottunk. Tehát a jó képalkotás és a képfelismerés megtanulása a kulcs a helyes endoszkópiához.

A videoszkóp elsősorban nevében különbözik a hagyományosabb endoszkóphoz (fiberszkóphoz, lásd a 5.1 ábrához) képest. A videoszkóp kifejlesztését a kamerák miniaturizálása tette lehetővé, a CCD illetve CMOS Web kamera chip-ek. Ezek eleve kisméretűek voltak, és némi miniaturizálás után ma már a kamerát a vezérlőszál végére helyezik. A vezérlőszál mozgatását mindegyik variációban egy bowdenes-fémharisnyás módon oldják meg, amely lehetővé teszi, hogy a vezérlést végző irányíthassa az endoszkóp- videoszkóp végét, és ne csupán a cső, amiben előrehalad, vezesse azt. Lásd például itt: [\[Videoszkóp\]](#).

A hajlékony képtovábbító köteg széles körben került használatra a Paksi Atomerőműben és a BME Oktató Reaktorában is. Erről külön pontban szólnunk.

A vizuális tesztelés az utóbbi időben további eszközökkel gyarapodik. Míg korábban az ember a szemére és felfogóképességére, valamint szóban leírt megfigyeléseire támaszkodott, ma már fénykép és filmfelvételek garmadát lehet ontani a digitális technikának köszönhetően. Korábban a fényérzékeny filmekre történő képrögzítés nehézkes és kétes eredményű volt, ma pillanatok alatt megvan a felvétel, és ellenőrizhető, hogy rajta van-e az, amit mutatni akarunk. A zoom-olás öles léptekkel halad előre. Ma már alig 24 ezer forintért bárki vehet olyan „digitális mikroszkópot”, amely - hála a digitális technikának - akár 1-5 mikronos felbontású pixelekkal rendelkezik, azaz egészen finom rajzolatokat is képes képszerűen közvetíteni. Ezekkel kiválóan lehet törésfelületeket, de akár csiszolato-

kat is vizsgálni. Még alkalmasabbak karcolások, felületi horzsolások vizsgálatára. Nem tagadható, hogy a VT részben annak felismerésére is képes lehet, hogy milyen sérülés vagy behatolás érte a vizsgált objektumot. Ha a felületi karcolások irányát, nagyságát feltérképeztük, a benyomódásokat felderítettük, ne habozzunk rákérdezni a munkadarab előéletére. Ha valami nem egyeztethető össze a vizsgált objektum előéletével, akkor további kérdezősködés többször fényt derített már a valódi meghibásodás okára is.

A vizuális tesztelés utolsó, de igen fontos lépése a megfigyelések rögzítése, amely korábban elsősorban szavakkal való leírást jelentett, ma már túlnyomóan digitális képeket jelent. Ez azonban nem szabad, hogy elnyomja a jegyzőkönyvkészítés általános szabályait! Határozottan rögzítsük saját megfigyeléseinket! Hívjuk fel a figyelmet arra, mire következtettünk, és minek alapján jutottunk a következtetésekre. Utaljunk azokra a kiegészítő (esetleg csupán szóbeli) információkra, amelyeket kérdezősködéssel szereztünk. A mai hibás jegyzőkönyvekre tipikus példa, amikor írója úgy gondolja: ott a kép, mindenki láthatja, amit én látok, - és nem magyarázza, mit is vett észre.

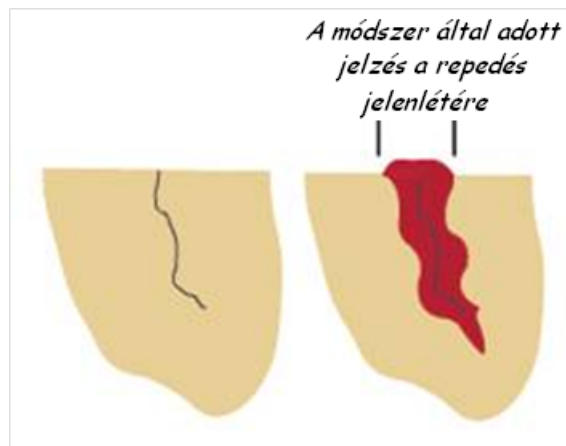
5.2. Folyadékbehatolások módszerek (penetráció)

A folyadékbehatolások módszert a hajszálrepedések észlelésére találták ki. A folyadékbehatolások módszer fizikai alapja a kapillaritás. A hallgató ismétlje át, mit is tanult a kapillaritásról! A tapadó folyadékok a felületi feszültség miatt a vékony csőben, illetve ebben az esetben az igen vékony repedésben beszívódnak, végighaladnak a fal mentén, ameddig a feszültség által definiált görbület összeér. Ráadásul a repedés esetén még a gravitációval sem kell feltétlenül megküzdeniük. Az igazi ötlet abban van, hogy a behatolt folyadékot vissza is lehet csalogatni. Ehhez megfelelő visszaszívó anyagot kell a már folyadékkal telt repedés szájához tenni, amely elindítja a folyadék kiáramlását. Itt azt a fizikai felismerést használjuk ki, hogy a kisebb sűrűségű folyadék részecskéi a nagyobb sűrűségűbe hatolnak, ha közös felületet alkotnak. Még könnyebben elképzelhetjük a folyamatot, ha száraz port szórunk a repedés szájára, amelybe a folyadék már behatolt, és akkor abba szívódik (részben) vissza a folyadék. Most már csak láthatóvá kell tennünk, amit úgy végzünk, hogy pl. a behatolás folyadék piros, míg az előhívó (esetleg por) fehér színű (az vizsgálati módszer elvét lásd a 5.3 ábrán). Aki értette, eddig miről beszélünk, az már szinte látja, hogy a fehér előhívón hajszálvékony piros vonalak vagy apró pöttyök (lásd a 5.4 ábrát) képeben kialakul a repedés rajzolat.

A folyadékbehatolások vagy penetráló folyadékos módszer elvét mutatja be a "Penetrációs vizsgálat" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Penetracios_vizsgalat_D01.swf

A módszer elég régi. Eredetileg például a behatoló folyadék egyszerű gázolaj volt, és az előhívó porózus anyag frissen oltott mésztej (1850, mozdony alkatrészek vizsgálata).



5.3. ábra. A penetrációs módszer elve felülnézetből [Rajz: Kiss A.]



5.4. ábra. Példa penetrációs folyadékos hibajelzésre egy tárcsa tövénél [NDT web]

A gázolajat ecseteléssel vitték fel a fémanyag felszínére (miután lehetőleg elég tisztára törölték), majd vártak 5-30 percet, amíg a gázolaj beszívódott a repedésekbe. Ezek után letörölték a felületet egy ronggyal, és felvitték a frissen oltott mésztejet.

Természetesen ma már kész, szórópalackban árult behatoló folyadékokat és előhívót (valamint lemosókat) lehet kapni (körülbelül az 1940-es években jelentek meg az új típusú festékeke, és 1960-ban már festékszóró is volt!). A szabvány is rendelkezésre áll (Az eljárást leíró szabvány: MSZ EN 571-1 Roncsolásmentes vizsgálatok. Folyadékbehatolási vizsgálat 1. rész: Általános alapelvek).

A vizsgálandó felületet előbb meg kell tisztítani. Mindenképpen száraznak (és le-

hetőleg porózusmentesnek kell lennie. Technológiai sorrend (a szabvány "A" melléklete szerint):

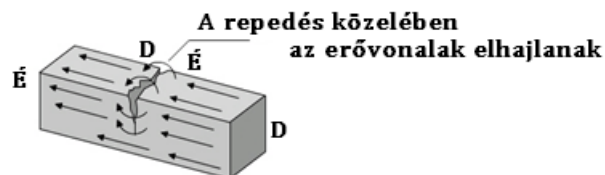
- előkészítés és előtisztítás,
- a jelzőfolyadék felvitele,
- a felesleges jelzőfolyadék eltávolítása,
- az előhívó felvitele,
- vizsgálat,
- regisztrálás,
- utólagos tisztítás.

Ha típusvizsgálatot végeznek a EN 571-2 szerint, a jelzőfolyadék és a felesleges jelzőfolyadékot eltávolító szer származzon egy gyártótól. Csak jóváhagyott termékcsaládokat szabad alkalmazni.

5.3. Mágneses repedésvizsgálat

Ez a módszer is a vasútnak köszönhető. Már 1879-ben használták az USA-ban sínek felületi hibáinak kimutatására. 1911-ben már amerikai szabványba foglalják, bár maga a mágnesporos eljárás csak 1917-ben kezd elterjedni. A Magnoflux Corp. a két világháború között az eszközök fejlesztésével és a szuszpenzió bevezetésével szélesítette a felhasználhatóságot.

A mágnesezhető anyagokban a külső mágneses tér mágneses erővonalakat indukál. Az erővonalak lényegében a homogén anyagban párhuzamosan haladnak, de ha anyagfolytonossági hiányhoz vagy sűrűsödéshez érnek, akkor kilépnek az anyagból illetve sűrűsödnek maguk is. Ez az elve a vizsgálatnak, amit a 5.5 és 5.6 ábra szemléltet.

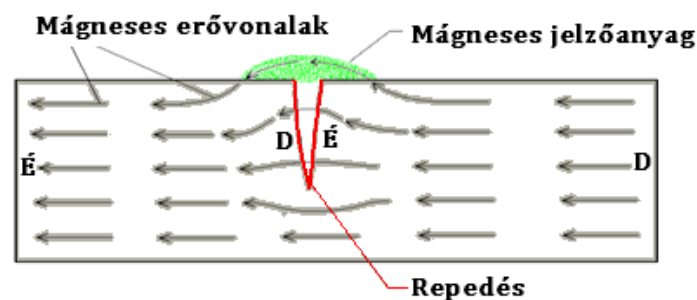


5.5. ábra. A mágneses repedésvizsgálat elve [NDT web]

A mágneses penetrációs vagy mágnesporos tesztelés elvét mutatja be a "Mágneses vizsgálat" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Magneses_vizsgalat_D01.swf

A repedésnél a mágneses erővonalak kilépnek az anyagból. Ahhoz, hogy a mágneses erővonalak erőssége a nem mágnesezhető külső térben megőrződjön, a vonalaknak sokkal nagyobb helyre van szükségük, ezért erősen kitérnek a térben a repedés helyén az anyagból.



5.6. ábra. A repedés hatása a mágneses térerővonalakra [NDT web]

Ha apró mágneses anyagot tartalmazó port vagy szuszpenziót, esetleg mágnesezhető port tartalmazó festéket viszünk fel a felületre, akkor ott, ahol az anyag intakt, tehát ahol a mágneses erővonalak az anyagon belül haladnak, ott nincs, ami odavonzza őket, tehát nem sűrűsödnek a felületen. Ellenben ahol a mágneses erővonalak kilépnek a felszínről, odavonzódnak a mágnesezhető részecskék, és megfelelően megfestve őket láthatóvá válnak a mágneses erővonalak kilépési helyei.

A mérés lépései:

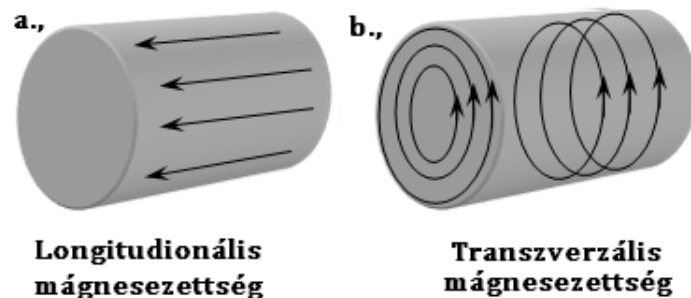
- a vizsgálandó felületek letisztítása,
- az anyag részleges vagy teljes átmágnesezése,
- a mágnesezhető anyag felvitele,
- vizuális megfigyelés és következtetések levonása,
- lemágnesezés és tisztítás.

A vizsgálandó felületek letisztítása igen fontos. Nemcsak a felviendő mágnesezhető részek tapadását hiúsíthatja meg a koszos, zsíros, olajos felület, hanem mind a mágneses

terek kiszökésére hatással lehet, mind a kirajzolódó minták felismerését teszi lehetetlenné a koszos felületen.

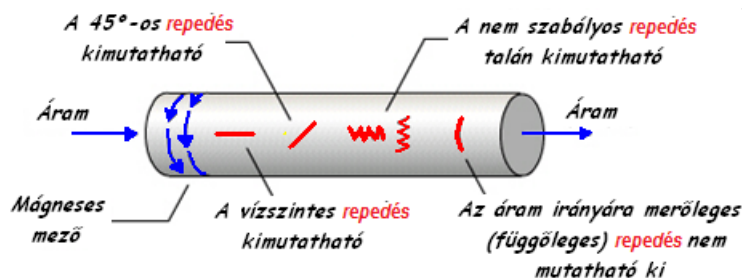
A mágnesezés különböző módon történhet: Állandó mágnessel, külső elektromágnessel. De a harmadik mód egyre terjedőben van: a fémanyagon áramot hajtunk keresztül és az áram mágneses terét használjuk fel.

A mágnesezettség lehet longitudinális és transzverzális, amit a 5.7 ábra szemléltet.



5.7. ábra. A longitudinális (a) és transzverzális (b) mágnesezettség szemléltetése [NDT web]

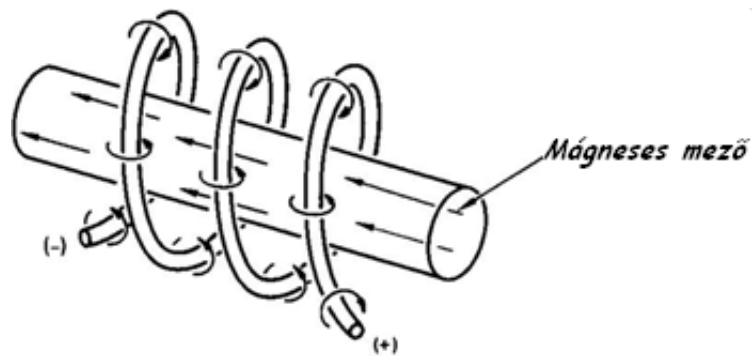
Fontos, hogy mindkét irányban megvalósítsuk a mágnesezettséget (lásd a 5.8, 5.9, 5.10 és 5.11 ábrákat), vagy legalább valamilyen szögben sikerüljön keresztirányú mágnesezettséget is létrehozni, mert a mágneses erővonalak irányával párhuzamos repedésből semmit nem észlelünk!



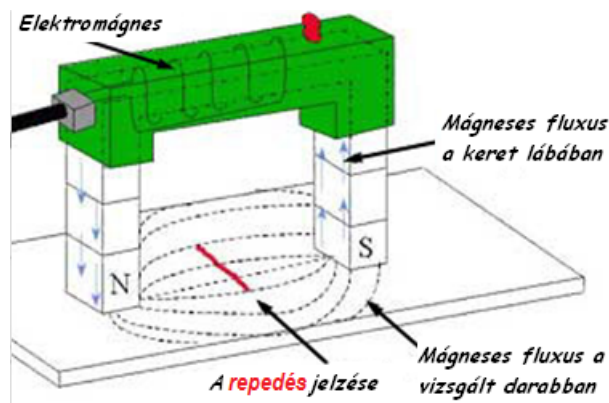
5.8. ábra. A mérés során fontos mind a longitudinális mind a transzverzális mágnesezettség [NDT web]

A longitudinális teret általában egy, a vizsgált darabot körülölelő tekercssel gerjesztik (lásd 5.9).

De külső járommal is létre tudunk ilyen hozni (lásd 5.10).

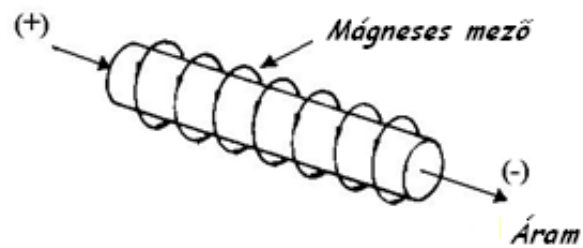


5.9. ábra. A longitudinális tér létrehozása [NDT web]



5.10. ábra. A longitudinális tér létrehozása külső járommal [NDT web]

A körkörös mágneses teret elsősorban áthaladó áram terével lehet létrehozni (lásd 5.11).



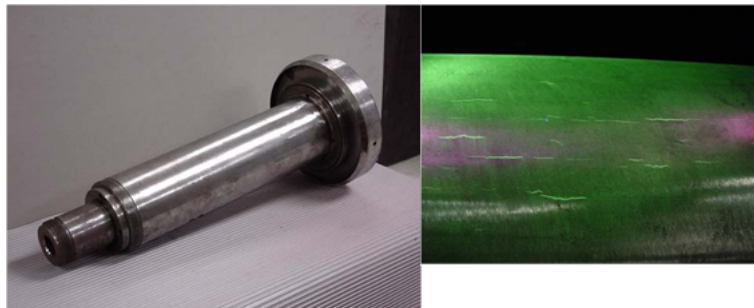
5.11. ábra. A körkörös mágneses tér létrehozása [NDT web]

A kiértékelésre használt por lehet száraz, és lehet nedves. A mágneses erővonalakra merőleges repedések, anyagegyenetlenségek a kilépő mágneses erővonalakra tapadt színes mágnesezhető porból vagy nedves festékből rajzolódnak ki. Sajnos, leginkább a tapasztalat és a képzelőerő segít felismerni az eseteket, ezért ennek a vizsgálatnak a hatékony alkalmazásához kellő gyakorlatra van szükség.

Az interneten számos képet közölnek. Aki ilyen roncsolásmentes módszerre adja a fejét, jól teszi, ha sok ilyen képet nézeget (lásd például a 5.12, 5.13, 5.14 és 5.15 ábrákat), mielőtt döntést hoz a repedésről.



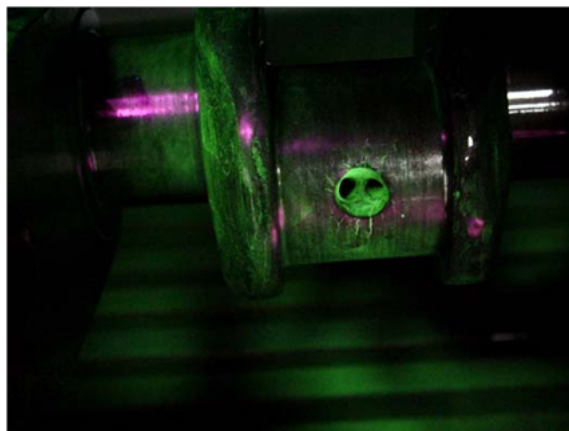
5.12. ábra. Daru horgának repedése [NDT web]



5.13. ábra. Hőkezeléssel keletkezett repedések észlelése fluoreszcens festékkal [NDT web]

Végül pedig, ne feledkezzünk meg a felmágnesezett anyag lemágnesezéséről sem! Milyen kellemetlen lesz a fogaskerék mágnesporos vizsgálata után, ha minden fémreszelék a felületére tapad, és berágódást okoz! Lemágnesezéshez leginkább változó mágneses teret lehet használni, de persze próbálkozhatunk az ellenkező irányba történő mágnesezéssel is.

A lemágnesezéskor célszerű a hiszterézisre gondolni, és fokozatosan csökkenő változó teret alkalmazni. Akkor jó a lemágnesezés, ha a maradék mágneses tér kisebb, mint a



5.14. ábra. Forgattyús tengely repedése az olajozó nyílásnál [NDT web]



5.15. ábra. Hegesztési hiba szárazporos kimutatása [NDT web]

külső térerő. De leginkább a festékpórtapadásának megszűnéséről ismerhetjük fel a jó állapotot.

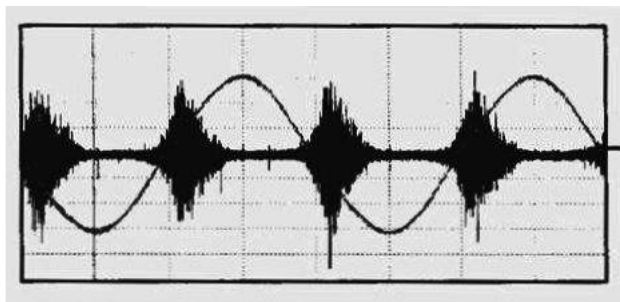
Mint a többi roncsolásmentes módszer a mágnesporos repedésvizsgálat is természetesen emberfüggő. Az ember, szakember képességei itt is 50%-ban befolyásolják az eredményt, de az emberi tényező hatása az eredményességre 4 mm-es repedésmélységnél már eléri a 80%-ot [TohtL].

5.4. A Barkhausen-zaj

A Barkhausen zajt nem szokás mindig belevenni a roncsolásmentes vizsgálatokba, mivel felhasználási területe igen korlátozott. De hibát követnénk el, ha egy atomerőművekkel kapcsolatos anyagba nem tennénk bele, hiszen az atomerőművi anyagvizsgálatok körében egyre növekvő szerepet kap. Hazánkban elsősorban az MTA Energiakutató Központjában az Atomenergia Kutató Intézetben művelik ezt a módszert a besugárzott acélminták anyagvizsgálatában.

A mágneses zajt H. Barkhausen írta le 1919-ben. Korábbi fizikai tanulmányainkból jól ismerjük, hogy az anyag átmágnesezése hiszterézissel jár (ha erre nem emlékszik, akkor ismételje át!) A hiszterézisnek egyik fő oka, hogy az anyag nem defektmentes, nem homogén, a mágnesezhető domének különböző irányban vannak belefagyva az anyagba. Ezért, amikor lassan változó mágneses térrel próbáljuk befordítani a doméneket, akkor azok nem folytonosan fordulnak be, hanem ugrásokkal. Egy ideig csak növekszik a belső feszültség, majd a domén akkora teret érez, hogy képes legyőzni a belső „súrlódást”, a szomszédos domének ellenállását, és ugrásszerűen fordul egy picit. Ezt, ha mágneses érzékelővel (egy pici tekercssel, vagy Hall szondával) érzékeljük, akkor a keletkező elektronikus zajt hallhatóvá tehetjük egy egyszerű fülhallgatóval (mint tette ezt Barkhausen), illetve ma már a jelet analóg-digitál konverzióval oszcilloszkópon, vagy számítógépen dolgozzuk fel.

A hagyományos mérés technika esetén a mintát szinuszosan változó mágneses térrel gerjesztik és egy detektor tekercsen méri a mintából kiszóródó, a Barkhausen-zajt is tartalmazó mágneses jelet.



5.16. ábra. Barkhausen zaj jelentkezése váltakozó áramú mágneses tér esetén [NDT web]

A 5.16 ábrán is jól látható, hogy az emisszió a mágneses tér hatására elsősorban a mágneses tér zérus átmeneteiben történik, a legnagyobb fluxusváltozási sebességnél, amikor az anyagban a legnagyobb deformációk történnek.

Az 1980-as évek végére az egyre pontosabb zajmérési technikák, valamint a statisztikus fizika önszervező kritikussági elméletének hatására egy teljesen új mérésmethodikai irány is kialakult. Ezeknél a méréseknél az egyedi Barkhausen-csúcsokat vizsgálják (amplitúdó, szélesség, terület) teljesen új zajfeldolgozási mérés technika alkalmazásával.

5.5. Elektromágneses vagy örvényáramos (eddy current) teszt alapjai

Az örvényáramokat az elektromágneses indukcióval lehet létrehozni vezetőkben (a jó vezető képességgel rendelkező anyagokban). Amikor váltóáramot alkalmazunk egy vezetőn, például egy rézhuzalon, akkor mágneses tér keletkezik a vezető körül. Ha egy másik vezető van az első közelében, akkor a változó mágneses tér áramot generál a második vezetőben. Az így generált örvényáramok köralakban folynak, köráramok. Az angolszász irodalomban eddy-áramoknak szokás nevezni, mivel eddy-k, azaz örvények alakulnak ki. Noha az örvényáramokat 1830-ban Foucault már demonstrálta, az első falvastagság mérést Krantz 1920-ban mutatta be. De már 1925-ben acélcsöveket vizsgáltak vele, persze csak azt, hogy egyenletes-e a válasz, ha végighúzzuk a csövön a tekercset. A második világháború után meglódult a módszer ipari használata, elsősorban Förstner és a német Reutlinger intézet jóvoltából.

Az örvényáramos vizsgálat elvét mutatja be az "Örvényáramos vizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Orvenyaramos_vizsgalat_D01.swf

Az örvényáramú vizsgálatokat számos területen alkalmazzák:

- repedésvizsgálatokban,
- anyagvastagság mérésekben,
- védőréteg (festékréteg) vastagság mérésekben,
- vezető képesség mérésekben,
- anyagfelismerésekre (azonosításra),
- hőátadás veszteség vizsgálatokban,
- benyomódás-mélység vizsgálatokban,
- hőkezelés monitorozására.

Az örvényáramos vizsgálatok előnyei közül érdemes megemlíteni:

- érzékenységét a kis repedések (felületre kimenő hibák esetén akár 0,2 mm vagy még kisebb karc is észlelhető, a felületre nem kimenő hibák közül csak a nagyobb és a felülethez közeliakat képes kimutatni) és apró más hibák esetén,
- mind a felületi, mind a felülethez közeli hibákat képes felderíteni,
- a vizsgálat azonnali eredményt ad,
- a készülékeket könnyen lehet áttelepíteni (hordozhatók, még a korai készülékek is),
- a módszert nagyon jól lehet alkalmazni a meghibásodások, egyetlenségek vizsgálataira,
- igen kevés előkészítést, előkészületet igényel,
- a tesztelő fejnek nem kell kontaktusba kerülnie a vizsgált résszel,
- képes a vizsgálatra, ha a vizsgált anyagnak igen komplikált alakja és felülete van.

Örvényáramú berendezéseknek két alaptípusa az analóg és digitális mérőműszerek, megjelenítésük szerint lehetnek digitálisak és analógok az impedanciasík és az idősík megjelenítőikkel.

A legáltalánosabb örvényáramú berendezés egy váltóáramú áramforrásból, egy ehhez kapcsolt tekercsből és egy voltméterből áll, amely képes a tekercsen eső feszültség változását megmutatni. Egy árammérő is fontos lehet, hogy az áramváltozásokat mérjük (esetleg a voltmérő helyett). Noha ennyi elég lenne az örvényáramú mérésekhez, azért valójában ennél bonyolultabb berendezésekkel szoktunk találkozni (5.17). A fejet megfelelő frekvenciával meghajtva, és az adott anyagon kiegyensúlyozva, a kiegyensúlyozott időjelben jól láthatók a repedések, vagy más egyenetlenségek okozta eltérések, amint végighúzzuk a fejet a felületen vagy közelében. De még ennél is fontosabb az Impedancia síkon való megjelenítés, amely lehetővé teszi, hogy a különböző anyagokat azonosítsuk, mivel az impedancia síkon a fej felemelése más és más irányú elmozdulást hoz létre. Különböző fejkialakításokat alkalmaznak. Fontos a fej vezetésére szolgáló kiegészítő eszközök térsége. A mai korszerű berendezések kalibráló egységekkel könnyítik meg a felhasználó munkáját.

5.6. Az ultrahangos vizsgálat alapjai

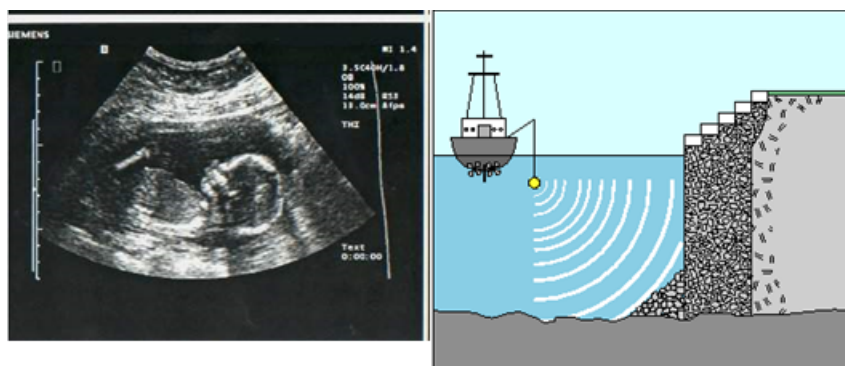
Az ultrahang alatt a 20 kHz-nél magasabb frekvenciájú hangokat értjük. A mérések során nagy intenzitású ultrahangokat alkalmaznak. Az ultrahangot az anyagvizsgálatok során



5.17. ábra. Korszerű örvényáramos mérőeszközök [NDT web]

felhasználják repedések észlelésére/értékelésére, méretek ellenőrzésére, hajók esetén víz alatti felderítésre, de létezik orvosi és harcászati felhasználása is. Kétségtelen, hogy az egyszerű visszhang elven működő eljárás a Titanic katasztrófája után vált népszerűvé, Richrdson már 1912-ben szabadalmaztatta az elvet. De ekkor még nem volt rezgőtávadó, tehát 100 Hz-es hanggal próbáltak manipulálni. Langevin 1918-ban kvarckristállyal már ultrahangot gerjeszt és tengeralattjárókat észlel.

A mai gyakorlati alkalmazások közül mutat kettőt a 5.18 ábra.



5.18. ábra. Az ultrahang korszerű alkalmazása: a, orvosi ultrahang, b, ultrahangos felderítés hajóról [NDT web]

Az ultrahangos vizsgálat elvét mutatja be az "Ultrahangos vizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Ultrahangos_vizsgalat_D01.swf

A második világháborút megelőzően a hang víz alatti küldése, és a visszaverődések által kapott jelből az elsüllyedt tárgyak megtalálása volt az a technika, amely a korai

ultrahang alkalmazásokat inspirálta. Fémekben először 1929 és 1935 között Szokolov tanulmányozta, hogy lehet felhasználni az ultrahangot. Mülhauser 1931-ben kapott szabadalmat az ultrahang használatára, de ő már nem visszavert hangokat, hanem két érzékelőt, egy adót és egy vevőt használt.

Az igazi ipari felhasználásban Krautkramer testvérek (Németország) voltak, akik szabványosították az eljárásokat, bevezették az egyenérték fogalmát, olyan fejeket és oszcilloszkópon alapuló képtechnikát vezettek be, amelyet akár középfokú végzettséggel bírók is értelmezni tudtak. Ezzel megvetették az ultrahang ipari, szabványos alkalmazásának alapjait.

Az ultrahangos vizsgálatokban leggyakrabban a longitudinális és transzverzális hullámokat alkalmazzák.

A longitudinális hullámot szemlélteti a "Longitudinális hullám" című animáció, amely a hullámmal együtt mozgó képzeletbeli részecskék mozgásán keresztül érzékelteti a hullám terjedésének jellegét:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Longitudinalis_hullam_D01.swf

A transzverzális hullámot szemlélteti a "Transzverzális hullám" című animáció, amely a hullámmal együtt mozgó képzeletbeli részecskék mozgásán keresztül érzékelteti a hullám terjedésének jellegét:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Transzverzalis_hullam_D01.swf

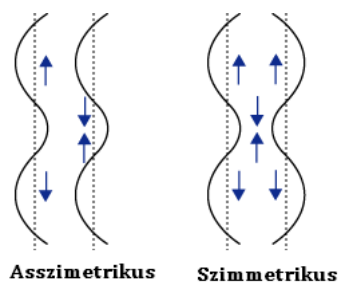
Ugyanakkor az anyag felületén és különböző anyagok határfelületein többféle komplex hullámforma létrejötte is elképzelhető. Ezek közül néhány, például a Rayleigh- és a Lamb-hullámok szintén felhasználhatók az ultrahangos vizsgálatok során. Az aszimmetrikus Lamb-hullámot gyakran nevezik hajlító hullámnak is (lásd a 5.19 ábrát), mivel a mozgás nagy része a felületre merőlegesen történik, és csak egy kis része történik a felülettel párhuzamosan. Ebben a hullámformában a lemez folyamatosan hajlik, ahogy a két felülete ugyanabban az irányban mozog.

Ismételjük meg! Az ipari gyakorlatban a longitudinális és a transzverzális hullámokra számítanak. Ezek sebessége is különböző. A visszaverődés idejéből határozzák meg a visszaverő felület távolságát. A számos verődési lehetőség, és a fent említett egyéb hullámok igen megnehezítik a visszaverődési képek értelmezését.

Az izotróp, szilárd anyagokban terjedő hanghullámok tulajdonságai közül a legfontosabbak a hullámhossz, a frekvencia és a terjedési sebesség. Összefüggésük:

$$\lambda = v/f \quad (5.1)$$

ahol



5.19. ábra. A szimmetrikus és aszimmetrikus Lamb-hullámok [NDT web]

- λ – a hullámhossz (m),
- v – a hang terjedési sebessége (m/s),
- f – pedig a frekvencia (1/s=Hz).

Az ultrahangos vizsgálatok során a nagyobb frekvenciából adódó rövidebb hullámhossz lehetővé teszi kisebb anyagfolytonossági hiányok kimutatását. Ennek megfelelően a frekvencia kiválasztása egyike az első feladatoknak, amikor az ultrahangos vizsgálatot tervezzük.

Természetesen különböző anyagokban a hang különböző sebességgel terjed. Ezt az okozza, hogy az eltérő anyagokban az atomi részecskék tömege és a köztük fellépő rugóállandók szintén eltérőek. A részecskék tömege kapcsolódik az anyag sűrűségéhez, a rugóállandó pedig az anyag rugalmassági együtthatójához. Az általános összefüggés a szilárd anyagban terjedő hang sebessége, valamint az anyag sűrűsége és a rugalmassági együtthatója között az alábbi képlettel adható meg:

$$v = \sqrt{C_{ij}/\rho} \quad (5.2)$$

Ahol v - a hangterjedés sebessége, C - a rugalmassági együttható, ρ - az anyag sűrűsége. Az egyenlet számos alakot felvehet attól függően, hogy milyen típusú (longitudinális, vagy transzverzális) hullámról van szó, illetve, hogy milyen rugalmassági együtthatót alkalmazunk. A tipikus rugalmassági együtthatók, amikkel az anyag rendelkezik: Young féle rugalmassági modulusz, E ; Poisson-szám, ν ; Bulk-modulusz, K ; Shear-modulusz, G ; Lamé-állandó, λ vagy μ .

Meg kell említeni, hogy a fenti képletben a C alsó indexében lévő ij jelölés a rugalmassági állandónak a hullám típusától és a terjedés irányától függő irányítottságát jelzi. Izotróp tulajdonságú anyagokban a rugalmassági állandó ugyanolyan értékű minden irányban, anizotróp anyagok esetében viszont akár minden irányban különböző is

lehet. Például egy hengerelt lemezben a szemcsék egy irányban megnyúltak, míg a többi irányban összepréselődtek, emiatt a hosszirányban tapasztalható rugalmassági állandó jelentősen eltér a keresztirányútól.

Néhány hozzávetőleges longitudinális hullám terjedési sebesség különböző anyagokban:

- alumínium: 6320 m/s,
- 1020 acél: 5890 m/s,
- öntöttvas: 4800 m/s.

Néhány hozzávetőleges transzverzális hullám terjedési sebesség különböző anyagokban:

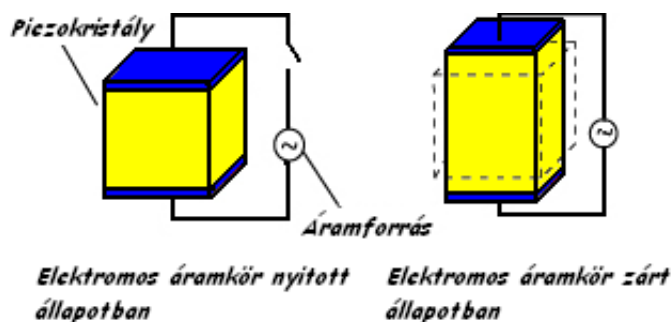
- alumínium: 3130 m/s,
- 1020 acél: 3240 m/s,
- öntöttvas: 2400 m/s.

Az ultrahangos vizsgálatok során a vizsgáló személynek döntést kell hozni az alkalmazott vizsgálófej frekvenciájáról. Mielőtt annak ismeretében, hogy a hullámhossz determinálja a felderíthető hiba méretét, abba a hibába esnénk, hogy mindig a legmagasabb frekvenciát válasszuk, gondoljunk arra, hogy nagyobb frekvencián azonos teljesítményű hangot gerjeszteni sokkal több energiát igényel, (négyzetesen növekszik az energiaigény), és ráadásul, lehet, hogy azt már nem is viseli el hanggerjesztő kristályunk, és/vagy elektronikánk egyes elemei. Ráadásul a magasabb frekvenciák az anyagokban jobban csillapodnak. Így míg egy alacsony frekvencia látótere (átvilágítási képessége akár méteres is lehet, addig az igazán nagy frekvenciák elhalnak már néhány centiméteren, még a homogén anyagban is. Ha az anyag nem homogén, akkor a szórással csillapítás még jelentősebb.

Mielőtt egy vizsgálatához vizsgálófejet és frekvenciát választunk meg kell ismerni az anyag szemcseszerkezetét (általában csiszolatot készítenek), az anyag vastagságát, a felderítendő folytonossági hiányok várható méretét, és a lehetséges helyüket. Ahogy emeljük a frekvenciát, a hang elkezd egyre jobban szóródni a nagyméretű, durva szemcsehatárokra, vagy az anyagban lévő kisméretű tökéletlenségeken. Az öntött anyagok gyakran rendelkeznek durva szemcseszerkezettel, ami miatt alacsonyabb frekvenciát kell alkalmazni az ilyen alkatrészek értékelésekor. A kovácsolt alkatrészek irányított és finom szemcseszerkezettel rendelkeznek, emiatt vizsgálhatók magasabb frekvenciás vizsgálófejekkel.

A frekvencia ezen kívül befolyásolja az ultrahangnyaláb alakját is. A hangtér nyaláboltságát, azaz a hangnyaláb széttartását a vizsgálófej tengelyétől, valamint ennek függését a hang frekvenciájától a későbbiekben fogjuk tárgyalni.

Az ultrahangos vizsgálatok alapja az elektromos impulzusok mechanikai rezgésekké alakítása, majd a visszaverődő rezgések visszaalakítása elektromos jelekké. A vizsgálófejek aktív eleme az az alkatrész, ami ezt a kétirányú energiaátalakítást képes végrehajtani. Ezt a feladatot többnyire egy elektromosan töltött részecskékből álló kristállyal oldják meg. A kristály két szemben lévő felületére elektródákat csatolnak, amikre feszültségimpulzust adnak. Ekkor a molekulák az elektromos tér hatására átrendeződnek, és megváltoztatják a kristály alakját, méretét. Ezt a jelenséget nevezzük elektrostrikciónak (lásd a 5.20 ábrát). Ezen kívül az állandóan polarizált anyagok, mint a kvarc (SiO_2) és a bárium-titanát ($BaTiO_3$) képesek elektromos mezőt létrehozni abban az esetben, ha mechanikai erő hatására megváltoztatják az alakjukat. Ezt a jelenséget nevezzük piezoelektromosságnak.



5.20. ábra. Az elektrostrikciónak elve [NDT web]

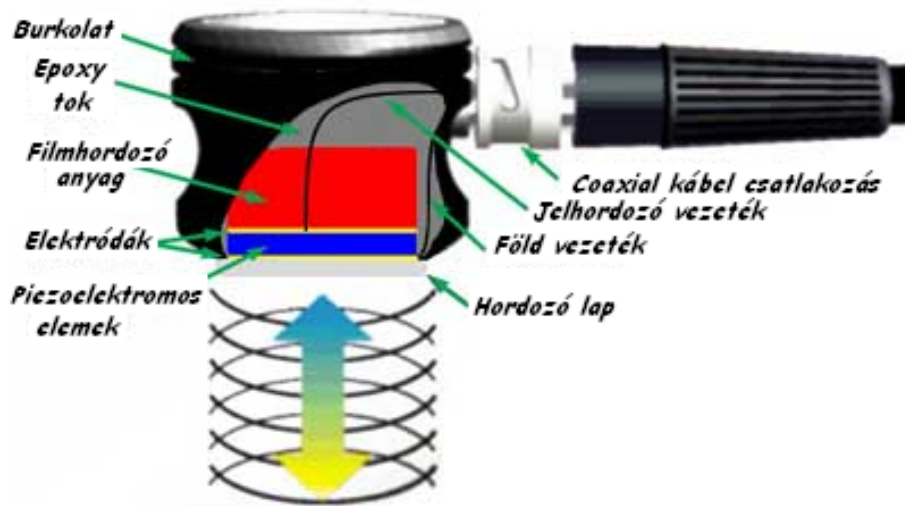
Az 1950-es években leginkább magnetostrickiós anyagokat alkalmaztak az ultrahang létrehozására, azonban a napjainkban alkalmazott vizsgálófejek aktív eleme többnyire egy piezoelektromos kerámia, amelyet többféleképpen tudnak kivágni az alapanyagból, így több hullámtípust is előállíthatunk velük. Ezen anyagok további előnye a magnetostrickiósokkal szemben, hogy alacsonyabb feszültségen működnek, és változatos alakban és méretben készíthetők el. A kezdeti piezoelektromos fejekben általában bárium-titanátot alkalmaztak, az 1960-as években viszont áttértek a cirkónium-titanát kompozit anyagokra, napjainkban pedig néhány alkalmazás esetében kezdenek elterjedni a piezoelektromos polimerek és kompozitok.

Az alkalmazott rezgőelem vastagságát a kibocsátani kívánt hanghullám frekvenciája határozza meg.

Egy vékony rezgőostya a vastagsága kétszeresének megfelelő hullámhosszal rezeg. Így minél magasabb az elérendő frekvencia, annál kisebb a hullámhossz, és annál vékonyabb

rezgőket vágnak ki. Az elsődleges oka, hogy túl nagy frekvenciás fejeket nem gyártanak, hogy a rezgőostyák túl vékonyá és törékennyé válnának.

Az 5.21 ábrán egy merőleges vizsgálófej keresztmetszeti ábráját láthatjuk.



5.21. ábra. Egy piezoelektromos vizsgálófej keresztmetszete [NDT web]

A piezoelektromos vizsgálófej elemei: rezgőlap; elektródák; jelvezeték; földvezeték-földelés; csillapító anyag; akusztikus illesztő hordozó; foglalat. Fontos a jó akusztikus illesztés.

Mivel minden határolófelület visszaverő, el kell kerülni az ultrahang fej és a vizsgált tárgy közötti rést (levegőrést), ki kell tölteni olyan csatolóanyaggal, amely minimalizálja ezt a visszaverődést. Erre különböző olajokat, zsírokat használnak, korai történelmi szakaszban (20. század végéig) elsősorban a méhviaszt használták, ma már géleket lehet vásárolni. Míg a méhviasz csak bizonyos hőfokon, a kéz melegétől olvasztva volt képlékeny, addig ma már minden hőfokra és alkalmazásra alkalmas anyagokat is kapni lehet. De sokszor igen jó lehet a tapétaragasztó is, amelyet a kívánt sűrűségűre keverhetünk, és olcsó, - csak a vasat megtámadja.

Sávszélesség alatt azon frekvenciákat értjük, amelyek felépítik a fejből kilépő hangimpulzust. A fejen feltüntetett frekvenciaérték ennek a frekvenciasávnak a középértéke. A kisebb frekvenciák (0,5-2,25 MHz) nagyobb energiát és nagyobb behatolóképesseget, míg a nagyobb frekvenciák (15-25 MHz) kisebb behatolóképesseget, de nagyobb érzékenységet jelentenek a kisméretű hibákra. A nagyfrekvenciás fejek a megfelelő készülékekkel együtt használva a hibadetektálás és falvastagságmérés pontosságának drámai növekedését hozták.

Ha egy ultrahangos szakember háta mögé állunk, akkor azt láthatjuk, hogy a fejet kézzel vezeti a csatolóanyaggal bekent felületen, és az előtte lévő oszcilloszkóp képernyőjén megjelenő csúcsokat nézegeti. Ő látja, amit mi nem: ez a csúcs attól van, a másik meg csak felesleges visszaverődés. A fejében játszódik el a kiértékelés! Atomerőművekben (és olajvezetékeken) a kézzel való fejmozgatást felváltotta a gép (a mechatronika ma már más területekre is betör). Atomerőművekben elsősorban a reaktortartály vizsgálatára fejlesztettek ki automatizált rendszereket, amelyek leginkább a hegesztési varratok környékének vizsgálatára készült. Pontosan lehet tudni, hol, és milyen visszaverődéseket keresünk, amelyek korábban nem voltak még! Ezt lehet automatizálni.

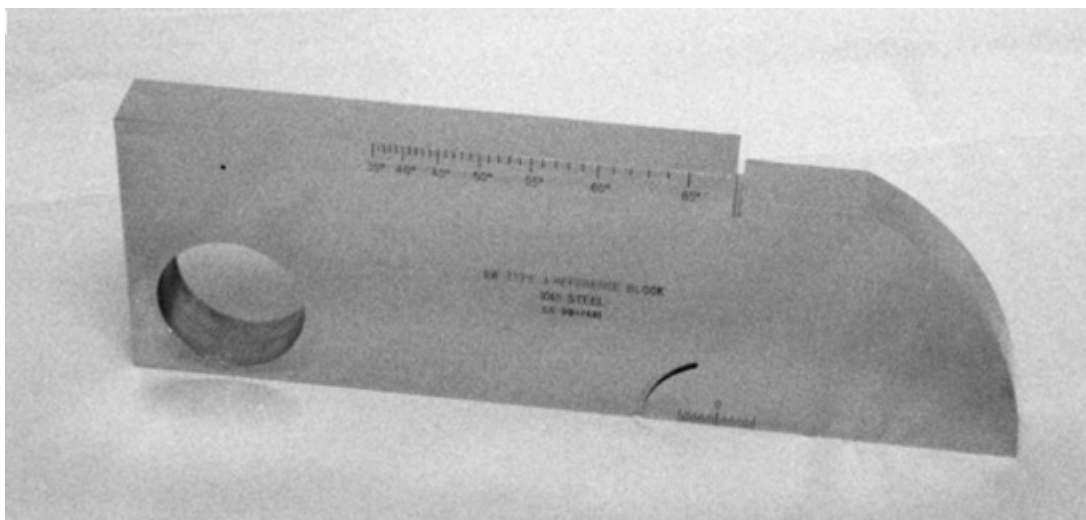
A Paksi Atomerőműben teljesen automatizált ultrahangos berendezéssel folyik a reaktortartály varratainak inspekcója (négy évenként), amit a 5.22 ábra szemléltet. A közbenső években a tartályon kívüli rövid ultrahangos ellenőrzéssel vizsgálják a falat (nem teljeskörűen).



5.22. ábra. Balra vizsgálóberendezés előkészítése Pakson ([Trampus]), míg jobbra a behelyezése a kiürített reaktor tartályba

Az ultrahangos technika nem annyira adatok közvetlen méréséből, majd továbbiakban azok kiszámítására alapul, sokkal inkább ismert helyről és ismert méretű reflektorról (reflektor alatt az ultrahangos méréstechnikában bármely olyan felületet értik, ami legalább részlegesen visszaveri az ultrahangot) származó adatokat vetjük össze az ismeretlen reflektor adataival. Ezek olyan eljárások, amelyeket a vizsgálatokat végzők a speciális tanfolyamokon ismernek meg. A hangúttávolságokat ismert hangút távolságokkal kalibráljuk, általában etalonok segítségével.

A magyarországi gyakorlatban többnyire három szabványos anyagú és szabványos kialakítású etalon terjedt el. Ezeket ET1 (lásd a 5.23 ábrát), ET2 (lásd a 5.24 ábrát) és lépcsős etalon (lásd a 5.25 ábrát) névvel jelöljük.



5.23. ábra. Az ET1 etalon [NDT web]

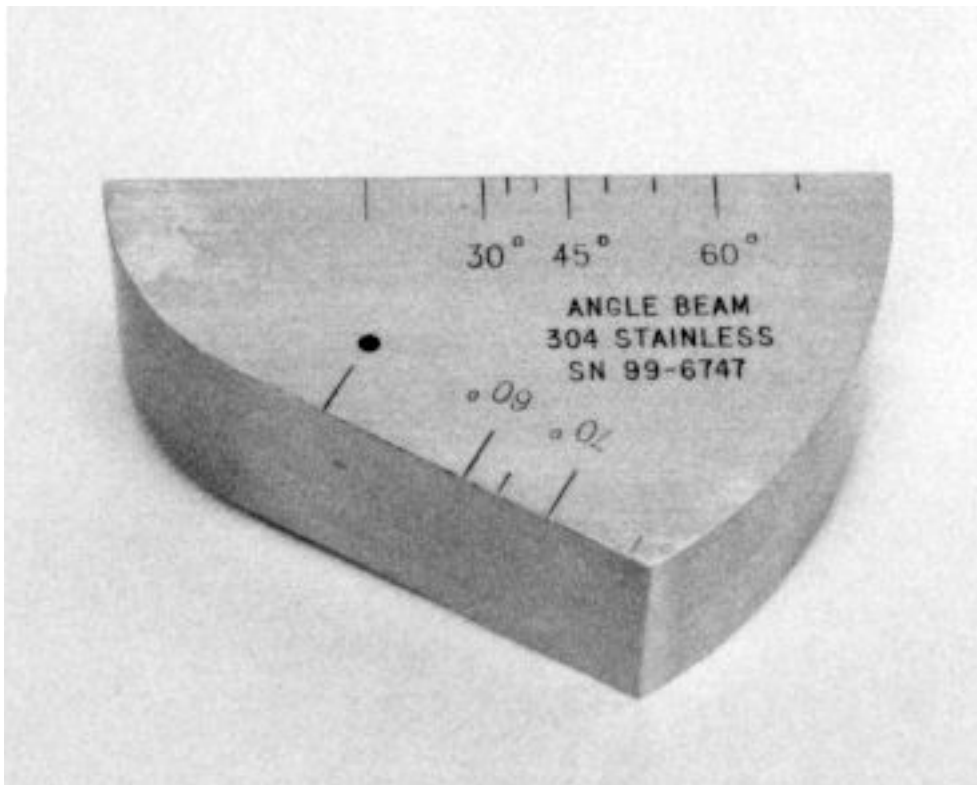
Nem térünk ki a kiértékelések lépéseire. Azt azért megjegyezzük, hogy a világon két alapvető iskola fejlődött ki a hibák méreteinek meghatározására (ami nélkül nem lehetséges a hiba veszélyességének mértékét megadni!)

Az egyik a német iskola, amelynek a Krautkramer testvérek a megalapítói. Ez elég hosszú és fáradságos munkával, lényegében tudományos alapon beméri az adott fém-anyagban a terjedési-gyengülési viszonyokat, ennek megfelelő görbesereget vesz fel (illetve készen használ ismert anyagokra). Végül a kalibráló görbesereg segítségével meghatározza az adott hiba mértékét. Igen bonyolult, de jól definiált és mindig elvégezhető.

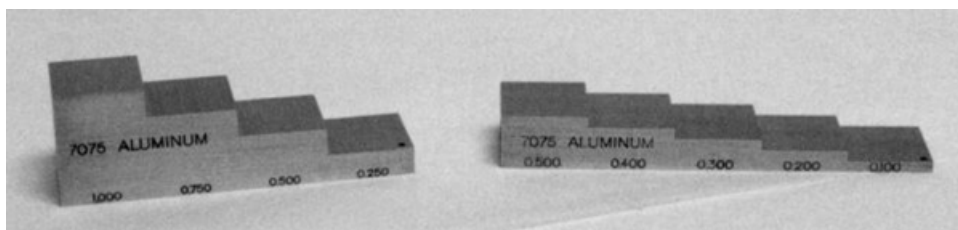
A másik iskola az amerikai. Ez sokkal egyszerűbb! Lényegében fúr egy furatot a vizsgált anyagba valahol, azt beméri, és a hiba méretét ahhoz hasonlítva a mért jelet meghatározza. Kérdés: homogén az anyag? Fúrható bele lyuk (merőlegesen a vizsgált irányra)? Ha fúrunk, akkor ez roncsolásmentes?

Hazánkba eddig lényegében a német befolyás érvényesült, a többség a Krautkramer DAC görbeseregre épülő kiértékelési technikát használta. Ma áttérés tapasztalható az amerikai ÖRG módszerre,- hiszen a Paksi Atomerőmű is úgy határozott, hogy az amerikai ASME szabvány előírásait fogja alkalmazni az európai IEC szabvány helyett!

A 5.26 ábrán kézi-, a 5.27 ábrán gépi mozgatású korszerű ultrahangos mérőeszközök láthatóak.



5.24. ábra. Az ET2 etalon [NDT web]



5.25. ábra. A lépcsős etalon [NDT web]

5.7. Az akusztikus emissziós vizsgálat az atomerőművi gyakorlatban

Ebben a fejezetben az akusztikus emissziós vizsgálati módszerrel ismerkedünk meg részletesebben.

Az akusztikus emisszió (AE) alapgondolatát már édesanyánktól is hallottuk, amikor



5.26. ábra. Bal oldalon: Olympus Epoch LTC könnyű, kézi mérőeszköz; jobb oldalon: Olympus Epoch 1000 típusú, drága, de fázisvezérelt, beépített intelligenciákkal, és a fejek kalibrációs görbéivel rendelkező mérőeszköz [[Olympus web](#)]



5.27. ábra. Bal oldalon: Félautomata letapogatás Omniscan-nel, főleg a kézi mozgatósi hibák kiküszöbölésére; jobb oldalon: ez az automata ultrahangos letapogató rendszer végigmegy az épülő olajvezetéseken [[NDT web](#)]

gyermekkorunkban a fákra másztunk: „Recseg az ág! Fiam gyere le, mert el fog törni!” A fában (és a mai korszerű szálak műanyagokban, kompozitokban) hosszú szálak szövénye biztosítja a szakító szilárdságot, és ugyanúgy jönnek létre az akusztikus emissziós események, mint a fa rostjaiban. Szép számmal vannak olyan tudományos és szakmai cikkek, amelyek faanyagokban, kompozitokban vizsgálják és hasznosítják az akusztikus emissziót. Mi inkább a fémekkel foglalkozunk, mert atomerőművekben azok fordulnak

elő gyakrabban, bár az iparban a repülőgépipar, amely az elmúlt évtizedekben az akusztikus emisszió egyik legnagyobb felhasználója volt éppen áttérőben van a fémszárnyakról a polimer erősítésű szárnyakra.

A fémekben a feszültségek által kiváltott diszlokációk, a repedések terjedése az akusztikus emisszió elsődleges oka, de ma már tudjuk, hogy a kristályképződések, vagy a fázisátalakulások, az acél különböző kristálytani módosulatai közötti átalakulásokkor fellépő belső feszültségek is képesek akusztikus emisszióra. A repedésterjedést a legkönnyebb megérteni józan paraszti ésszel, hiszen elég csak egy szövött anyagot széttépünk, és halljuk a jellegzetes szálszakadások hangját. Minél sűrűbb a szövet, és minél gyorsabb a repedésterjedés, annál magasabb hangot hallunk. Nos, az anyag szövetszerkezete még sűrűbb, ezért rögtön értjük, miért az ultrahangok tartományában várjuk és regisztráljuk az ilyen akusztikus emissziós eseményeket.

A fémekben a terhelés hatására növekvő energia szabadul fel, és indukálja az akusztikus hullámokat, amikor egy-egy egymásnak feszülő szemcse vagy kiálló sarka letörik vagy amikor egy kristálytani szerkezetben meglévő repedés továbbfejlődik, valamint amikor a feszültség hatására a diszlokációk elmozdulnak, áttevődnek, akkor akusztikus hullámok gerjesztődnek. Ezek megfigyelése alapján következtethetünk az anyag tulajdonságainak változására, szilárdságának gyengülésére. Szűcs Pál (1993) kiváló történeti áttekintéséből (és az Enciklopédia Britannica-ból) azt is tudjuk, hogy akusztikus emissziót a kiegészített agyagedények hűlés közbeni pattogásának megfigyelésére már 6500 évvel ezelőtt is használták a termék minősítésére. A fémkohászatban az ónzörej volt az, amit korán, már i.e. 2500 előtt is használtak. Az ón $+13,2^{\circ}\text{C}$ és $+161^{\circ}\text{C}$ között létező tetragonális változata, a fehérón a képlékeny deformáció hatására létrejövő ikresedés során hallható hangokat bocsát ki. 1916-ban J. Csohralszkij kapcsolatot talált az ón és cink-zörej valamint az ikresedés között. 1923-ban A.M. Pertevin és F. Le Chatelier Al-Cu-Mg ötvözetek nyújtásakor a Lüders-vonalak megjelenésével párhuzamosan "rövid éles hangokat" hallott.

Olyan akusztikus emissziós tankönyv vagy áttekintés, amely ne emlékezne meg J. Kaiser érdemeiről az akusztikus emisszió újbóli felfedezésében és széleskörű elterjesztésében, nem is létezik. Nevét viseli az akusztikus emissziós vizsgálatok során jól megfigyelhető Kaiser-effektus, amely szerint, ha az anyagot már terhelés érte, akkor újabb terheléskor csak akkor bocsát ki újra akusztikus emissziós eseményeket (hangot), ha a terhelés meghaladja a korábbi. Kaiser 1949-50-ben végzett müncheni kísérletei (PhD disszertációja) után az események felgyorsultak. Már a 60-as években az elektrotechnika lehetővé tette olyan ipari mérőműszerek megalkotását, amelyeket ipari alkalmazásra lehetett használni, nevezetesen nyomás és terhelés alatt működő berendezések állapotjelzésére, vizsgálatára kezdték használni az akusztikus emisszió módszert. Ez annyira elterjedt, és az akusztikus emissziós anyagvizsgálati kurzusokon annyira ezt oktatják, hogy sokan már azt sem tudják, hogy Kaiser eredetileg a kísérleteit szakítógépen végezte. Célja az anyagok minősítése, szövetszerkezetének vizsgálata volt, és nem a szerkezetek vagy tartályok minősítése.

Az akusztikus emissziós konferenciákon és az anyagvizsgálatokban egyértelműen a diszlokációk mozgását, a repedésterjedést, a fázisátalakulásokat és az anyagon belüli belső súrlódásokat szokás az akusztikus emisszió okaként felsorolni, és ezeket vizsgálni. De használatát elsősorban a tartályok, a szerkezetek öregedésének és meglévő anyaghibáinak lokalizálására, korróziós gyengüléseire használják fel. Az anyagszerkezeti vizsgálatok lényegében háttérbe szorultak. Annyira csak ezekre, a szerkezeti vizsgálatokra figyelünk, talán el is sikkad, amikor üdítő kivételként megjelenik például az Anyagvizsgálók Lapjában Kindlein Melinda, Fodor Olivér (2010) cikke, amelyben szakítógépen és hajlítógépen vizsgálták az anyag szerkezetével összefüggő akusztikus emissziós eseményeket.

Az elmúlt évtized forradalmian új eredményei nyomán a számítástechnika területén most újabb lehetőségek nyílnak meg az akusztikus emisszió használatában. Amíg az évtizedekkel ezelőtt megalkotott és azóta is használt defektoszkóp és Sensophone jellegű készülékek elsősorban az akusztikus emissziós beütések számát, azok hosszát, felfutási idejét és az ebből származó statisztikákat, valamint a késleltetési időket tudták csak rögzíteni, most rövidesen képesek leszünk (vagy már vagyunk) az események időjeleinek rögzítésére, azok spektrális feldolgozására, és ami legalább ilyen fontos, korszerű információtechnológiai osztályozására és elemzésére.

Azt is hozzá kell tennünk, hogy az elmúlt majdnem 17 év alatt nem sokat haladt a módszer elméleti alapjainak fejlesztése, annál inkább az alkalmazása. A számítástechnika fejlődésével egyre több cég állított elő először mérőműszereket, majd az esemény azonosítását szolgáló szoftvereket.

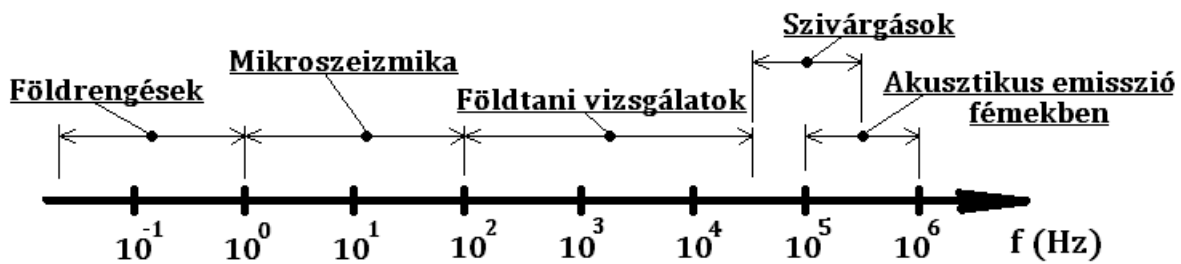
A 90-es évek és e század első 5 éve elsősorban technikai fejlődést hozott. Az utóbbi időkben ezeknek a fejlett műszereknek a különböző típusa jött létre.

5.7.1. Az akusztikus emisszió keletkezése:

Akusztikus emisszióról a szilárd testben tárolt energia felszabadulása közben keletkező és terjedő mechanikai hullám esetében beszélünk. Tehát ha a szilárd anyagban tárolt energia valamilyen külső vagy belső hatás következtében felszabadul, az adott anyagban a keletkező mechanikai hullám (hang) alkalmas eszközzel észlelhető. Ilyen jelenséggel nem csak a fémek esetében lehet találkozni, hanem pl. geológiai megfigyelések során is.

5.7.2. Az akusztikus emissziós spektrum

A fent látható igen széles spektrumból a 100 kHz és 1 MHz közötti tartományt szokás klasszikus értelemben az akusztikus emisszió területének tekinteni fémek esetében.



5.28. ábra. Akusztikus frekvenciaspektrum [Pellionisz] [Rajz: Kiss A.]

5.7.3. Az akusztikus emissziós jelforrások osztályozása

Fontos kérdés, hogy milyen folyamatok járnak akusztikus aktivitással az anyagban. Az akusztikus emisszió jelenségét definiálhatjuk, mint a szilárdtestben tárolt energia felszabadulása közben keletkező rugalmas hullámcsomagot.

Ha az akusztikus emisszióról mint roncsolásmentes diagnosztikai eljárásról beszélünk, akkor figyelmünk az ún. makroszkopikus források felé fordul.

Ilyen makroszkopikus forrás például:

- a törés,
- a képlékeny-zóna növekedés a repedés terjedése nélkül,
- a repedéskeletkezés és -növekedés.

Ha tevékenységünket az anyagszerkezet-kutatás körében végezzük, akkor figyelmünket az úgynevezett mikroszkopikus források felé kell fordítani.

Ezek a mikroszkopikus források lehetnek:

- diszlokáció-keletkezés, vándorlás,
- kiválások létrejötte,
- fázis átalakulások.

Az egyes akusztikus emissziós jelforrások más és más nagyságú jelet bocsátanak ki. Erre ad példát a fémiparból az alábbi felsorolás:

- diszlokációváltozás: 10-20 dB,
- zárványelválás: 30-50 dB,
- zárványtörés: 50-70 dB,

- szemcsehatár-repedés: 60-80 dB,
- repedésterjedés: 80-100 dB,
- törés: 100-120 dB.

A jelforrások csoportjában kell megemlítenünk a következő jelenségeket, bár nem tartoznak klasszikus értelemben az akusztikus emisszió tárgykörébe, hiszen a hang forrása nem az anyag, azonban az általuk generált hangjelenségeket az akusztikus emisszió apparátusával tudjuk vizsgálni.

Ilyenek:

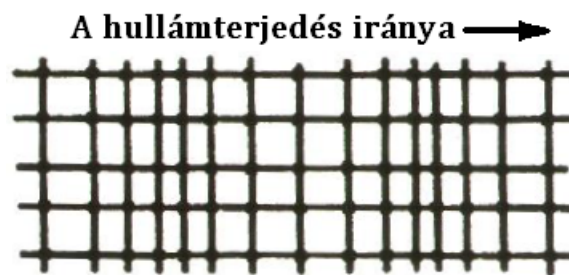
- súrlódás (5.29), dörzsölés,
- elektromos kisülés,
- szivárgás,
- elszabadult tárgyak felütődése,
- áramlással összefüggő jelenségek (pl.: kavitáció).



5.29. ábra. A súrlódás az anyagon belül is akusztikus eseményt kelt [\[NDT web\]](#)

5.7.4. Az akusztikus emisszió mint mechanikai hullám

Általánosságban elmondható, hogy az akusztikus hullámok az anyag belsejében longitudinális és/vagy transzverzális formában terjednek.



5.30. ábra. A longitudinális hullám szemléltetése [Pellionisz] [Rajz: Kiss A.]

Longitudinális hullám:

A közeg elemei csak a terjedés irányában mozdulnak el/végeznek hullámmozgást.

A longitudinális hullámot szemlélteti a "Longitudinális hullám" című animáció, amely a hullámmal együtt mozgó képzeletbeli részecskék mozgásán keresztül érzékelteti a hullám terjedésének jellegét:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Longitudinalis_hullam_D01.swf

A longitudinális hullám terjedési sebessége:

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (5.3)$$

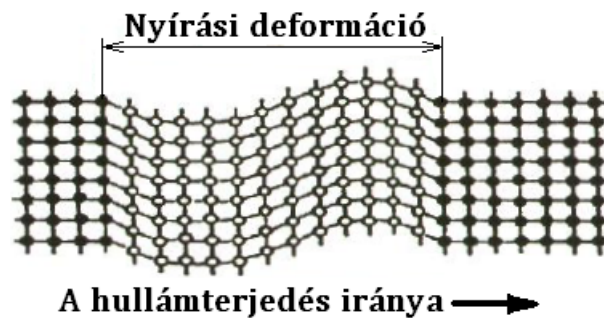
ahol:

- E - a rugalmassági modulus (MPa),
- ρ - a sűrűség (kg/m^3),
- G - a csúsztató rugalmassági modulus (MPa),
- μ - a Poisson-szám (-).

Transzverzális hullám:

A közeg elemei a terjedés irányára merőlegesen is elmozdulnak/végeznek hullámmozgást.

A transzverzális hullámot szemlélteti a "Transzverzális hullám" című animáció, amely a hullámmal együtt mozgó képzeletbeli részecskék mozgásán keresztül érzékelteti a hullám terjedésének jellegét:



5.31. ábra. A transzverzális hullám szemléltetése [Pellionisz] [Rajz: Kiss A.]

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Transzverzalis_hullam_D01.swf

A transzverzális hullám terjedési sebessége:

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (5.4)$$

ahol:

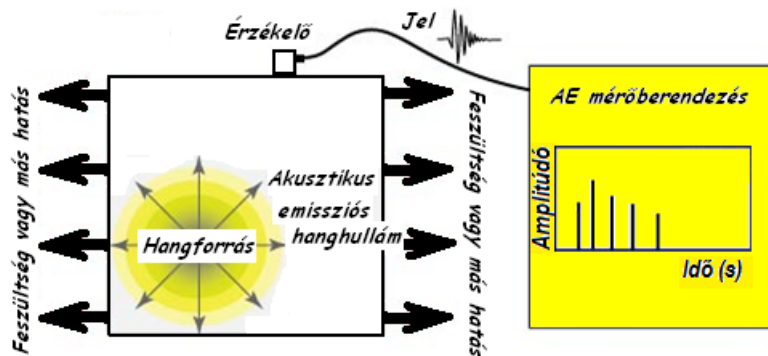
- E - a rugalmassági modulus (MPa),
- ρ - a sűrűség (kg/m^3),
- G - a csúszási rugalmassági modulus (MPa),
- μ - a Poisson-szám (-).

5.7.5. Az akusztikus emissziós vizsgálat célja

Elsődleges célunk az anyagban keletkező hanghatás révén a kiváltó jelenséget azonosítani. Ennek módszere, hogy az észlelt jelet igyekezzünk minél pontosabban leírni megfelelően megválasztott paraméterekkel. Fontos tudni, hogy a mérőrendszer kimenetén megjelenő villamos jelek nemcsak a hangforrás, hanem a hangterjedési út, az érzékelő és a műszerek tulajdonságait is magukon viselik.

Az akusztikus emisszió mérésénél abból indulunk ki, hogy az akusztikus emisszió megfigyelhető a szilárd testek felületén (vö. a hang minden irányba terjed). Tehát feladatunk, hogy a felszínre egy olyan érzékelőt helyezünk, amely a kívánt frekvencia-tartományban mérni tudja a felület rezgéseit (lásd a 5.32 ábrát). Mivel a féanyagokban a tipikus frekvenciatartomány az ultrahangok tartományában van, ezért ilyen érzékelőre

van szükségünk. Az érzékelő a rezgéseket elektromos jellé alakítja, amit regisztrálunk és kiszámítjuk a paramétereit.



5.32. ábra. Az akusztikus emissziós mérésekben használt tipikus mérési elrendezés [NDT web]

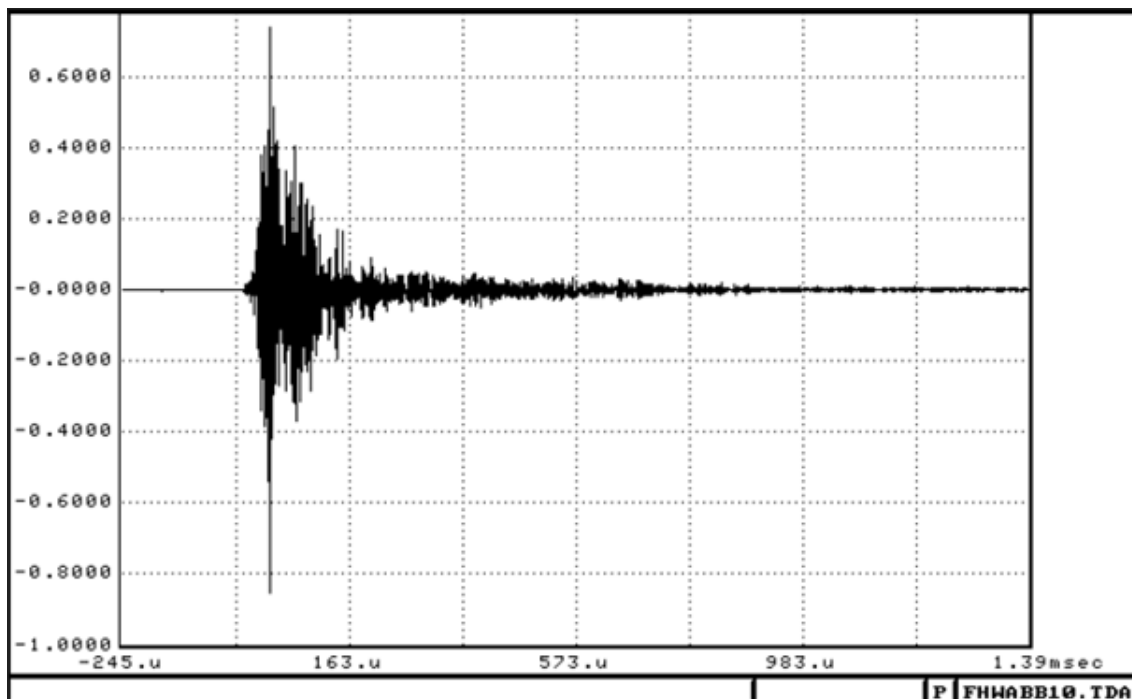
Milyen problémák lépnek fel? Az első, hogy a hangintenzitás igen alacsony, ezért erősítésére van szükség. Korábban egyértelmű volt, hogy ha meg akarjuk haladni az elektronikai erősítők bemeneti zaját, akkor célszerű, ha már az érzékelőben erősítjük a hangot. Erre jó lehetőséget nyújt a gyorsulásérzékelőknek az a tulajdonsága, hogy tulajdonképpen rezonanciájuk van.

Ha sikerült érzékelni és rögzíteni az akusztikus emissziós jelet, akkor általában egy lecsengő oszcillációhoz hasonló sztochasztikus jelet, úgynevezett "Börsztöt" (lásd a 5.33 ábrát) mérünk (már ha elég közel vagyunk a hang forrásához, mert mint látni fogjuk, nagyobb távolságokra a hangsebesség diszperziója miatt szétúszik időben a jel, a front és a vég egyre távolabb kerül egymáshoz képest, és az éles „börszt” ellaposodik).

Ahhoz, hogy egy ilyen jelet rögzítsünk, nagyfrekvenciás mintavételezésre lenne szükségünk. Mivel a rezonancia és maga a kibocsátás a 100 vagy több száz kHz-es tartományban van, ezért az adekvát mintavételezés a MHz-es vagy több tíz (száz) megahertzes tartományban lenne. Mivel ez az akusztikus emisszió XX. századi hajnalán nem állt rendelkezésre, az 1970-1990-es években kifejlesztették az akkori elektronikák készségeinek megfelelő, mérhető paramétereket, amelyeket a 5.34 ábra szemléltet.

Mivel a XX. században még nagysebességű mintavételezés nem állt rendelkezésre, a kornak megfelelő analóg elektronikák csak bizonyos paraméterek számszerű meghatározását tették lehetővé (vö. 5.34 ábrával):

- küszöbszint,
- amplitúdó,



5.33. ábra. Egy tipikus akusztikus emissziós "börst" [NDT web]: a függőleges tengelyen az amplitúdó, a vízszintesen az idő

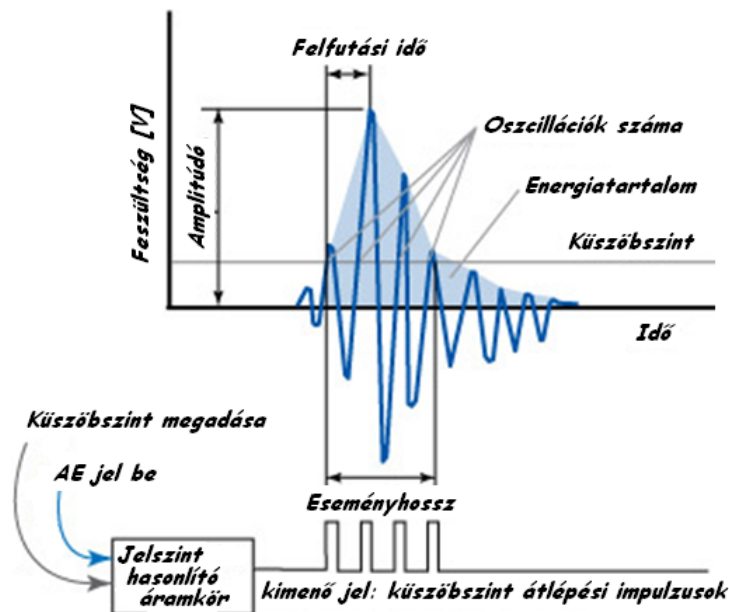
- felfutási idő,
- eseményhossz,
- oszcillációk száma,
- energiatartalom.

amelyeket mind a mai napig használnak és része a szabványnak. Meghatározásuk helyett sokkal egyszerűbb leolvasni a fogalmat a 5.34 ábráról.

Világos, hogy a fenti ábrán bemutatott „fontos” paraméterek azért váltak olyan fontossá, mert jól mérhetők a komparálási (összehasonlító) elektrotechnikákkal, amelyek az akkor ismert félvezető technikával megvalósíthatók voltak.

Ma forradalmi változás előtt áll az akusztikus emisszió, mivel a számítástechnika fejlődése lehetővé tette, hogy akár GHz sebességű mintavételezést is végezzünk (csak tárolni kellene tudni az adatokat).

Az akusztikus emisszió az anyagon belül keletkezik, és hanghullámokon keresztül jut ki a felszínre. Az anyagon belül különböző hullámalakkal terjed, ezeket az ultrahangoknál tárgyaljuk kicsit részletesebben. A legfontosabb hangterjedések: a longitudinális,



5.34. ábra. Az akusztikus emissziós "börzst" jellemző mennyiségei [NDT web]

a transzverzális, a lambda-hullámok stb. Ezeket már áttekintettük az ultrahangról szóló részben, hiszen az akusztikus emissziós hangok is ultrahangok. Minden, amit ott elmondtunk itt is igaz. Ezek közül a következők okoznak különös gondot:

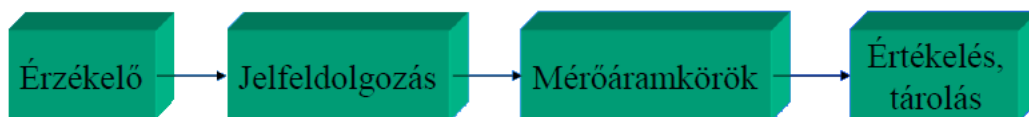
- háttérzaj,
- longitudinális és transzverzális hullámok sebesség különbsége,
- különbözőségek a csoportsebességben,
- sebesség diszperzió a frekvenciában (szétűzés),
- a KAISER- és FELICITY-effektusok (ezeket később ismertetjük).

5.7.6. Jelfeldolgozás az akusztikus emisszióban

Az akusztikus emissziós méréstechnikában több csatornával és sokcsatornás készülékkel dolgozunk, amelyek az egyes detektorok által vett jelek közötti összefüggéseket is mérik. A jelfeldolgozás folyamatát a 5.35 ábra szemlélteti.

Fizikai elv szerint az akusztikus emissziós érzékelő lehetnek:

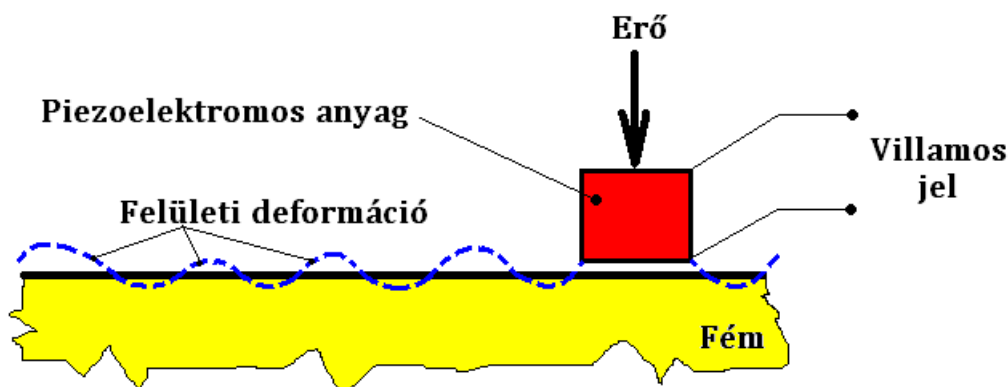
- elektromágneses,



5.35. ábra. A jelfeldolgozás folyamata [Rajz: Gemes Gy.]

- kapacitív elven működő,
- piezorezisztív.

Az egyik legelterjedtebb fajta a piezoelektromos elven működő érzékelők csoportja. Elve (lásd még a 5.36 ábrán): bizonyos keramikus anyagok a mechanikai alakváltozás hatására polarizációs irányban, két párhuzamos fémelektrodán elektromos töltésváltozást hoznak létre. A töltésváltozás a deformáció mértékével arányos.

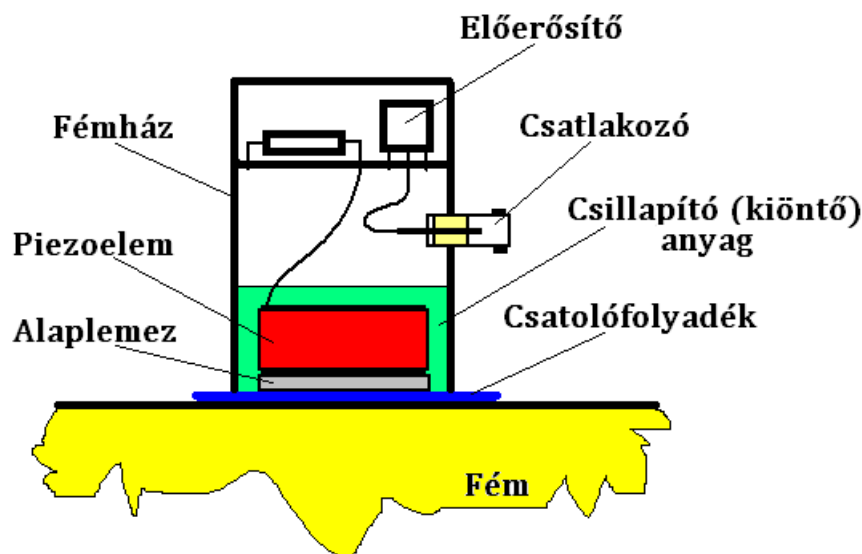


5.36. ábra. A piezoelektromos érzékelők elve [Pellionisz] [Rajz: Kiss A.]

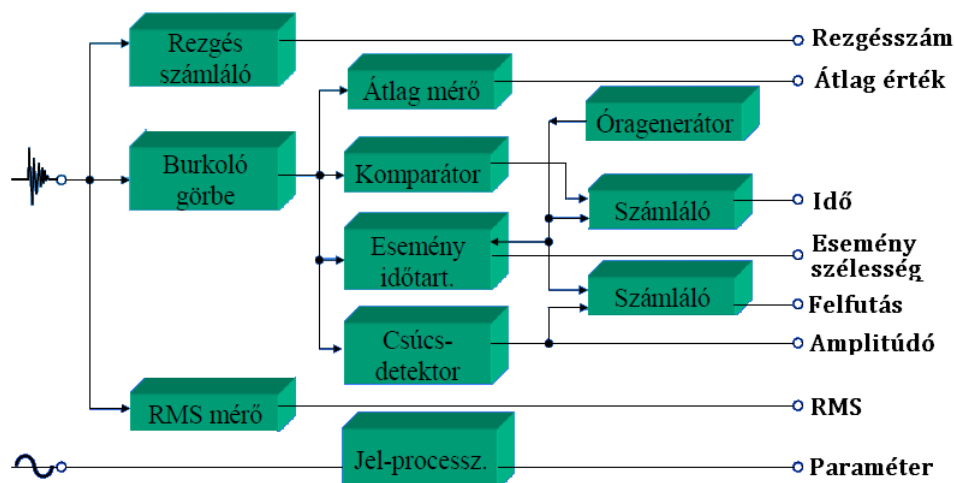
Egy piezoelektromos érzékelő felépítését a 5.37 ábra szemlélteti. Jellemzői:

- reciprocitás,
- érzékelési frekvencia,
- érzékenység.

A jelfeldolgozás műveletét analóg egységek látják el. Ilyenek az előerősítők, erősítők és szűrők. A jelfeldolgozás célja a mérőáramkörök által igényelt szintű jel előállítása. Egy egycsatornás készülék általánosított blokkdiagramját a 5.38 ábra szemlélteti.



5.37. ábra. A piezoelektromos érzékelő felépítése [Pellionisz] [Rajz: Kiss A.]



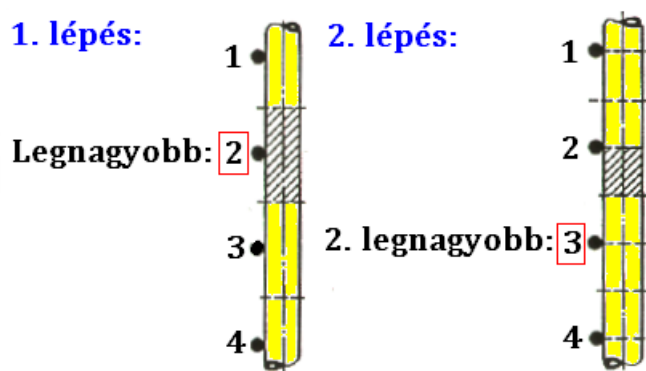
5.38. ábra. Egy egycsatornás készülék általánosított blokkdiagramja [Rajz: Gemes Gy.]

5.7.7. Akusztikus emissziós események lokalizációja

Az akusztikus eseményeket általában több érzékelővel észleljük. A mérőeszköz és a jelfeldolgozás vonatkozásában együtt kezelt érzékelőcsoportot vizsgáljuk. Az elsőként megszólaló érzékelőhöz képest mérjük azokat az időkéseket, melyekkel a kiválasztott érzékelőcsoport tagjai megszólalnak, azaz veszik az ugyanazon forrásból származó hangeseeményt. A hanghullám terjedési sebessége és az elrendezés geometriája ismeretében kiszámítható

a forráshely pontos koordinátája, azaz lokalizáljuk a hangforrást.

A zónalokalizálás elvét, amellyel folyamatos jeleket lehet lokalizálni a 5.39 ábra szemlélteti. Egyszerű módszer, melynél a legnagyobb RMS (root mean square) jellel jellemezhető érzékelőt keressük (lásd a 5.39 (a) ábra), hiszen ennek a környezetében van a hangforrás. Amennyiben a zóna méretét szűkíteni akarjuk, akkor a második erősségű RMS jellel rendelkező érzékelőt is érdemes figyelembe vennünk. A módszer a forrás pontos helyét nem adja meg.



5.39. ábra. A zóna lokalizálás elve [Pellionisz] [Rajz: Kiss A.]

$$RMS = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T f^2(t) dt} \quad (5.5)$$

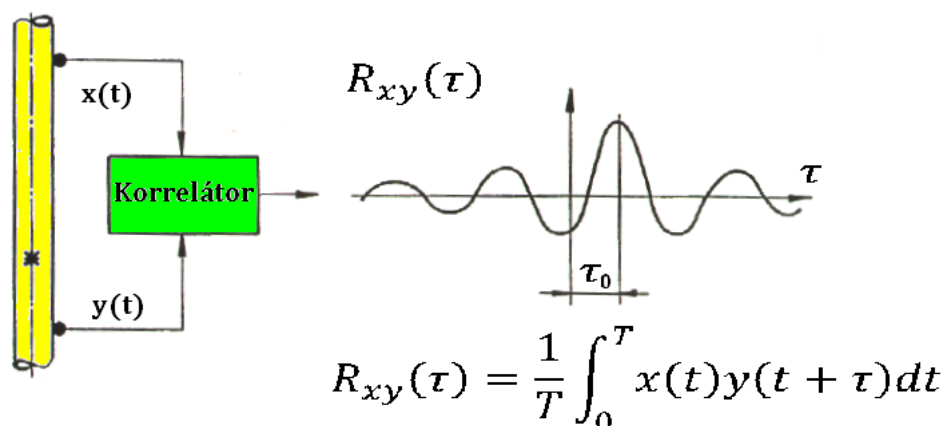
Keresztkorrelációs lokalizálás elvét, amellyel szintén folyamatos akusztikus emissziós jeleket lehet lokalizálni, a 5.40 ábra szemlélteti. Ez a lokalizálási módszer egy elvi lehetőség csupán, a gyakorlatban nem szokás használni. A forrás helyét a keresztkorrelációs függvény megoldása szolgáltatja.

Egyedi hangesemények lineáris lokalizálásának elvét a 5.41 ábra szemlélteti. A mérendő mennyiség a Δt (s), melynek segítségével az egyenes vonalú egyenletes mozgás leíró módszerével, egyszerű geometriai megfontolással kiszámolható a forrás helye.

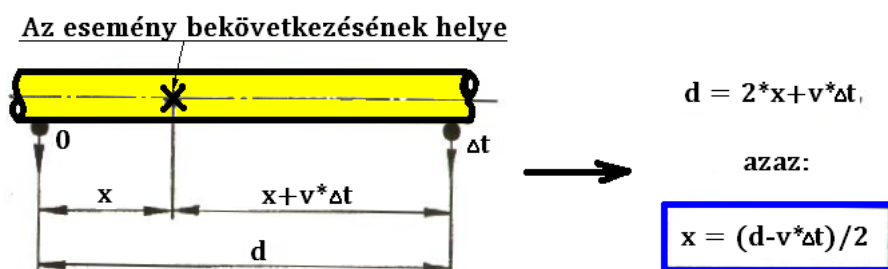
Egyedi hangesemények síkbeli lokalizálásának elvét a 5.42 ábra szemlélteti.

A hiperbola módszer teoretikus, a gyakorlatban kevésbé használatos módszer. Előnye, hogy egyszerű egyenletek megoldásaként születik az eredmény, hátránya azonban, hogy két hiperbola nem csak egy pontban képes egymást metszeni, így nem valós (fals) forrás is keletkezik.

A legmegbízhatóbb és egyben a leggyakrabban alkalmazott eljárás a körökkel történő lokalizáció (lásd a 5.42 ábra). A módszer pontosságát az az egyszerű geometriai



5.40. ábra. A keresztkorrelációs lokalizálás elve [Pellionisz] [Rajz: Kiss A.]



5.41. ábra. Egyedi hangesemények lineáris lokalizálásának elve [Pellionisz] [Rajz: Kiss A.]

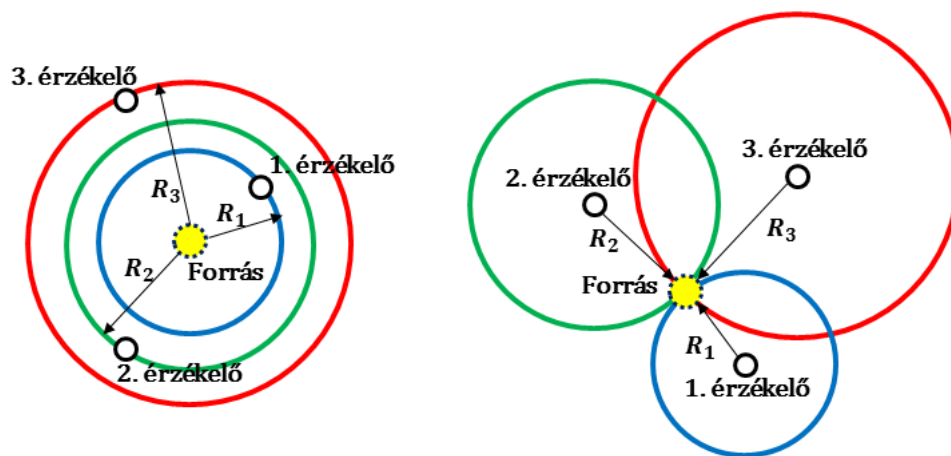
tény adja, hogy három kör csak egy pontban képes metszeni egymást. Ehhez azonban minimum három érzékelő egymáshoz viszonyított időkülönbségeit kell figyelembe venni.

A 5.43 ábra egy mérőlánc elrendezését szemlélteti.

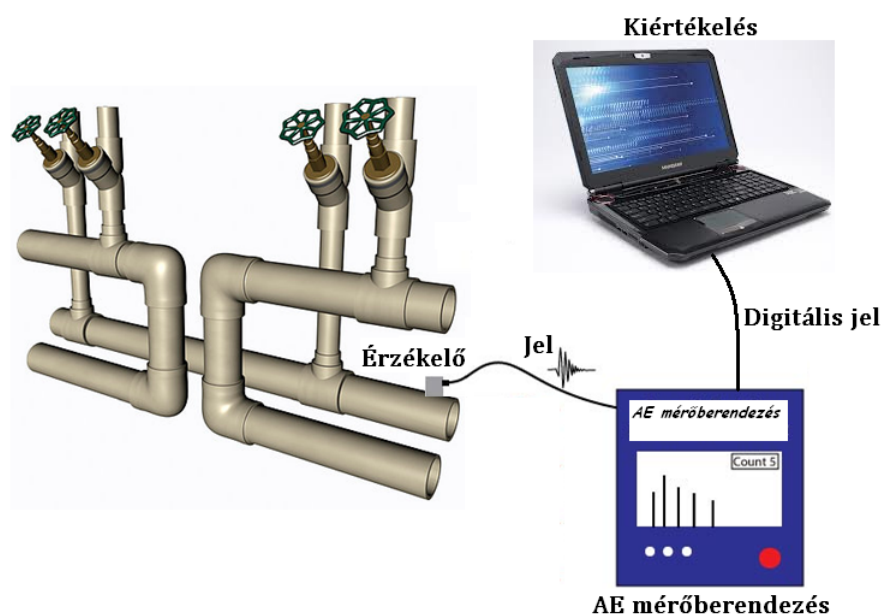
A jelek tárolása digitális formában számítógépek segítségével történik. Az értékelést ugyancsak számítógépek végzik a felhasználó által megkívánt mértékben.

5.7.8. A Kaiser-effektus

Ha egy fémből készült szerkezeti egységben (fémrúd, cső, tartály) a feszültséget növeljük, akkor az adott egységen elhelyezett érzékelőn/érzékelőkön az összesített hangesemények száma a terhelés növekedésével arányosan növekszik (lásd 5.44 ábra). A terhelés csökkentése folyamán újabb események gyakorlatilag nem mérhetők, ugyanúgy, ahogyan az állandó terhelés tartományában sem. A terhelés ismételt növelésének hatására ébredő feszültségnövekedés mindaddig nem jár hangeseménnyel, amíg a terhelés el nem éri azt

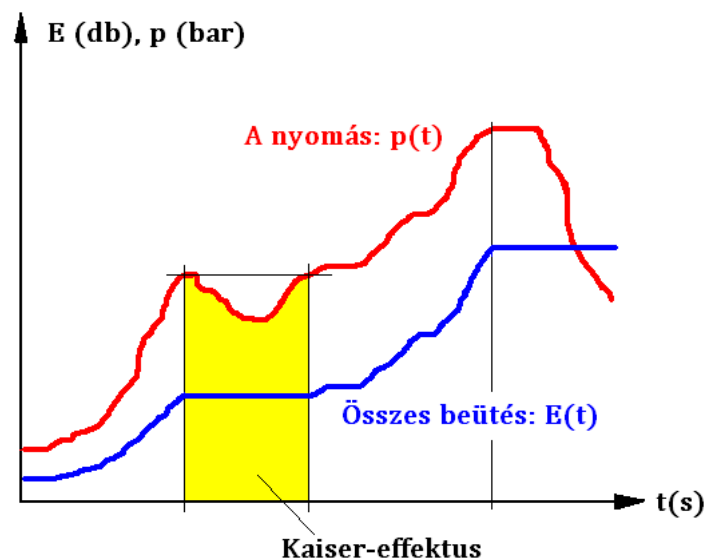


5.42. ábra. Egyedi hangesemények síkbeli lokalizálásának elve a kör módszerrel [Pellionisz] [Rajz: Kiss A.]



5.43. ábra. Az akusztikus emisszió mérőláncának általános felépítése [Rajz: Kiss A.]

az értéket, amelyet már korábban érzékelt a szerkezet, tehát amíg el nem érjük azt a terhelési szintet, ahonnan korábban csökkentettük. Ennek az értéknek az elérését követően az összesített hangesemények ismételt arányosak lesznek a terhelésnövekedéssel. Ezt az anyagra jellemző tulajdonságot nevezzük Kaiser-effektusnak.



5.44. ábra. A Kaiser-effektus szemléltetése [Pellionisz] [Rajz: Kiss A.]

Az akusztikus emissziós jelek értékelését a 6.32 ábra szemlélteti.

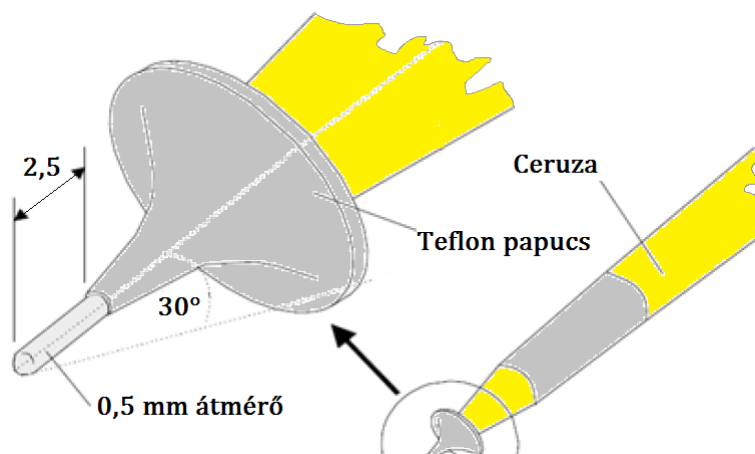
5.7.9. Kalibrálás

Az akusztikus emisszió kalibrálásához mind a mai napig általánosan a Hsu-Nelson próbát alkalmazzák (lásd a 5.45 ábrát), amely nem más, mint egy 0,5 mm-es grafithegy törése a felületen. Amennyiben nem polimer javítású grafitot használunk, akkor a törés ultrahangot generál amelynek amplitúdója szinte minden kézben ugyanakkora, tehát kalibrálásra használható. Persze ma már vannak más tesztelési módszerek is. Pl. Az egyik érzékelőt használjuk távadóként. De ez nem ad jobb eredményt, mint a hagyományos teszt.

5.7.10. Alkalmazási területek

Az akusztikus emissziót számos területen alkalmazzák:

- különböző tartályok (fekvő, álló, gömb) vizsgálata: úgy véljük, ez az a terület, ahol legelterjedtebben használják az akusztikus emissziót. Az atomerőművekben is! A cél: az óriási tartályokon meghatározni azokat a helyeket, ahol problémák adódhatnak. Ezeket a helyeket aztán tipikusan tüzetes ultrahangvizsgálatoknak vagy radiográfiai átvilágításnak vetik alá. Az akusztikus emisszió érzékelőkkel jól lehet látni a terhelés (pl. nyomásnövelés) alatt a kezdődő repedéseket és a fejlődő repedéseket. Ha minden évben rendszeresen végzik a méréseket, akkor össze lehet vetni a korábbi mérésekkel,



5.45. ábra. A ceruza-teszt (más néven Hsu-Nelson) kalibrálásakor egy 0,5 mm-es grafitceruzát használunk teflon papuccsal [NDT web]

- atomerőművi reaktortartály vizsgálat: lásd később a 6. fejezetben,
- szivárgásdetektálás: csőrendszerekben, tartályoknál a szivárgás jól érzékelhető akusztikus jeleket hoz létre, aminek a lokalizálásával beazonosítható a szivárgás helye,
- kutatás, anyagszerkezeti-, anyagöregedés vizsgálatok: az akusztikus emissziós módszert Kaiser eredetileg anyagvizsgálatokra (szakításpróba, illetve kúszási teszt) találta ki. Sokáig csak szerkezeti akusztikus emissziós tesztek végeztek. Az elmúlt évtizedben az anyagvizsgálatok számítási technikájának és szimulációinak fejlődésével párhuzamosan, rohamléptekkel fejlődik ez a terület. Elsősorban atomerőművi anyagvizsgálatokra lehet számítani az eddigi tudományos publikációk alapján.

5.8. Radiográfiák: röntgensugaras, neutronsugaras átvilágítás

Együtt tárgyaljuk ezt a két témát, mivel hasonló az elve. Valójában a röntgensugarak felfedezésével a röntgen átvilágítások az elsők között voltak a roncsolásmentes anyagvizsgálatok között 1896-ban. Szinte azonnal elkezdték használni a testek, közöttük a szilárd testek átvilágítására.

Már a röntgensugarak felfedezése után rögtön ismertté vált, hogy ez egy nagy áthatoló képességű sugárzás, amely áthatol az emberi testen. Elég hamar elkezdődött ennek orvosi-biológiai alkalmazása. Még az elektromágneses természete nem is volt ismert,

már alkalmazták átvilágításra. A röntgenátvilágítást senkinek nem kell bemutatni, mivel mindenki látott már olyan orvosi felvételt, amely törött csontokról vagy egészséges vagy beteg tüdőkről készült. A röntgensugárzás áthatol a vizes közegeken, és jelentősen szóródik, illetve elnyelődik a szilárd testekben, csontszövetekben. Az ilyen módon létrejött árnyképet először fotóérzékeny anyagokon rögzítették, majd fluoreszkáló képernyőre vitték (jelentős besugárzást okozva a folyamatosan mérő orvosnak). Ez utóbbi miatt ma megint uralkodik a fényképfelvétel. Ma már olyan röntgensugárzásra is érzékeny CCD kamerákat gyártanak, amelyek hamarosan ki fogják váltani ezeket a régi képmegjelenítő technikákat (az ipari gyakorlatban is).

A röntgenfelvételeket elég hamar kezdték használni az ipari diagnosztikában. Sokat használják hegesztési varratok minőségének vizsgálatára, de korlátozottan alkalmas repedések, öntvények zárványainak, légbuborékok kimutatására is. Egyike a széleskörűen használt roncsolásmentes anyagvizsgálati módszereknek. Röntgen helyett igen gyakran gamma-sugárforrást használnak. Ennek egyik előnye a nagyobb áthatolóképességben van, mivel ezeknek a hullámhossza alkalmasabb számos anyag átvilágítására. További előnye, hogy nem kell nagyméretű röntgenberendezést a helyszínre cipelni (illetve a vizsgálandó tárgyat odacipelni). A kisméretű gamma-forrás (ma már akár egy köbcentiméternél is kisebb lehet) sok olyan helyre is befér, ahová a röntgensugárzó fejet betenni lehetetlen lenne. De ezért fizetni kell. Először is nagy intenzitású forrásra van szükség, hogy ugyanolyan vastagságú anyagon áthatoljon a sugárzás. De a legnagyobb probléma maga a sugárforrás, amely a röntgennel ellentétben, a mérés után is sugárzó. A röntgen a nagyfeszültség kikapcsolása után megszűnik sugárzónak lenni. A gamma-sugárforrás viszont továbbra is azonos intenzitással sugárzó, ezért állandó védelem kell hozzá. Az állandó védelem a hordozhatóságot is nehezebbé teszi.

Maga a mérés nem jelent nagy nehézséget, hiszen képeket kell felismerni, de itt is ugyanaz mondható el, mint az endoszkópiánál. A látás nemcsak egy optikai feladatot jelent, hanem felismerési feladatot is. A röntgen vizsgálatokhoz szabványokat dolgoztak ki. A felvételeken látható hajszálrepedéseket egy szabványos sorhoz hasonlítják (lásd [6.27](#) ábrát), és ennek alapján minősítik a repedéseket. Ez a módszer nagyon bevált, annyira, hogy ma már gátolja a CCD kamerákra való áttérést, mivel a fotográfiai eljárás is benne van az értékelésben.

A neutronradiográfia azon a felismerésen alapul, hogy a neutronok, mint semleges részecskék könnyedén áthatolnak sok anyagon. Talán meglepetést kelthet, de a fémek egy bizonyos csoportján (főleg a könnyűfémeknek nevezett csoporton) a neutronok úgy hatolnak át, mint a levegőn. Például az Al ötvözetek a neutronsugarak számára teljesen áttetszők. Igaz felaktiválódnak, de gyors felezési idővel le is bomlanak, tehát ez is probléma, de nem jelentős. Ráadásul az átvilágításukhoz olyan kis fluxusok kellenek, hogy átvilágításuk után viszonylag rövid idővel már nem jelentős gamma sugárzási háttérrel képviselnek. Tehát jegyezzük meg, hogy az Al a neutron számára csaknem olyan, mintha egy légrétegen hatolna át. Viszont a neutronok nagyon szóródnak a hidrogéntartalmú

anyagokon, és általában a kis rendszámú atomok magjain. Ennek felhasználásának nincs határa. Ma egyre másra születnek az ezt hasznosító eljárások. A motorgyártó cégek az elmúlt 20 évben fokozatosan áttértek a könnyűfémekből készült motorok gyártására. A motor fémháza nem jelent akadályt a neutronok számára, úgy hatolnak át rajta, hogy alig szóródnak. A motorba befűjt, ott robbanó szénhidrogének viszont hidrogéntartalmúak. Ezen a neutronok szóródnak, és ezt jól lehet látni a motor másik oldalán elhelyezett képernyőn. Persze ide olyan képernyőket kell tenni, amelyek felvillanást adnak, ha egy neutron beérkezik. Ilyen konverteranyagok szép számban vannak és ismertek. A képet már régen nem szemmel nézik, hanem CCD kamerákkal figyelik és rögzítik.

A CCD kamerák betörése amúgy is új lendületet adott valamennyi átvilágításos módszernek, mivel olyan mértékű érzékenységnövekedés történt, hogy a korábban csak nehezen átvilágítható tárgyakat ma már egyszerűen, és sokkal kisebb dózisokat igénylő forrásokkal is át lehet világítani.

A neutron-, gamma- illetve röntgenradiográfia jól ismert roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek, amelyeket a világ számos laboratóriumában külön-külön alkalmaznak. A neutronok viszonylag csekély veszteséggel jutnak át a gyakorlati szempontból fontos fémeken (pl. Al, Cu, Fe), míg a hidrogéntartalmú anyagok (pl. víz, olaj, különböző műanyagok) jelentős mértékben csökkentik a neutronnyaláb intenzitását. A gamma- és röntgensugárzás esetében fordított a helyzet, felhasználásuk során a vizsgált tárgy fémalkatrészeiről kapunk jó minőségű radiográfiai képet, míg a fent említett könnyű anyagok alig láthatók.

Az MTA KFKI-ban már korán felismerték a háromféle sugárzást alkalmazó komplementer radiográfiai vizsgálat jelentőségét, és megoldották azok egyidejű alkalmazhatóságát a KFKI 10 MW-os kutatóreaktora mellett kiépített dinamikus radiográfiai mérőhelyen. A neutron- és gamma-sugárzást a reaktor termikus csatornájából nyerik, míg a röntgensugárzást a nyaláb pozíciójába helyezett röntgengenerátorral állítják elő. A radiográfiai képeket szcintillációs konverterekkel alakítják fénné, és nagy érzékenységű tv-kamera segítségével monitor képernyőn teszik láthatóvá. Az információkat S-VHS videomagnetofonnal tárolják, a felvételek kvantitatív kiértékelését képfeldolgozó rendszerrel végzik. A mérések során, a működő vizsgálati tárgyak üzemi paramétereit (hőmérséklet, nyomás, teljesítmény felvétel) is mérik és eltárolják. A dinamikus radiográfiát különféle ipari termékek, mint pl. hűtőgépek, hőcsövek, olajpumpa rendszerek, ipari robotok, üzemanyag fogyasztásmérők, VISCO kuplung, kávéfőzők, tűzoltó készülékek gyártása közben felmerülő kutatás-fejlesztési kérdések megoldására alkalmazzák ipari együttműködések keretében.

5.9. Hőtérképezés

Ma az egyik legdivatosabb roncsolásmentes módszer a hőtérképezés, - hőkamerával. Az átlagember elsősorban az energiagazdálkodás területén kifejtett propaganda alapján ismerkedik meg vele. Ez igen hasznos volt, a tömeggyártás miatt a hőkamerák ára jelentősen zuhant az elmúlt években, és így egyre több és gazdagabb területen vonul be a diagnosztikák terén. A felületi hőmérsékletek eloszlása jelentős mértékben függ az anyag eloszlásától és a felület alatti elrendeződésektől, ezért igen hasznos információt nyújthat.

Szögezzük le mindenekelőtt, hogy a mai korszerű fizika nélkül nem lenne a kezünkben ez az eszköz. Bár az emberiség sok ezer éve tudta, hogy a Nap fénye meleget ad a hősugárzás lényegét sokáig nem írták le (bár használták). Az első lépés talán a Stefan-Boltzmann törvény ezen az úton, amely szerint az abszolút fekete test összes emisszióképessége (j - a fluxussűrűség (W/m^2)) egyenesen arányos a termodinamikai (abszolút) hőmérséklet (T) negyedik hatványával, az arányossági tényező pedig a σ - a Stefan-Boltzmann állandó:

$$j = \sigma * T^4 \quad (5.6)$$

A hőátadás sugárzással történő törvénye már ebből vezethető le a szürke testekre:

$$P = A * j = A * \epsilon * \sigma * T^4 \quad (5.7)$$

ahol

- P – a sugárzással átadódott hőáram mennyisége (W),
- A – a sugárzó test felülete (m^2),
- ϵ – emissziós tényező.

Ettől még nem teljesen értjük, hogyan is kerül hozzánk a Nap fénye és energiája, és nem tudunk igazán arra válaszolni, hogy mekkora is a Nap felületének hőmérséklete. Annak felismerése, hogy ez a sugárzás elektromágneses hullámok révén éri el a Földet alapvető a továbblépésben. Lényegében már a kvantummechanika kellett hozzá, hogy megszülessen és elfogadhatóvá váljon a fekete test Planck féle sugárzás törvénye. A Planck törvény felírható a spektrális energia sűrűségfüggvényeként ($u(\nu, T)$):

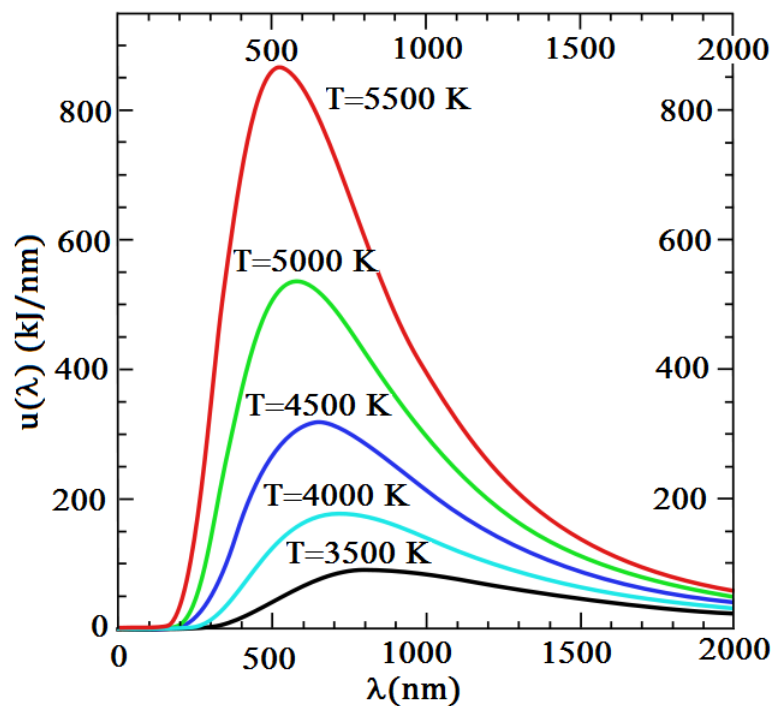
$$u(\nu, T) = \frac{8 * \phi * h * \nu^3}{c^3} * \frac{1}{e^{\frac{h * \nu}{k * T}} - 1} \quad (5.8)$$

Ahol:

- u - a spektrális energia sűrűségfüggvénye (kJ/nm),

- ν - a frekvencia (Hz),
- T - a hőmérséklet (K),
- h - a Planck állandó ($h = 6,62606957 \cdot 10^{-34} J \cdot s$)
- c - fény vákuumbeli sebessége (m/s),
- k - a Boltzmann állandó ($k = 1,3806488 \cdot 10^{-23} J/K$).

A Planck törvényt, a spektrális energia sűrűségfüggvényeként mutatja a 5.46 ábra.



5.46. ábra. A fekete test Planck féle sugárzási törvénye grafikusán ábrázolva [Rajz: Kiss A.]

És ennek az eloszlásnak a maximuma a Wien törvény:

$$\lambda_{max} * T = \frac{h * c}{k * x} = 2896(\mu m K) \quad (5.9)$$

Példaként megjegyezzük, hogy a Nap hőmérsékletén (6000 K) a 400 nm-es hullámhosszú fényre esik a maximum.

Az igazán korszerű hőmérsékletmérés már ezen alapul, de azért jegyezzük meg, hogy az olcsóbb eljárások a Stefan-Boltzmann alapján a sugárzásos hőátadás törvényét használják (úgy, hogy a fenti képlettel kiszámolják a sugárzással átadódott hőáram mennyiségét, feltételezve a 0,95-ös emissziós tényezőt) és igen fontos számukra az emisszivitás pontos ismerete, különben jelentős szisztematikus hibával terhelt értékeket kapnak.

A ma is használt modern hőkamera története a következő. 1929-ben Tihanyi Kálmán magyar fizikus találta fel az első infravörös-érzékeny (éjjel-látó) elektronikus televíziós kamerát a repülőgép elhárítás céljából Nagy-Britanniában. Az első klasszikus infravörös kamerát „Evoporograph” néven 1956-ban hozták nyilvánosságra.

A mai hőkamerák abszolút mérési pontossága nem jobb mint 2°C (még akkor is ha jó az emisszivitási tényező!). De egy azonos felületen belül már jobb mint $0,1^{\circ}\text{C}$ különbségeket fel lehet térképezni!

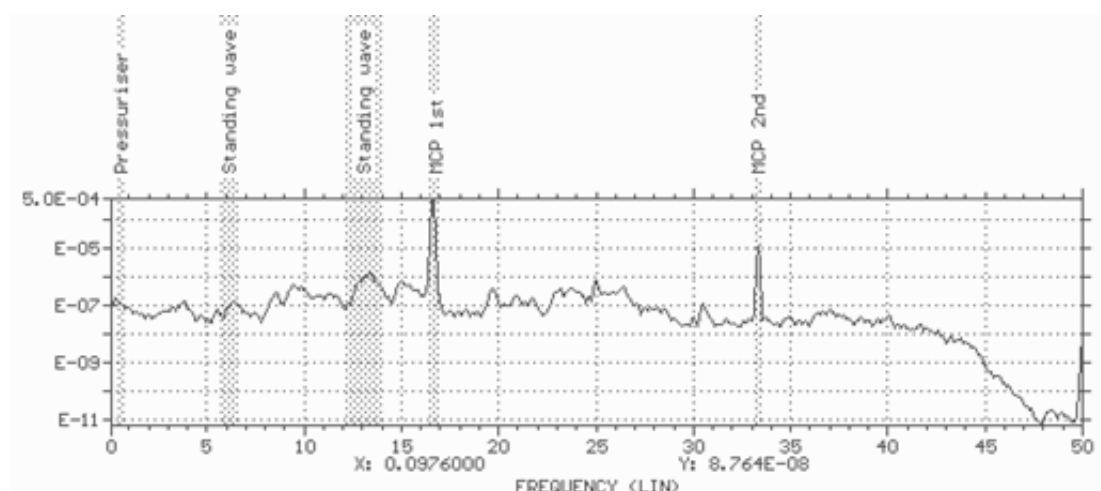
5.10. Rezgésvizsgálatok és termohidraulikai vizsgálatok

A *rezgésvizsgálatokat* nem szokás feltétlenül a roncsolásmentes anyagvizsgálatok közé sorolni, bár napjainkban igen széles területen végzik ezeket a vizsgálatokat, és nem csupán a forgógépek működésének minősítésére, a csapágyak, fogaskerekek, és más csúszó felületek közbeni rendellenes zajok alapján következtetnek az egyes elemek és az egész berendezés élettartamára, hanem a sajátfrekvenciák vizsgálatával anyagi állandókat, azok változásait is nyomon lehet követni, amely már igazi anyagvizsgálat.

Az alapok jól ismertek. Általában gyorsulásmérőt használunk érzékelőnek. Míg az akusztikus emissziónál a rezonancia erősítést használjuk ki, addig a rezgésvizsgálatoknál a gyorsulásérzékelő átviteli függvényének állandó erősítésű frekvenciasávjában mérünk, és elektronikus szűrőkkel, vagy az érzékelő csillapításának növelésével szabadulunk meg a magasabb frekvenciás rezonanciától.

A mért időjelet a Fourier transzformációval szokás átalakítani, áttanszformálni a frekvenciaterbe.

E rövid összefoglalóban nem kívánjuk levezetni a széles körben használt függvényeket. A legfontosabb függvény a teljesítménysűrűség-függvény (más nevén az autospektrum), amely megmutatja, hogy a mért rezgések teljesítménye hogyan oszlik meg a különböző frekvenciák között. Ezt sajnos az irodalom kétféleképpen is definiálja: úgy mint a fenti Fourier transzformáció abszolút értékét (tipikusan a mérnöki irodalomban), vagy mint annak négyzetét (tipikusan a fizikusok). A két definíció közötti elvi különbségről könyvtárnyi irodalom született. A mi számunkra nem lényeges a különbség. A kapott spektrumban csúcsok, éles csúcsok, széles emelkedett tartományok váltják egymást (lásd a 5.47 ábrát).



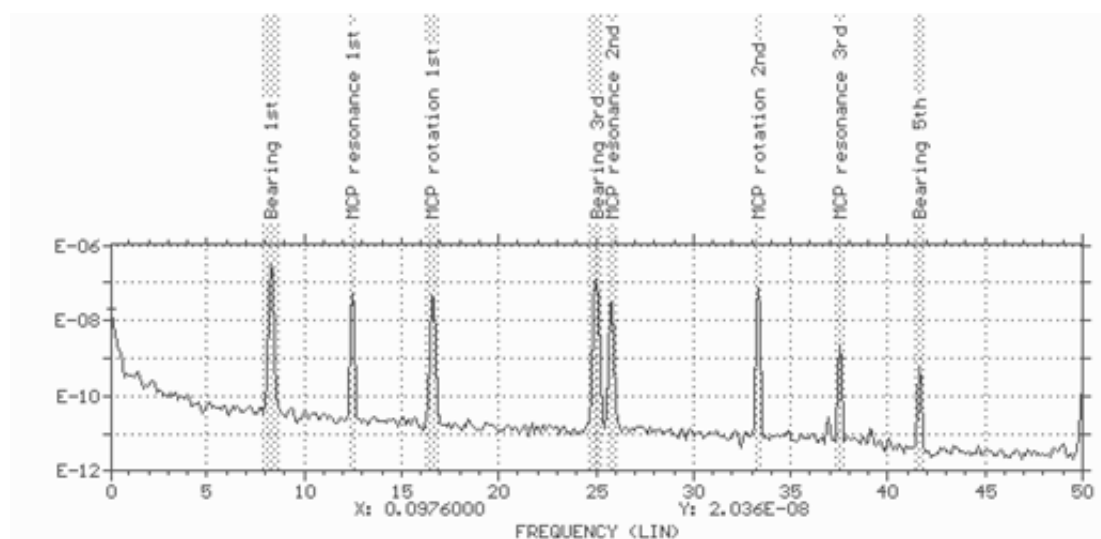
5.47. ábra. Gyorsulásmérővel mért rezgésspektrum egy VVER-1000 típusú atomerőmű csővezetékén (angol nyelvű szoftver által készített gyorsulás (m/s^2) - frekvencia (Hz) diagram) [Rajz: Por G.]

A mi feladatunk, hogy minél több részletnek találjuk meg az okát, a forrását, és az átvitelét a mi érzékelőnkhez. Ha megismertük a spektrum részleteit, akkor annak változásait értelmezni tudjuk.

A keskeny csúcsok tipikusan determinisztikus összetevők, amelyeket vagy a forgógépek egyenletesen forgó alkatrészei váltanak ki, vagy a szilárd testek rezonanciái.

A forgási frekvenciák tárháza igen széles, de mindig valamilyen viszonyban van a berendezés alapvető forgási frekvenciájával. Milyen szép is lenne, ha azt írhatnánk, hogy annak egész számú többszöröse! De ez nem igaz! A csúszó-csapágý jellegzetes frekvenciája a forgási frekvencia 0,45-szörösénél van! De nem akarunk ezek részletes elemzésébe belemenni, tessék tanulmányozni a vonatkozó irodalmat! A forgási frekvenciák megtalálásánál segítséget adhat, ha forgásjel távadót szerelünk a főtengetyre, és nem spektrumokat átlagolunk, hanem a fogásjel távadót triggerként használva az időjelet átlagoljuk. Azonnal csökkentjük a nem forgásjel eredetű összetevőket, és kiemeljük azokat, amelyek a forgástól vannak. A Paksi turbinák és főkeringtető szivattyúk fel is vannak szerelve ilyen forgásjel távadóval (lásd a 5.48 ábrát).

A sajátfrekvenciák kezeléséhez elég, ha visszaemlékezünk a húr rezgésére! A rugalmasság és a tömeg, valamint a húr hossza determinálja a megjelenő sajátfrekvenciát, amely bizony igen éles szokott lenni a spektrumban. Ennek felharmonikusai a hang torzulásáról árulkodnak. Akár mert az amplitúdója túl nagy, akár mert valami torzítja. Ez utóbbi leggyakrabban a szabad rezgést akadályozó érintés, vagy szilárd testeknél például a repedés is, amely hirtelen beleavatkozik a kiszámított „húrhosszba”, megrövidíti a



5.48. ábra. Gyorsulásmérővel mért rezgésspektrum egy VVER-1000 típusú atomerőmű csővezetékén, amikor a csapágy tönkrement (angol nyelvű szoftver által készített gyorsulás (m/s^2) - frekvencia (Hz) diagram) [Rajz: Por G.]

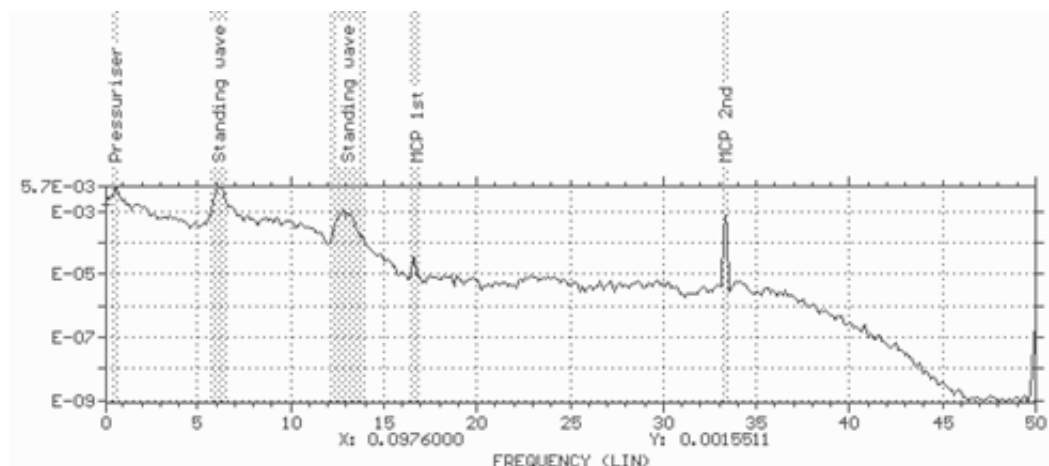
húr hosszúságát. a repedésről visszaverődő hullámok megakadályozzák az eredeti, „szép” harmonikusok kialakulását, és csengő-bongó hang helyett, fals hangot hallunk az üveg-pohárnál, és évszázada már a vasúti kerekek kocogtatásánál. Ezt a tudásunkat visszük magunkkal az atomerőművi berendezések repedésvizsgálatához is.

A spektrum nem csúcsos, hanem széles sávú részeiről illik tudni, hogy az időben változó, sztochasztikus összetevőktől származnak. Persze egy matematikus kifogásolná, hogyan lehet időben változó jelekre alkalmazni a Fourier technikát (de lehet). Igaz, ma már sokkal korszerűbb (de sokkal nehezebben interpretálható) a „wavelet” transzformációval való dolgozás. Nem akarunk teljes kurzust ide citálni, akit ezek a témák érdekelnek, azok vegyék fel a *Műszaki diagnosztikai* vagy az *Atomreaktorok műszerezettség és szabályozása* (I and C) kurzust.

Egy bekezdésnyi megjegyzésként itt megemlítjük, hogy a zajok az igazán széles sávúak. Ezek jellegzetessége, hogy $1/f$ szabályt követnek, azaz a frekvenciával csökken amplitúdójuk a spektrumban. A kopás miatt megjelenő kidörzsölődések megjelenése is tipikusan széles sávú zaj.

Termohidraulika: Hogyan került ebbe a fejezetbe termohidraulika? Egyszerűen úgy, hogy a rezgéseknél megismerteket kiterjesztették a nyomásról és hőmérsékletéről mért időjelekre. Igen könnyű belátni, hogy ha egy hosszú csövön (impulzuscső) mérünk nyomásesést, (és mindig így mérünk atomerőműben), akkor annak egyik vége nyitott a másik zárt, tipikus egyik végén rögzített húr egyenletét követő átvitelrel van dolgunk. Ami itt

fontos számunkra, az így mérhető spektrumok szintén az anyag, ebben az esetben a hűtőközeg állapotát képesek jellemezni (lásd például a 5.49 ábrát). Ha például a víz tele van buborékokkal, akkor a csillapítása a nyomásmérésben megnő, a hangot szórja, nem továbbítja stb. A termoelemekkel a hőhordozó állapotát és terjedési sebességét is méri az atomerőműben (a Paksi Atomerőműben is!).



5.49. ábra. Tipikus nyomásfluktuáció spektrum (angol nyelvű szoftver által készített gyorsulás (m/s^2) - frekvencia (Hz) diagram) [Rajz: Por G.]

5.11. A fejezethez tartozó animációk

A fejezethez tartozó animációk a következők:

- Az anyagvizsgálatok két csoportját szemlélteti példák megadásával az "Anyagvizsgálatok felosztása" című interaktív animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Anyagvizsgalatok_felosztasa_D01.swf

- Az ebben a fejezetben bemutatott anyagvizsgálatok közül négynek az elvével ismert meg a "Interaktív animáció néhány roncsolásmentes anyagvizsgálat elvéről" című interaktív animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Roncsolasmentes_anyagvizsgalatok_D01.swf

- A folyadékbehatolási vagy penetráló folyadékos módszer elvét mutatja be a "Penetrációs vizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Penetracios_vizsgalat_D01.swf

- A mágneses penetrációs vagy mágnesporos tesztelés elvét mutatja be a "Mágneses vizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Magneses_vizsgalat_D01.swf

- Az örvényáramos vizsgálat elvét mutatja be az "Örvényáramos vizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Orvenyaramos_vizsgalat_D01.swf

- Az ultrahangos vizsgálat elvét mutatja be az "Ultrahangos vizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Ultrahangos_vizsgalat_D01.swf

- A longitudinális hullámot szemlélteti a "Longitudinális hullám" című animáció, amely a hullámmal együtt mozgó képzeletbeli részecskék mozgásán keresztül érzékelteti a hullám terjedésének jellegét.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Longitudionalis_hullam_D01.swf

- A transzverzális hullámot szemlélteti a "Transzverzális hullám" című animáció, amely a hullámmal együtt mozgó képzeletbeli részecskék mozgásán keresztül érzékelteti a hullám terjedésének jellegét.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Transzverzalis_hullam_D01.swf

5.12. Ismétlő kérdések a 5. fejezet anyagához

1. Ismertesse az anyagvizsgálatok csoportosítását és jellemezze az egyes csoportokba tartozó anyagvizsgálatokat!
2. Mit értünk roncsolásmentes vizsgálatokon?

3. Mely vizsgálatok alkalmasak a munkadarab felületén lévő hibák kimutatására?
4. Mely vizsgálatok alkalmasak a munkadarab belsejében lévő hibák kimutatására?
5. Mi a fiberszkóp (fiberscope), boroszkóp, endoszkóp, videoszkóp? Miben azonosak, miben különböznek?
6. Hogyan végezzük a mágneses repedésvizsgálatot?
7. Milyen anyagokon végezhető mágneses repedésvizsgálat?
8. Sorolja fel a penetrációs vizsgálat lépéseit!
9. Milyen anyagoknál alkalmazható a penetrációs vizsgálat?
10. Milyen anyagoknál alkalmazható az örvényáramos vizsgálat?
11. Mi az elve az örvényáramos vizsgálatnak?
12. Milyen alkalmazási területei vannak az örvényáramos vizsgálatnak?
13. Soroljon példákat röntgenvizsgálatokra!
14. Mit nevezünk izotópos vizsgálatnak?
15. Miben tér el a röntgen- és az izotópos vizsgálat?
16. Hol alkalmazzák a gyakorlatban az izotópos vizsgálatokat?
17. Mi az elve az ultrahangvizsgálatnak?
18. Mondjon példákat az egyes anyagvizsgálati csoportokra!
19. Hogyan keletkezik az akusztikus emisszió?
20. Melyik frekvenciatartományba tartoznak az akusztikus emissziós jelek?
21. Hogyan osztályozhatóak az akusztikus emissziós jelek?
22. Mi jellemzi a longitudinális hullámokat?
23. Mi jellemzi a transzverzális hullámokat?
24. Mi a célja az akusztikus emissziós vizsgálatnak?
25. Hogyan történik a jelfeldolgozás az akusztikus emisszióban?
26. Hogyan történik az akusztikus emissziós események lokalizációja?

27. Mi a Kaiser-effektus és mi a jelentősége?
28. Hol alkalmazzák az akusztikus emissziót?
29. Mit jelent a hangátbocsátásos vizsgálat?
30. A hiba milyen jellemzőjét lehet meghatározni ultrahangvizsgálattal?
31. Mi az elve az akusztikus emissziós vizsgálatnak?

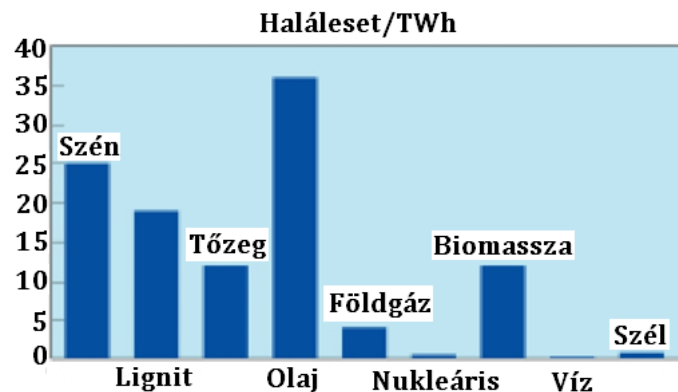
6. fejezet

Anyagvizsgálatok a primerkörü gyakorlatban

A fejezetet összeállította: *Bácskai Péter István*

Az utolsó két, atomerőművi anyagvizsgálatokról szóló tömör összeállításban nem célunk és nem is lenne lehetséges teljes körű áttekintést nyújtanunk valamennyi atomerőművi berendezésről, még kevésbé az őket érintő valamennyi vizsgálatról és vizsgálati eljárásról. Törekvéseink arra irányultak, hogy egy „zöldfülű” számára egy olyan olvasnivalót nyújtsunk át, mely felkelti érdeklődését és szakmailag is helytálló, ráadásul ennek ellenére jól érthető módon mutassa be a Paksi Atomerőműben leginkább jellemző anyagvizsgálatok, illetve speciális vizsgálatok egy hányadát. Noha ettől még senkiből nem válik anyagvizsgáló, bízunk benne, hogy ezzel a parányi ablakkal, melyet erre a csodálatos tudományra nyithattunk, érdeklődést és tiszteletet ébreszthetünk olvasóinkban az ipari anyagvizsgálók felelősségteljes és néha meglehetősen kalandos élete iránt.

Szerettük volna, ha munkánk nem mint tananyag, hanem mint érdekesség, mint olyan információ maradna meg olvasóinkban, melyhez nem juthat hozzá akárki. Ezért igyekeztünk úgy válogatni össze a példákat, hogy már önmagukban is egyfajta kuriózumnak tekinthetők. Mert lássuk be, ugyan hány ember van az országban, aki már egyáltalán látott atomerőművet? Ebből hány járt benne? S vajon hány járt ezek közül a primerkörben? Kik lehetnek azon kevesek, akik látták a reaktort, a nyitott boxot, a gőzfejlesztőt? Hány ember bújhatott már be egy gőzfejlesztő köpenyterébe? Ugyan hányan mondhatják el magukról, hogy ott vizsgáltak, értékelték, vagy éppen idegentestet távolítottak el egy manipulátorral? Azért ez nem semmi! S egy érdekesség, mely a manapság oly divatos atomerőmű-ellenes mozgalmak figyelmét elkerüli: az alábbi 6.1 ábrán - melyet Prof. Dr. Aszódi Attila, Boros Ildikó: A FUKUSIMAI ATOMERŐMŰ BALESETE EGY ÉV TÁVLATÁBÓL [Aszodi] című tanulmányából kölcsönöztem – láthatjuk azt az érdekes tényt, hogy energiaegységre vetítve bizony messze a legbiztonságosabb energiaforrásaink egyike a nukleáris energia. Persze ha ésszel és felelősséggel használjuk!



6.1. ábra. TWh energiaegységre vetített balesetek száma az energiaszektorokban [Aszodi]

A fejezetben röviden bemutatjuk a primer kör főbb berendezéseit és az ezek vizsgálatánál használt módszereket.

Az anyagvizsgálati módszerek közül elsősorban a roncsolásmentes módszereket használjuk atomerőművek üzemeltetése során.

Emlékeztető gyanánt az anyagvizsgálatok két csoportját szemlélteti példák megadásával az "Anyagvizsgálatok felosztása" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Anyagvizsgalatok_felosztasa_D01.swf

Az ebben a fejezetben bemutatott anyagvizsgálatok közül négynek az elvével ismert meg a "Interaktív animáció néhány roncsolásmentes anyagvizsgálat elvéről" című interaktív animáció:

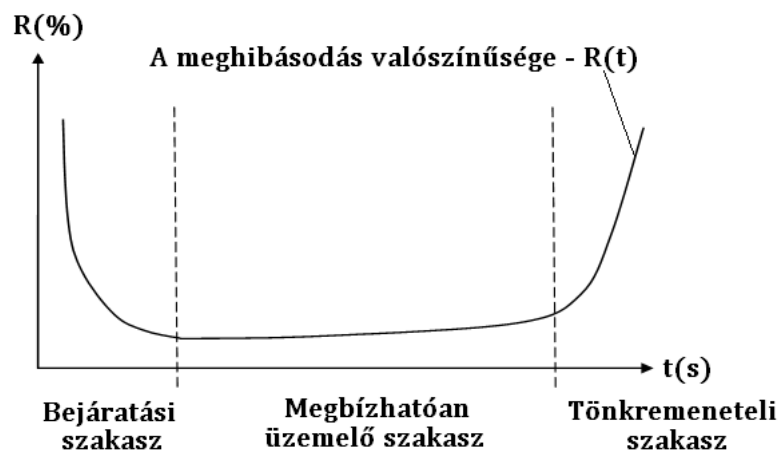
http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Roncsolasmentes_anyagvizsgalatok_D01.swf

6.1. A meghibásodás valószínűsége

Mielőtt belevágunk a témába, érdemes eltöprengeni a kérdésem: Miért is vizsgálunk?

Egy működő rendszer megbízhatósága, legszemléletesebben az úgynevezett megbízhatósági függvénnyel (vagyis a jól ismert kádgörbével, $R(t)$, lásd 6.2 ábra) jellemezhető, amely az idő függvényében mutatja, hogy az üzemidő mely szakaszában mekkora a meghibásodás valószínűsége.

A kádgörbének megfelelően a rendszerek életciklusa három fő szakaszra bontható. Általánosságban igaz, hogy a beüzemelést követően gyakrabban, majd mind ritkábban



6.2. ábra. Az alkatrészek megbízhatósági függvénye, a kádgorbe [Rajz: Kiss A.]

fordulnak elő hibák (bejáratási szakasz). A legjobb, ha a bejáratási szakaszon sikerül túljutni addig, amíg a rendszert nem vették üzembe (próbaüzem!).

Ezután egy ideig elsősorban véletlen hibák fordulnak elő, amelyek közel egyenletes eloszlással jelentenek meghibásodást. Ez a működési tartomány. Ahogy telik-múlik az idő, csakúgy mint az ember, az eszköz is előregszik, nincs mit tenni.

Egyre nagyobb valószínűséggel lépnek fel problémák, míg végül bekövetkezik a nagy végső meghibásodás (tönkremenetel). Márpedig egy atomerőmű életében általában nem érdemes addig várni.

6.2. Meghatározások az MVM Paksi Atomerőmű Tár- sasági szakkifejezéstárból

Hogy ugyanazt értsük bizonyos fogalmakon, ide másolok két nagyon fontos meghatározást [Part]:

6.2.1. Idegen test

Minden anyag, amely nem része a rendszerelemnek, vagy nem a terv szerinti helyen van a rendszerelemen belül, és nem része a rendszerelemen levő közegnek. Határozott kontúrral, térbeli kiterjedéssel rendelkezik, és mérete olyan, hogy a közeg által elmozdítva az SZBV (SZBV: Szabályozó és Biztonság Védelmi) kazetta beszorulását, az üzemanyag pálca inhermetikusságát, vagy a fűtőelemen átáramló közeg mennyiségének csökkenését,

a hőátadás leromlását, továbbá a hermetizálási vagy a radioaktív kibocsátást megakadályozó funkciók romlását okozza, vagy okozhatja. Az a test, amelyet a karbantartást lezáró tervezett tisztaságellenőrzés során derítettek fel és távolítottak el, és bizonyítottan az adott karbantartási folyamatban keletkezett, nem tekinthető idegen testnek [NBSz].

6.2.2. Szennyeződés

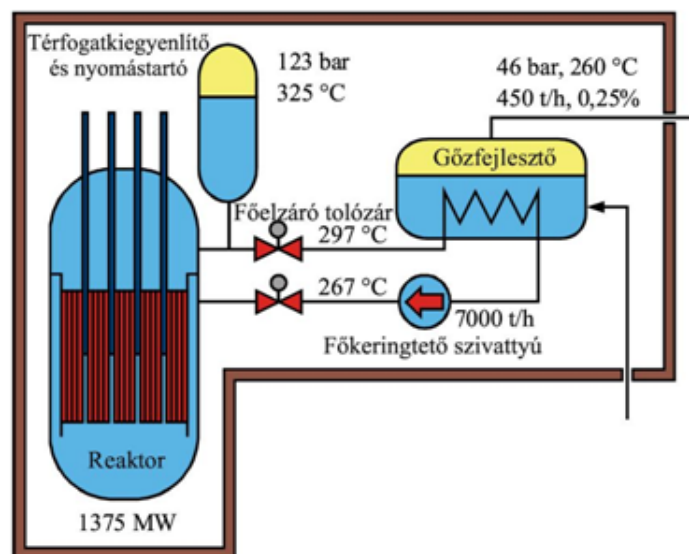
Szennyeződésnek kell tekinteni azokat az idegen testnek nem minősülő anyagokat, melyek előfordulása a vizsgált terjedelemben nem egyedi, valamint azokat az egyéb anyagokat, lerakódásokat, melyek a felületeken találhatóak, a normál körülmények között passzívált felületi réteg kivételével.

6.3. A primer kör főbb berendezéseinek áttekintése

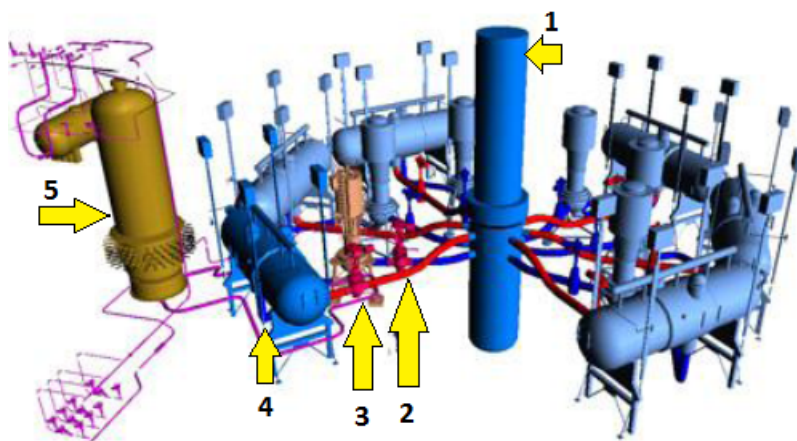
A Pakson használt VVER-440/V213-as reaktorok primer köre (6.3 és 6.4 ábrák) magába foglalja:

- a reaktort (6.3 ábra),
- a hat huroknyi primer körű csővezeték (6.3 és 6.4 ábrák),
- hurkonként két főelzáró tolózár (FET), egyet-egyet a meleg és hideg ágakban (6.3 ábra),
- hurkonként egy főkeringtető szivattyút (FKSz) a hideg ágakban (6.3 ábra),
- hurkonként egy gőzfejlesztőt (GF), ami egy közös elem a primer- és szekunder kör között (6.3 ábra),
- a térfogatkompenzátort (6.3 ábra),
- és üzemzavari hűtőrendszereket.

A reaktortartályban helyezkedik el a fékezőcsőblokk, és a reaktorakna (6.5 ábra). Az aknában foglal helyet a kosár a fékezőcső blokkra simulva. A kosárra ül rá a védőcsőblokk, s az egész a felső blokk zárja le. A fékezőcsőblokk, az akna, a kosár és a védőcső blokk együttesen a belső berendezések névre hallgatnak.



6.3. ábra. A paksi reaktorok primer körének a sémája

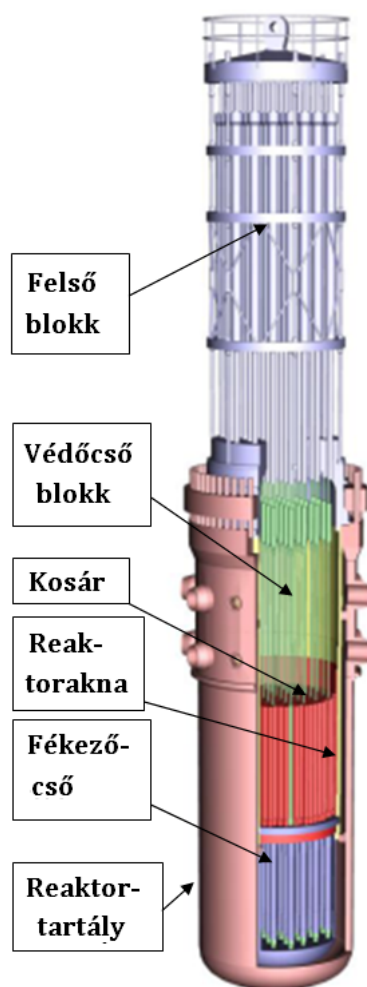


6.4. ábra. A Paksi Atomerőmű primerkörének főberendezései: 1 - reaktor, 2 - főelzáró tolózár, 3 - főkeringtető szivattyú, 4 - gőzfejlesztő, 5 - térfogat kompenzátor [PA Web]

6.4. Alkalmazott vizsgálati módszerek

6.4.1. Vizuális vizsgálatok az Atomerőműben

A vizuális vizsgálatokat általában alulértékelik. A legtöbb ember úgy gondolja, hogy ahhoz nem kell szakember, hogy odamenjen és megnézzze, ahhoz elegendő, ha van szeme.



6.5. ábra. A paksi reaktorok és a belső berendezések [Sitkei]

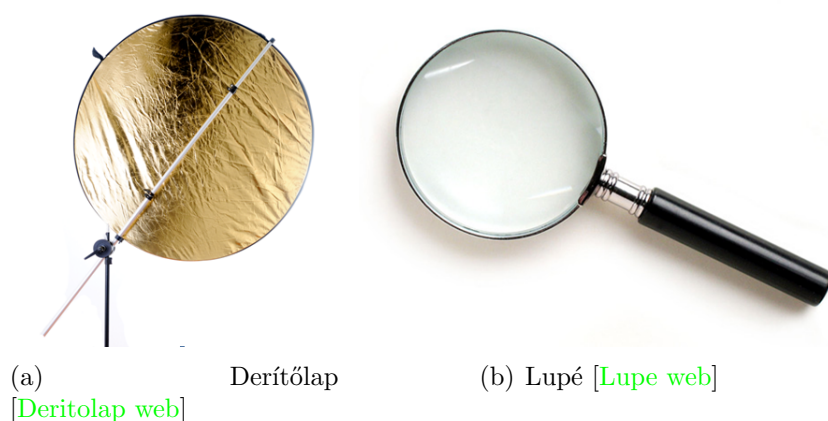
Ez persze nem így van. Nem elég nézni, látni is kell! Különösen igaz ez az atomerőművi anyagvizsgálatok esetében, hiszen vizuális vizsgálatot legtöbbször csak valamilyen eszköz segítségével tudunk elvégezni. Ilyen eszköz például egy endoszkóp, egy kamera, egy optika vagy egy távirányított robot, amely beviszi a kamerát, és világít a vizsgálatához.

Egy vizuális vizsgálattal csakis a felületet illetően kapunk közvetlen információt, minden egyéb értékelés tekintetében következtetésekre kényszerülünk. (Érdekes ezért egyéb vizsgálatokkal is kiegészíteni, de egyéb vizsgálatokat is érdemes párba állítani a vizuális ellenőrzéssel.

A vizuális ellenőrzéshez elengedhetetlenül fontos a megfelelő világítás. Erősségét illetően 300 luxot ír elő a szabvány. Ez általában nem adott, ezért érdemes mindig kézi-

lámpával kivonulnunk, ne a helyszínen érjen a meglepetés. Ha lehetőség van rá, mindig sűrűfényben vizsgáljunk, azaz a vizsgálati felületet, tárgyat aránylag kis szögben világítsunk meg! (No lám, milyen jó, hogy vittünk kézilámpát!) Így a tárgy felületén lévő egyenetlenségek, repedések, parányi horpadások stb. árnyékot vetnek, plasztikusabbá válik a kép, jobban észrevehetőek a további vizsgálódásra érdemes helyek. A 6.6 (a) ábrán látható egy parabolikus derítőlap. Jól megfigyelhető, hogy a 8 óra irányából beérkező fénysugár hogy válik a lap jobboldalán sűrűfénné, kiemelve ezzel a gyűrődéseket, illetve válik nem megfelelő megvilágítássá 12 óra irányában, a fénysugár túl alacsony beesési szöge miatt. Sűrűfény alatt nincs tökéletes felület (6.6 (a) ábra)!

Nagy segítségünkre lehet a vizsgálatnál egy közönséges nagyító, tudományos nevén lupé (6.6 (b) ábra). Nem véletlenül hordta Sherlock Holmes is magával! 3-5-szörös nagyításban a legtöbb esetben egyértelművé válnak a sűrűfény megmutatta eltérések és nyugodt szívvel hozhatunk döntést a további lépésekről.



6.6. ábra. Derítőlap és lupé

Persze ezek a segédeszközök csak azokban az esetekben használhatóak, ha oda tudunk menni a felülethez. Atomerőművi környezetben gondolkodva azonban többnyire nem tudunk személyesen odamenni. Vagy azért, mert egy cső belső felületéről, vagy belső teréről kell információ, nincs oxigén, vagy víz alatt van a vizsgálandó terület, esetleg sugárveszély áll fenn, de az igazi az, amikor mindez együtt van. Ilyenkor kerülnek elő a különböző vizsgálati eszközök.

A Paksi Atomerőműben használt vizsgálati eszközök közzé tartoznak a korábban már említett fiberszkópok továbbfejlesztett változatai, az endoszkópok (lásd 6.7 ábra).

Az első endoszkópok üvegszálakból (fiberekből – innen a fiberszkóp név) készültek, ma is alkalmaznak ilyeneket. Két üvegszálköteg, egy rendezett és egy rendezetlen alkot



6.7. ábra. A Paksi Atomerőműben alkalmazott egyik endoszkóp [[Endoszkóp web](#)]

egy fiberszkópot. A rendezetlen kötegen a megvilágítást oldjuk meg, a rendezett kötegen a képtovábbítást. A modern videoendoszkópok ezt parányi kamerával, miniatűr LED világítással oldják meg. És persze léteznek kombinációk is, azaz a fényt üvegszállal továbbítják, de kamera közvetíti a képet. Az üvegszálas képtovábbítás előnye, hogy nagyobb fényteljesítményt lehet közvetíteni, bár ez az előny a kamerák és a nagy fényerejű LED-ek fejlődésével lassan eltűnik. Az üvegszálköteg sérülékenysége viszont feltétlen hátránya az ilyen szondáknak. Egy mai modern endoszkóp AA méretű akkumulátorokkal működik, microSD kártyára rögzít JPG-t és AVI-t (HD felbontású képet közvetít) és természetesen a szonda vége egy kis joystick-el távirányítással mozgatható.

Kamerákat is alkalmazhatunk ahová beférnek, és ez a méret egyre kisebb! A Paksi Atomerőműben jelenleg 18,5 mm-es a legkisebb kameránk külső átmérője és az ipari gyakorlatban ez még nem számít különlegességnek! 34 mm-rel már van olyan dómkameránk, mely forog, billen, világít, fókuszál és zoomol. Persze az ilyen kis kamerák általában nem sugárzásállóak, de nem is mindig van erre szükség.

A kamerás vizsgálatok során – és ez igaz az endoszkópra is! – mindig tartsuk észben, hogy a kép, amit láthatunk, sok közvetítésen keresztül jut el hozzánk. Néha nehéz eldönteni, hogy amit látunk az mi is lehet. Nem szabad kapkodni, körül kell járni a kérdést lelkiismeretesen! Például egy labirinttömítés vizsgálata során könnyű csapágygolyónak kikiáltani egy arra tévedt és a labirintba szorult buborékot!

A sugárzásálló kamerák (lásd 6.8 ábra) korábban vidicon (saticon) csövekkel készülnek, ugyanis ezt a leképezést nem zavarja a sugárzás. Idővel a csövek üveganyaga megsötétül a sugárzás következtében (a gyakorlatban alkalmazott szakkifejezés: megsül) és jellemzően ez okozza a használhatatlanná válását.

Hátránya még az ilyen kameráknak nagyfokú érzékenységük a mechanikai igénybevételre. Elég egy kissé komolyabb koccanás és a csőnek vége. Ha ezeket a korlátokat szem



6.8. ábra. Sugárzásálló kamera: beépített világítással, forog, billen, zoomol
[VISATEC Gmbh web]

előtt tartjuk, akkor viszont jól használhatóak, éles, fekete-fehér képük extrém sugárzásban is sok információt nyújt.

Két igazán különleges kamerára hívnám fel a figyelmet:

- A 6.8 ábrán látható kamera egy sugárzásálló (vidicon csöves) kamera. Távirányítással forgatható, billenthető, még zoomolható is. Optikája nem barnuló üvegből készült. Hatalmas teljesítményű, beépített világítása segítségével nagyszerű képet produkál. Ilyen kivitelben egyedülálló a maga nemében.
- A VT-100 önjáró kamerával (lásd 6.9 ábra) csövek, légtechnikai alagutak, tartályok belsejében tudunk vizsgálni. Távvezérléssel irányítható. Saját, beépített világítással rendelkezik, kamerája forgatható, billenthető, zoomolható. Igazán praktikus eszköz!

A vizuális vizsgálatot általában a legolcsóbb anyagvizsgálati eljárások között sorolják fel. A fentiek tükrében az atomerőművi vizuális ellenőrzéseket alighanem más szemmel fogjuk nézni.

Atomerőművi alkalmazás

A vizuális vizsgálatok fejlődését megfigyelhetjük a közbensőrudak vizsgálatát bemutató videofelvételeken:



6.9. ábra. Távézérelt önjáró kamera. Beépített világítás, forog, billen, zoomol [Bacsikai P. foto]

Az 1990-ben készült "video 5 kozbensorud 1990 jo.avi" és a "video 6 kozbensorud 1990 torott.avi" egy megfelelő és egy törött kozbensorudat mutatnak be, az akkori színvonal adta minőségben:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_5_kozbensorud_1990_jo.avi

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_6_kozbensorud_1990_torott.avi

A "video 7 kozbensorud 2012.avi" videó a 2012-es év egy vizsgálatából mutat be egy részletet, amin egy megfelelő rúd látható. A különbség meglehetősen markáns:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_7_kozbensorud_2012.avi

1991-ben, egy alkalommal tükrökkel oldottuk meg egy kozbensorúd három oldali vizsgálatát. Akkor még nem állt rendelkezésünkre olyan mennyiségű kamera, mint manapság, ezért gondolkodással pótoltuk a tárgyi eszközöket. A vizsgálatból egy rövid bemutatót láthatunk a "video 8 kozbensorud tukor 1991.avi" videóban:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_8_kozbensorud_tukor_1991.avi

A tananyaghoz tartozó videók letölthetőek a "Videók letöltése" című interaktív animáció segítségével:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Videok_letoltese_D01.swf

6.4.2. Penetrációs vizsgálatok az Atomerőműben

A folyadékbehatolós vagy penetráló folyadékos módszer elvét mutatja be a "Penetrációs vizsgálat" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Penetracios_vizsgalat_D01.swf

A vizsgálat alapelvét korábban, a roncsolásmentes eljárások között ismertettük, ezért itt csak az atomerőművi alkalmazásra térünk ki.

Noha atomerőművi vonatkozásban jellemzően fémeket - leginkább vas alapú ötvözeteket – vizsgálunk ezzel a módszerrel, alkalmas más, szilárd anyagok vizsgálatára is. Korlátozó tényezők azért vannak! Porózus felület esetén a porozitás minden apró krátere indikációként fog megjelenni (hegesztési salakzárvány, kerámia felületek), megmunkálási nyomok (esztergált, mart felületek) és mélyebb karcok is előtűnhetnek mint hibák. A gyakorlat megtanítja az anyagvizsgálót az ilyen esetek többségének kiszűrésére, a maradék eldöntéséhez pedig egyéb vizsgálati módszereket hívhatunk segítségül. Sokan nem gondolnak rá, pedig lényeges szempont hogy a vizsgálóanyag összeférhető legyen a vizsgálandó anyaggal. Ez különösen polimerek vizsgálatánál lehet fontos szempont, ahol a tesztanyagok egyszerűen oldhatják a vizsgálati felületet. Atomerőmű vonatkozásában pedig, az ausztenites ötvözetek miatt, a primerkörben szigorúan korlátozzák a halogéneket, nehézfémeket:

- összes Klorid < 100 ppm,
- összes Fluorid < 50 ppm,
- összes Kén < 130 ppm,
- összes Ólom+nehézfémek < 45 ppm.

Ennek a korlátnak kevés termék felel meg!

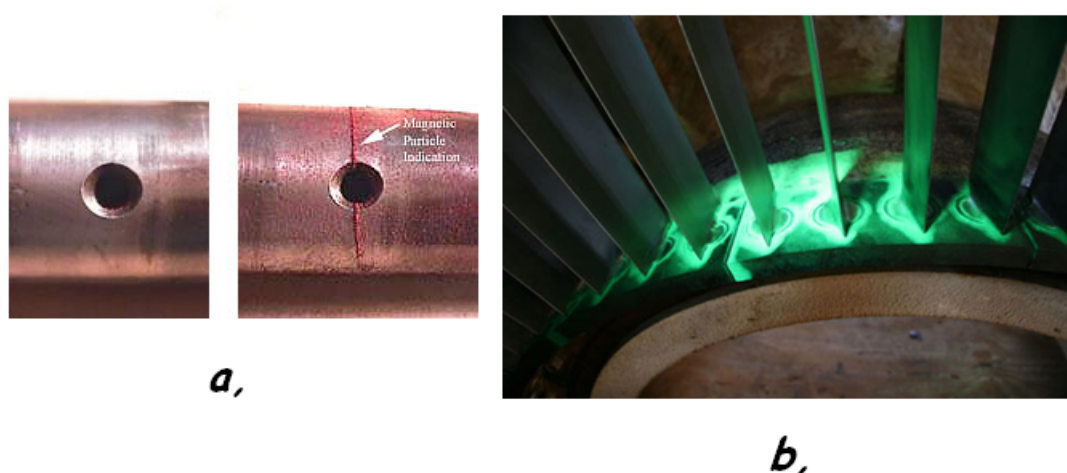
A penetrációs vizsgálat jellemzően +5-40°C között alkalmazható. Ennél hidegebb körülmények között rádermed a vizsgálati felületre, nem hatol be. Létezik kifejezetten magas hőmérsékletű vizsgálatokhoz is vizsgálóanyag! Ezt leginkább üzemi körülmények között végrehajtott vizsgálatokhoz alkalmazhatjuk, amikor a vizsgálati felület hőmérséklete akár meg is haladhatja a 100°C-t! A termékekhez adott technológiai utasításokat mindig olvassuk el és csak annak teljes megértése után alkalmazzuk a feltételeknek megfelelő vizsgálóanyagot!

6.4.3. Mágnesezhető poros (mágneses) repedésvizsgálat az Atomerőműben

A mágneses penetrációs vagy mágnesporos tesztelés elvét mutatja be a "Mágneses vizsgálat" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Magneses_vizsgalat_D01.swf

Emlékeztetőül a mágnesezhető poros vizsgálat elve az, hogy ha mágnesezhető anyagban annak mágneses permeabilitásától eltérő terület (anyagfolytonossági hiba, zárvány, törés, repedés stb.) van, annak hatására a mágneses erővonalak iránya megváltozik (lásd a 5.5 ábrát). Ha az erővonalakat láthatóvá tesszük, azok torzulásából következtetni lehet a hiba elhelyezkedésére, alakjára és méreteire (lásd a 6.10 ábrán). Ilyen vizsgálatot csak ferromágneses anyagokon lehet elvégezni. Atomerőművekben nagy számban alkalmaznak olyan alkatrészeket, amelyek ferromágneses anyagból készülnek.



6.10. ábra. A mágneses erővonalak torzulnak a repedés környékén: a, egy furat körül [NDT web], b, egy turbina lapátsor UV mágnesporos vizsgálata esetén, ahol figyeljük meg a látványosan megjelenő erővonalakat [Kbfiunio web]

A vizsgálat elméleti háttérét a roncsolásmentes anyagvizsgálatokról szóló fejezetben taglaltuk (lásd a 5.5), itt a gyakorlati ismeretek következnek. Az eljárásnak két fő változata létezik:

- a száraz poros,
- az emulziós (nedves).

Mindkettőnek megvan a maga előnye és hátránya. A száraz változat egyszerűbb és a felülethez közel eső hibák esetében pontosabb, de elfújja a szél a port, kényes a páratartalomra.

Az emulziós eljárás kisebb repedésméret esetében is nagyobb felismerési biztonságot tesz lehetővé, s bár kevésbé pontos, kevésbé is kényes. Ezért ipari körülmények között jellemzően ezt a módszert alkalmazzuk.

Az emulziós vizsgálati módszerből is kétféle van:

- a színes (színkontrasztos),
- és az UV-s.

A színes eljárás során (ha a felület megkívánja, egy könnyen eltávolítható alapozó festék felhordása után), a felmágnesezett felületre színes, mágnesezhető emulziót viszünk. Az emulzió színezett (lehet fekete, de piros, vagy narancs is. A lényeg, hogy az alapfestéktől nagy kontraszttal elüssön), mágnesezhető részecskéket tartalmaz, melyek az erővonalak irányában rendeződnek el s ez az elrendeződés egyszerűen és jól megfigyelhető. A UV-s vizsgálat annyiban egyszerűbb, hogy nem kell alapfestéket felhordani, ezzel szemben az emulzió fluoreszcens festésű mágnesezhető részecskéket tartalmaz, melyeket UV fényben láthatunk jól.

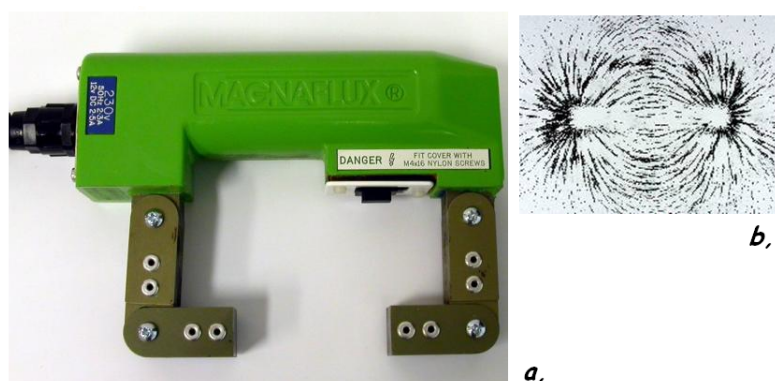
Mindkét emulzió felhordható gyakorlatilag bármivel: szórás, ecset, vödör. Az UV eljárás jól automatizálható, mert bemerítés után azonnal mágnesezhető, vizsgálható a darab. Mivel az emulziók jellemzően vízbázisúak, egyszerűen lemoshatóak, környezeti terhelésük minimális. Az erőműben előszeretettel használjuk az UV módszert, mert a csövek közt általában sötét van, ami ennek a módszernek kifejezetten kedvező. S ha már az UV lámpának úgyis kell áram, akkor már elektromágnessel mágnesezünk.

A vizsgálat korlátai

Ez a vizsgálati forma olyan hibák felderítésére alkalmas, melyek a felületre nyitottak, vagy legalábbis a felület közelében helyezkednek el, legfeljebb 3-6 mm mélységben. Ez függ az alkalmazott térerőtől, (mely elektromágnes esetében nyilván az áramerősséggel áll arányban), valamint attól is, hogy váltakozó, vagy egyenárammal vizsgálunk.

Az egyenáram mágneses tere mélyebbre hatol az anyagba, mélyebben fekvő hibákat is jól megmutat, a váltakozó áram viszont könnyebben „kanyarodik”, tagolt, alakos darabok vizsgálatára során jobban alkalmazható.

Vegyük figyelembe, hogy a hiba hosszának és szélességének aránya befolyásolja a kimutathatóságot! Tapasztalat szerint a szélességnek legalább háromszorosa kell hogy legyen a hiba hossza. Legjobb, ha az alkalmazott mágneses mező erővonalai derékszöget zárnak be a repedés hossz tengelyével. Ez persze nem szokott összejönni, de 45 fokig biztonsággal kimutathatóak az indikációk. Ezért a járommágnest (lásd a 6.11 ábrát) úgy kell felhelyezni, hogy a várható repedési irányra nagyjából merőleges legyen.



6.11. ábra. Járommágnes (a, rész balra) és gerjesztett erőtere (b, rész jobbra) [Grimas web]

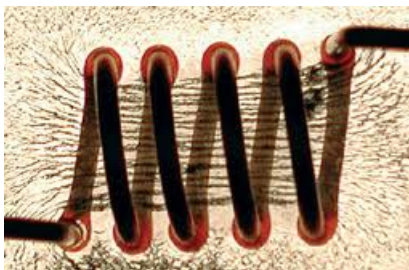
Ha nem tudjuk meghatározni ezt az irányt, akkor két, egymáshoz képest derékszögben végzett vizsgálatot kell végrehajtani. Ilyen esetekre szolgál a 6.12 ábrán látható keresztmágnes, mely váltakozó kapcsolással hol az egyik, hol a másik irányt kapcsolja be.



6.12. ábra. Keresztmágnes („néglábú”) [Grimas web]

Festék, vagy bevonat – ha nem mágnesezhető! - maximum 0,075 mm-ig nem befolyásolja a vizsgálat hatékonyságát. Ha a bevonat maga is ferromágneses, akkor csak 0,025 mm-ig engedhető meg. Jellemzően hosszirányú darabok (tengelyek, rudak) vizsgálatához tekercsmágnesezést használnak. Az áramjárta, szigetelt menetekből álló tekercs gerjeszt

tett erőterének iránya, a tengely irányával megegyezik, így a hibák várható orientációjára merőleges (lásd a 6.13 ábrát).



6.13. ábra. Tekercsmágnes és gerjesztett erőtere [[Tudasbazis web](#)]

Próbatestek

A térerő irányát és megfelelő nagyságát legegyszerűbben Berthold-tárcsával állapíthatjuk meg. ez a kis segédeszköz a legnépszerűbb ellenőrzőtest a mágneses vizsgálói gyakorlatban. Tokozott, négy szeletből álló körtárcsa, mely a felmágnesezett vizsgálati felületre helyezve, egy lépésben megmutatja, kimutatja nekünk mindkét fontos jellemzőt (lásd a 6.14 ábrát).



6.14. ábra. Berthold-tárcsa: figyeljük meg a zölden ragyogó indikációt [[Helling Gmbh web](#)]

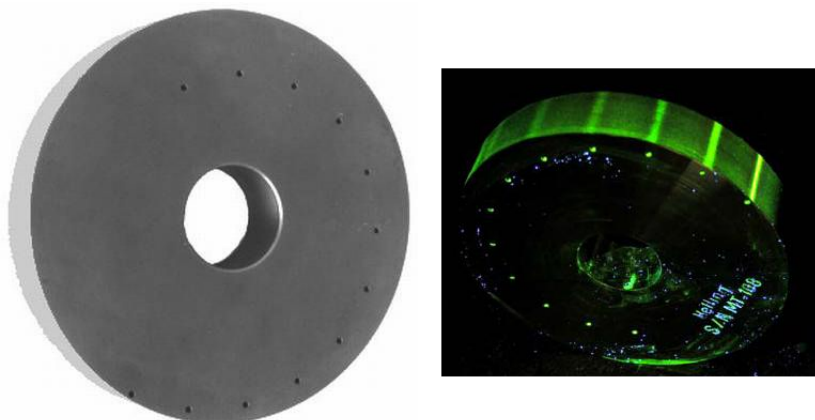
Többféle folyadék között válogathatunk, melyeknek bizonyos jellemzői eltérnek egymástól. Az MTU tárcsával (lásd a 6.15 ábrát) ellenőrizhetjük, hogy ha például alacsonyabb hőmérsékleten szeretnénk vizsgálni a megszokottnál, az adott vizsgálófolyadék fagyáspontja megfelelő-e, vagy éppen viszonylag magas hőmérsékleten alkalmazható-e egy másik. A tárcsa megfelelő hőmérsékletre hűtésével, melegítésével egyszerűen megállapíthatjuk. Ez a próbatest egyébként penetrációs vizsgálófolyadékok ellenőrzésére is alkalmas.

Egy speciális darab, a Ketos tárcsa (lásd a 6.16 ábrát). A rajzon (a 6.16 ábra, bal oldali kép) láthatjuk, hogy 12 furatot helyeztek el a központi furat körül, különböző távolságokban. A furatok átmérője – az egyszerűség kedvéért - 0,07” (1,78 mm). Ha áramot



6.15. ábra. MTU tárcsa: balra természetes fényben, ezért a repedések nem láthatóak ([[Grimas web](#)]); jobbra UV fényben, ami miatt a repedések ragyogó zöld indikációja kitűnően megfigyelhető ([[ELECTRO-SPECT TESTING INC. web](#)])

folytatunk át egy szigetelt vezetővel a központi furaton, a kis furatok indikációja megjelenik a tárcsa külső felületén (a 6.16 ábra, jobb oldali kép). Minél közelebb van a kis furat a palásthhoz, annál erősebben fénylik az indikáció. Segítségével megállapíthatjuk, hogy milyen mélységig mutatható ki egy hiba az adott paraméterekkel. Így megállapíthatjuk a vizsgáló folyadék megfelelőségét a kérdéses feladathoz.



6.16. ábra. Ketos tárcsa: a baloldali képen a tárcsa természetes fényben ([[TCP-online](#)]), míg a jobboldali képen a tárcsa UV fényben látható (figyeljük meg a furatok és a tárcsapalást távolságának függvényében egyre elmosódóbb indikációkat) [[SlovCert](#)]

Atomerőművi alkalmazás

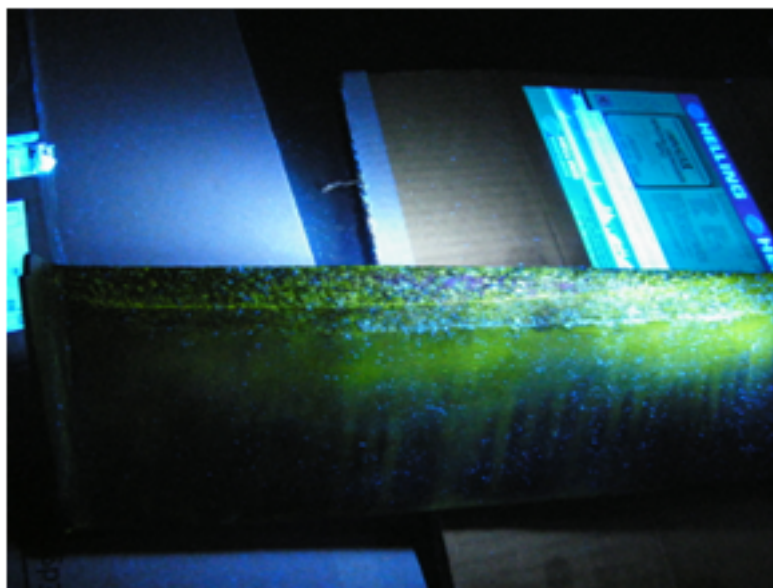
A mágneses repedésvizsgálat és a festékbepatoló vizsgálat (penetráció) területei között vannak átfedések. Vannak azonban olyan vizsgálatok, melyek esetében csak a mágnes lehet megoldás, mert a felszín közelében elhelyezkedő hibák valószínűek. Egyik leglátványosabb vizsgálat a turbina vizsgálata. A ház osztósíkján végzett vizsgálatnál a furatok feszültséggyűjtő hatása miatt keletkező repedéseket keressük (lásd a 6.17 ábrát).



6.17. ábra. A Paksi Atomerőmű egyik turbinaházának mágnesezhető poros vizsgálata: 2013 őszéig szerencsére nem találtak indikációt [Bacsikai P. foto 2]

A mágneses vizsgálatokhoz a szakismereteken és gyakorlaton kívül nem árt egy kis berendezéssmeret sem! Ha nem tudjuk mit is vizsgálunk, s nem „látjuk bele” az erővonalat, hamar alászaladhatunk egy-egy melléfogásnak! A turbinánál maradvánnyal, érdekes vizsgálat a felújított turbinalapátok vizsgálata (lásd a 6.18 ábrát). A felszórta kopásálló réteg pereme, mint indikáció jelenik meg, de ebben az esetben csak a geometriai hatás érvényesül. Ugyanakkor egy rutintalan kolléga hajlamos elsápadni a feltárt „hiba” méretét látva. A kezdő anyagvizsgálót könnyen megtéveszti a különböző anyagminőségek (szórással felhordott kopásálló réteg és a lapát alapanyaga) közötti határon megjelenő indikáció. Ez persze derűtséget kelt a rutinos szakemberek körében, de a segítségükkel így szerzett tapasztalat bőven ellensúlyozza azt a bajusz alatti mosolyt!

Érdekességként említeném meg a „vasfolyadékot”, ami egy olyan folyadék, amelyben kb. 10 nanométer (0,00001 mm) méretű magnetitrészecskéket szuszpendáltak. A finom eloszlás révén folyadékként viselkedik, de mágneses erő hatására megváltoztatja tulajdonságait. Anyagvizsgálati célokra történő alkalmazása eddig nem történt meg, de a folyadék Ferrofluid (lásd a 6.19 ábrát) néven kereskedelmi forgalomban is kapható, s a



6.18. ábra. Turbina lapát mágnesezése [[Bacsikai P. foto 2](#)]

felnövekvő anyagvizsgáló generációra vár egy látványos és különleges vizsgálati eljárás kidolgozása ezzel a különleges anyaggal.



6.19. ábra. Ferrofluid [[University of Queensland web](#)]

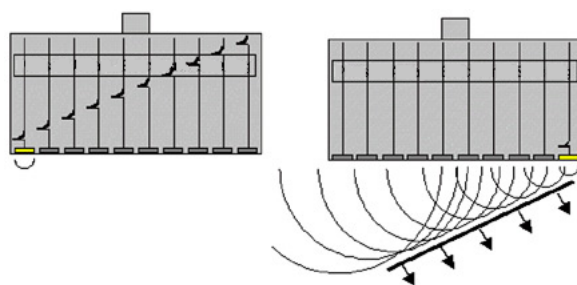
6.4.4. Ultrahangos vizsgálatok az Atomerőműben

Emlékeztető gyanánt, az ultrahangos vizsgálat elvét mutatja be az "Ultrahangos vizsgálat" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Ultrahangos_vizsgalat_D01.swf

Az ultrahangos vizsgálat alapjait nem tárgyaljuk itt, mivel egy korábbi fejezetben már ismertettük e vizsgálatot (lásd a 5.18 ábrát), így itt csak az atomerőművi alkalmazásra a fázisvezérelt gépi ultrahangos vizsgálatra koncentrálnunk.

A fázisvezérelt ultrahangos fej több különálló piezoelektromos kristályt tartalmaz, mátrixba rendezve. A kristályok bármelyike egyedileg vezérelhető, így azok számítógéppel vezérelt egyedi - pl. egymáshoz képest késleltetett - megszólaltatásával, tetszőleges alakú hullámfrontot hozhatunk létre (lásd a 6.20 ábrát).



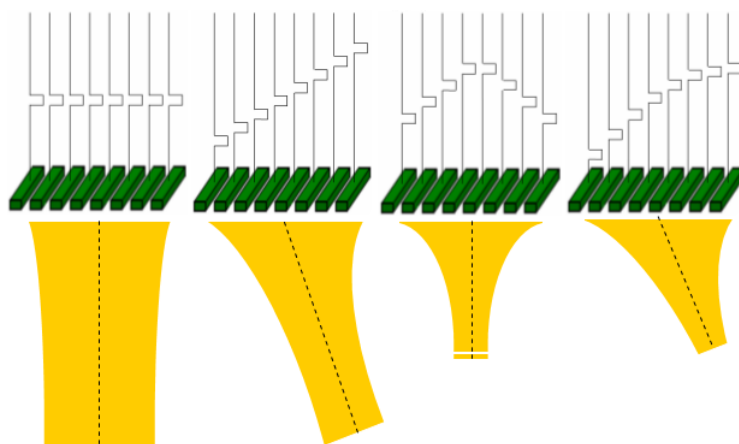
6.20. ábra. Fázisvezérelt fej gerjesztett hullámfrontja
[Heavy Engineering Research Association web]

Egyetlen fej alkalmas lehet a 0 foktól 70 fokig terjedő, vagy akár még nagyobb szögű vizsgálatra is, bármilyen – tehát nem csak függőleges, vagy vízszintes - irányítottsággal (6.21 és 6.22 ábrák).

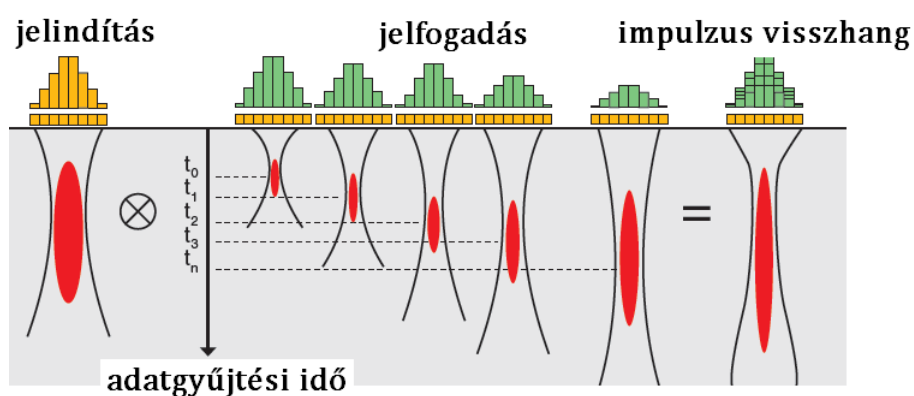
Ezek a lehetőségek teszik fokozottan alkalmassá automatizált vizsgálatok elvégzéséhez. Ilyen vizsgálatokat végzünk rendszeresen a reaktortartályon és annak csatlakozó csomópontjain. Az ultrahangos vizsgálófejeket fogasívekre rögzített kocsi viszi és koordináta jeladóval biztosítja az ismételt vizsgálatok pozícióhelyességét. Az eredmények összehasonlítása lehetővé teszi a vizsgálati helyek változásainak pontos követését. A digitális rendszernek köszönhetően a képek rögzítése is magas színvonalon oldható meg.

A vizsgálat felbontása nyilván az alkalmazott fejben lévő egyedi kristályok számától (is) függ. Ezek 16 és 256 közötti elemszámú, szabályos elrendezésben vannak, mely nem csak négyzet, vagy téglalap, de akár kör, vagy ellipszis is lehet. Az általában használt vizsgálati frekvenciák 1 és 10 MHz közé esnek.

A fázisvezérelt fejek eredeti, orvosi célú alkalmazását hamarosan követte az ipari felhasználás. Segítette az elterjedést, hogy különböző akusztikai tulajdonságokkal rendelkező anyagokhoz remekül adaptálható, hiszen a digitális vezérléssel a gerjesztett hullámok



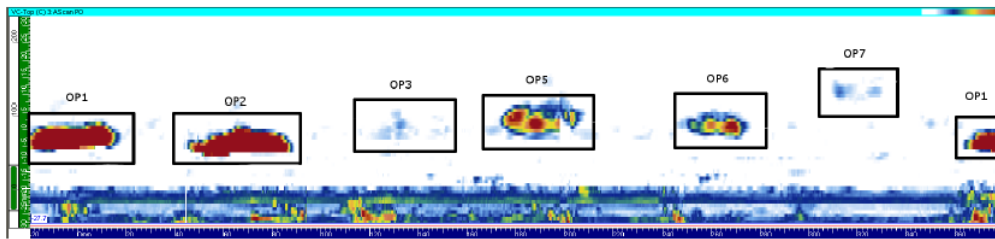
6.21. ábra. A sokrétűen használható fázisvezérelt fejek főbb hullámképzési lehetőségei (balról jobbra:) nincs késleltetés, tetszés szerinti szög, fókuszálás, fókuszálás tetszés szerinti szögben [Olympus web]



6.22. ábra. Dinamikus fókuszálás [Olympus web]

minden jellemzője optimálisan állítható be, nagy pontosságú vizsgálat végrehajtására alkalmassá téve ezzel a berendezést (lásd a 6.23 ábrát).

Számunkra ez azért fontos, mert a reaktortartály plattírozott anyaga, a csatlakozó csomkok szénacél, illetve a főkeringtető vezetékek csatlakozó tranziens varratai mind mind különböző jellemzőket követelnek meg (lásd a 6.24 ábrát).



6.23. ábra. Fázisvezérelt varratvizsgálat digitálisan rögzített képe. A színek a reflexió mélységét jelölik [PA foto]



6.24. ábra. Fázisvezérelt ultrahangos vizsgálófej és a tartályvizsgáló manipulátor (a kép a Karbantartási Gyakorló Központban készült)

6.4.5. Röntgenes és izotópos vizsgálatok

Az ipari gyakorlatban röntgensugárzással (egy ipari röntgenkészülék látható a 6.25 ábrán) vékony lemezeket, illetve polimereket, kompozitokat vizsgálunk.

Komoly helyeken – például erőművek, atomerőművek – inkább izotópot használunk (egy izotóptartó látható a 6.26 ábrán).

Az izotópok sugárzása - a röntgensugárzáshoz hasonlóan - áthatol az anyagon és annak sűrűségétől függő mértékben sötétíti el a másik oldalon megfelelően elhelyezett



6.25. ábra. Eresco 65 MF típusú ipari röntgenkészülék (a RÖNTGEN KANIZSA Kft. engedélyével) [[RÖNTGEN KANIZSA Kft web](#)]

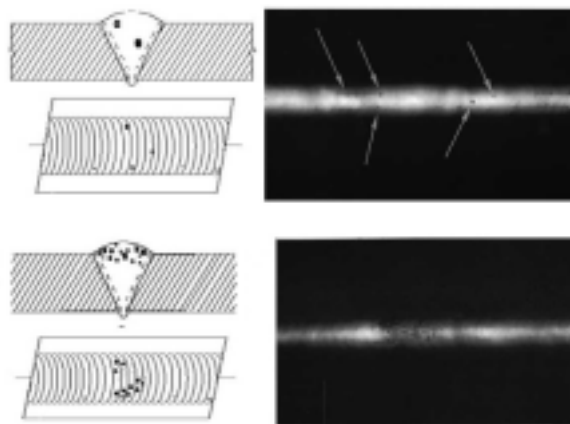


6.26. ábra. Gammamat izotóptartó (a RÖNTGEN KANIZSA Kft. engedélyével) [[RÖNTGEN KANIZSA Kft web 2](#)]

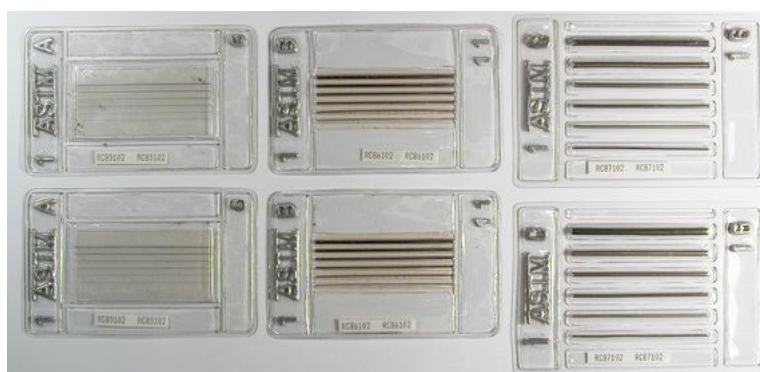
filmet. Így jól kimutathatóak az anyagszerkezet, illetve a hegesztett kötések hibái (lásd a 6.27 ábrát), repedések, sőt, egyéb különleges alkalmazásai is lehetségesek.

A kimutatható hibanagyságot célszerűen összehasonlító etalonnal állapítjuk meg, egy tűsorrall (lásd a 6.28 ábrát). A filmen megjelenő legvékonyabb tű jelenti a legkisebb kimutatható hibanagyságot. Érdekességgéppen jegyzem meg, hogy műanyagok vizsgálata során a tűsört damil, illetve damilsor helyettesíti.

Ezek a vizsgálatok leginkább térfogati hibák kimutatására alkalmasak. Éppen ezért, valamely egyéb, felszíni, vagy felszín közeli hibák kimutatására kitalált vizsgálattal párban szoktuk alkalmazni őket. Célszerűen penetrációs, vagy mágneses vizsgálatok e célra a legalkalmasabbak. Az orientációval rendelkező hibák nagyságának becslésére jellemzően nem alkalmas. Ilyen hiba lehet egy körtárcsával modellezhető hiba, melynek mérete más és más, aszerint, hogy milyen szög alatt látjuk. A sugárforrás mint fényforrás működik, tehát a kép mint egy pontszerűen megvilágított test leképezése jelenik meg, az efféle képek hibáit hordozva magával: vetülés, irányérzékenység stb. Értékeléskor mindezt tekintetbe kell venni.



6.27. ábra. Hegesztési hibák és leképezésük filmre [PA foto]



6.28. ábra. Különböző méretű tűsor etalonok. Alkalmazásuk a vizsgált anyag minőségétől, vastagságától függ, segítségükkel megállapíthatjuk az alkalmazott paraméterekkel kimutatható hiba méretét [Ke-Tech Kft web]

Az izotópos vizsgálatok nagyon komoly rendszabályokkal járnak, s ezeket bizony érdemes betartani figyelembevétel az ionizáló sugárzások potenciális egészségkárosító hatásait. A vizsgálati területet az alkalmazott dózis függvényében állapítjuk meg – nyilván minél nagyobb a dózis, annál nagyobb a terület -, s azt egyértelmű jelöléssel ellátott kordonnal körül kell keríteni, figyelmeztető táblákat kell kihelyezni. „Lövés” előtt – a felvétel elkészítési idejét nevezi így a szakzsargon – meg kell győződni arról, hogy senki nem tartózkodik a területen belül. Szigorú rendelkezések ezek és éppen ezért rendszeres oktatásban s részesülnek a szakemberek. A rendszabályok betartásáért egy személyben felelős a vizsgálatot vezető radiográfiai anyagvizsgáló.

Néhány érdekesebb alkalmazása ennek a vizsgálatitípusnak:

- a csernobili baleset után, bizony még Pakson is találtunk nehéz elemet. A dozimetriai ellenőrzések, az egyik virágágyásban a háttérnél nagyobb sugárzást mutattak ki. Kézi műszerekkel behatárolták a azt a kb. 100x100 mm-es területet, ahol a magasabb dózissal rendelkező anyag volt, s azt egy 10x10 mm-es négyzetrács beosztású papírlapra teregették. Ráhelyeztek egy röntgenfilmet, majd előhívták. A felvétel alapján meg is találták a parányi anyagdarabot,
- idegentest kimutatása csőben (behullott csavar),
- tolózár menetes orsója eltört. Kimutattuk, hogy a záróelem milyen pozícióban maradt,
- nagy átmérőjű csővezetékben a vízszint megállapítása.

6.4.6. Örvényáramos repedésvizsgálat a Paksi Atomerőműben

E fejezet megírásában nagy segítségünkre volt *Dóczy Miklós úr* (a Paksi Atomerőműtől), akinek szeretnénk megköszönni a hozzájárulását.

Az örvényáramos vizsgálat elvét mutatja be az "Örvényáramos vizsgálat" című animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Orvenyaramos_vizsgalat_D01.swf

Ha egy tekercsben váltakozó áram folyik, akkor a tekercs körüli térben váltakozó mágneses mező indukálódik. Ebben a mágneses térben az odahelyezett elektromos vezetőben – pl. a vizsgálati darabban, mely mondjuk egy cső - a változó mágneses mező hatására váltakozó áram indukálódik. Ezt nevezzük örvényáramnak. Elsősorban a felületre kifutó, vagy ahhoz közeli hiányok detektálására és méretük meghatározására alkalmas. Alkalmazható mágnesezhető és nem mágnesezhető anyagok esetében is, de a méret meghatározás megbízhatósága nem mágnesezhető anyagok esetében lényegesen nagyobb.

A keletkezett örvényáram iránya olyan, hogy az általa létrehozott mágneses mező az őt indukáló mágneses mezőt gyengíteni, „fékezni” igyekszik. A két mágneses mező eredője egy vektor, mely több tényező függvénye, de állandó körülmények között – pl. állandó falvastagság - állandó. Repedések, egyéb felületi hibák megváltoztatják a felületen indukálódó örvényáram nagyságát és ez a változás a rendszer impedanciájának megváltozását eredményezi. Az örvényáramos készülék ezt az impedancia változást érzékeli/regisztrálja. Az anyagvizsgálat során ezeket a változásokat mérjük és a változás mértékéből következtethetünk a felderített indikáció helyére és méreteire. A behatolás mélysége (Standard Depth of Penetration) az anyagminőség mellett leginkább a vizsgálati frekvenciától függ. Ennek kiszámítására több algoritmus is létezik, ezek egyike a Hocking féle képlet mely az ipari gyakorlatban talán a legkönnyebben használható:

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu}} \quad (6.1)$$

ahol

- δ – standard behatolási mélység, (mm),
- ρ – fajlagos ellenállás (μWcm) (ausztenites acél esetén = 72),
- f - frekvencia (Hz),
- μ – permeabilitás = 1,0.

Példa: az örvényáramok behatolási mélysége a frekvencia függvényében (ausztenites anyag esetén, a fenti képlettel számolva):

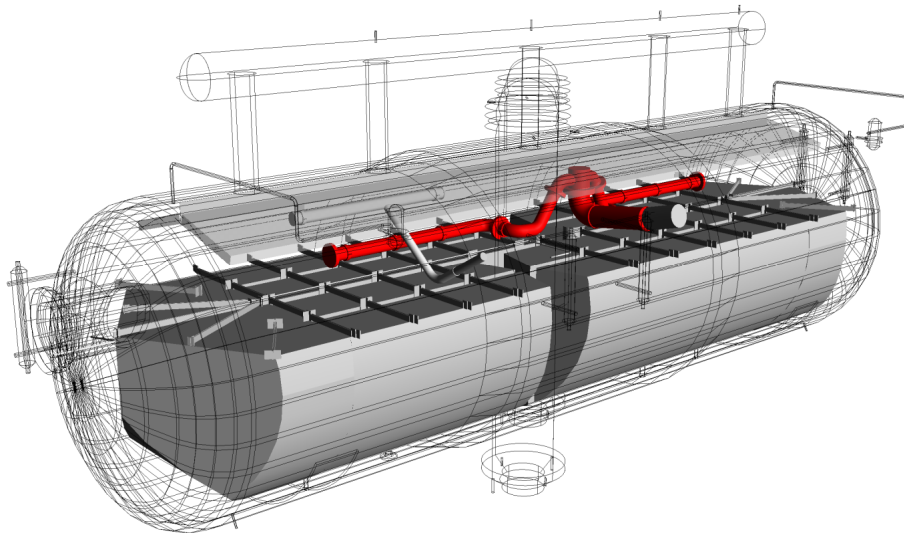
frekvencia (kHz)	behatolási mélység (mm)
20	3,00
50	1,89
120	1,22
200	0,95
400	0,67
600	0,55

6.1. táblázat. Az örvényáramok behatolási mélysége a frekvencia függvényében ausztenites anyag esetén

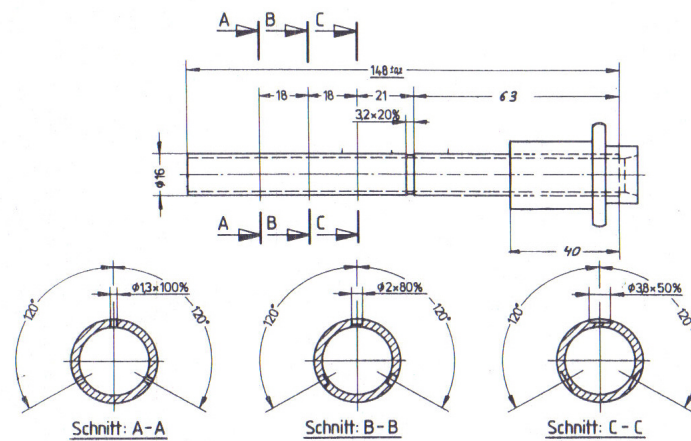
Érezhető, hogy egy ennyire az elektromosságra épülő vizsgálat jól digitalizálható, automatizálható és ez így is van. Érdemes olyan vizsgálati darabok esetén kihasználni ezt a lehetőséget, amikor nagy mennyiségű, zárt geometriájú – cső, négyszögszelvény - vizsgálati darabot kell ellenőriznünk, mert az ilyen jellegű darabok eleve megvezetik a szondát!

A Paksi Atomerőműben a gőzfejlesztők és a gőzkondenzátorok esetében alkalmazzuk ezt az eljárást (lásd a 6.29 ábrát). (A gőzkondenzátorok vizuális vizsgálata során már szóba került a vizsgálókamera, mint speciális céleszköz.)

Az örvényáramos repedésvizsgálat esetében alkalmazott szondák a vizsgált berendezés geometriájához alkalmazkodnak, nem szabványosított darabok. Ezért ez a vizsgálat pontos hitelesítést igényel a vizsgálat sorozat előtt és közben is! A gőzfejlesztő vizsgálata során a szondabevezető cső (6.30 ábra) egyben egy referenciadarab is, így minden egyes



6.29. ábra. Gőzfejlesztő sematikus rajza. A pirossal színezett tápvízelosztó kollektor alatt szürkével jelölt terület a hőátadó csövek halmaza [PA foto 2]



6.30. ábra. Örvényáramos szondabevezető tesztcső műszaki rajza [PA foto]

vizsgálat előtt rendelkezésre áll a hibátlan cső (0%-os hiba), a 20%, 50%, 80% és 100% hiba képe.

A gőzfejlesztő vizsgálata során nagy előnyként jelentkezik a manipulátor használata, így a vizsgálatot távvezérléssel, a sugárveszélyes helyektől távolról lehet végezni. Zárt hálózaton keresztül az értékelő közvetlenül hozzáfér az archivált mérési adatokhoz, így az értékelés a vizsgálattal egy időben is történhet, de attól függetlenül is. Az eredményeket digitálisan tárolják, s az így létrejött és egyre növekvő adatbázis segítségével naprakész információkkal rendelkezhetünk a berendezésekről.

A gőzkondenzátor esetében a szonda mozgatása kézi erővel történik. Ennek egyik oka a szekunder kör környezete, a másik a könnyű hozzáférés. Az adatrögzítés, értékelés és archiválás módszere ugyanaz.

A gyakorlatban a vizsgálat adatfelvételi központja egy konténer, mely az ellenőrzött zónában van, benne fixen telepítve az összes vezérlő számítógép és vezérlőegység. Az értékelés egy, a szekunder körben telepített konténerben történik, ahová optikai kábelrel küldjük ki az adatokat. Az értékelés, az adatfelvételtől időben függetlenül történik.

A gőzfejlesztő kollektoraiba telepített manipulátorok tolják be a szondát a hőátadó csövekbe, majd a kihúzás során történik az adatfelvétel. Azért a kihúzás során, mert így a szonda sebessége egyenletesebb, a vizsgálat pontossága szempontjából ez megfelelőbb. A mért impedanciaváltozások mellé társulnak az út- és koordinátaadatok is, így nagy pontossággal megállapítható, hogy mekkora hiba, milyen távolságban található, pontosan melyik csőben.

20%-os hibanagyságtól regisztrálni, és rendszeresen vizsgálni kell a csövet. Ha a hiba mérete meghaladja a kritikust, a hőátadó csövet ledugózzuk, kizárva ezzel a primer-kör hűtőközeg szekunder körbe kerülésének veszélyét. A gőzfejlesztő hőátadó csöveinek száma elegendő tartalékot hordoz ahhoz, hogy a jelenlegi elhasználódási tendenciával kalkulálva, a meghosszabbított élettartamba is beleférjen.

Maga a ledugózás ugyanezzel a manipulátorral, de egy másik supporttal (lásd a 6.31 ábrát) és másik szakembergárdával történik. A dugókat, behelyezésük, beprézelésük után automatával lehegesztik, majd vizuális anyagvizsgálattal ellenőrzik. Előfordul, ha nem is gyakran, hogy valami miatt az automata hegesztés nem jön össze. Ilyenkor bizony le kell mászni a kollektorba és kézzel kell bevarni a dugót.

Ezután az anyagvizsgálók is lemásznak és "megpenetrálják" a varratot. Mindenkinek van tíz perce a maga műveletére. Tehát a hegesztő meghegeszti és feljön, majd egy anyagvizsgáló végrehajtja a vizuális ellenőrzést és beszórja a varratot pirossal s feljön. A megfelelő idő (10-15 perc) elteltével, egy másik anyagvizsgáló lemegy és a varratot letisztítja, majd felszórja az előhívó festéket. Ezután feljön és lemászik az utolsó anyagvizsgáló is, aki kiértékeli a penetrációs vizsgálatot és letakarítja a varratot és feljön. Nem valami kellemes munka.



6.31. ábra. Kraftwerk Union gyártmányú feltét (support). Baloldalt látható a vízszintes helyzetű szondabevezető és referencia cső. A support árboca lehetővé teszi a vezérelt függőleges és a poláris mozgásokat

6.4.7. Akusztikus emissziós vizsgálatok a Paksi Atomerőműben

A Paksi Atomerőműben a gépi ultrahang hibahely-meghatározó pontosságát párosítottuk az akusztikus emissziós vizsgálatnak azzal a számunkra igen kedvező tulajdonságával, hogy egyetlen mérés (t.i.: a fővízköri nyomáspróba) alatt, a szerkezet egészét képes figyelni, s az esetleg más eljárásokkal meg sem közelíthető (építészeti, geometriai vagy élettvédelmi okok miatt) helyekről is értékes adatokat szolgáltat [[Bacsikai](#)].

További igen hasznos tulajdonsága az akusztikus emissziós vizsgálatnak minden más vizsgálatnál szemben, hogy a szerkezetet egy számunkra ismert és jól meghatározott, mérhető terheléssel terheljük. A mérés során csak az adott terhelési szinten aktív hibák emittálnak jeleket, így az akusztikus emissziós vizsgálat, mint egy szűrővizsgálat, jelzi számunkra, hogy kell-e más, időt és pénzt nem kímélő hagyományos vizsgálatot végezni, vagy sem. Ugyanakkor a "hagyományos" vizsgálatokkal szemben nagyon nagy hátránya az ismeretlenség. Évtizedek óta ismertek a vizuális vagy penetrációs eljárások, az ultrahang, az izotópos felvételek. Az üzemeltetők megszokták, hogy centiméteres vagy milliméteres pontossággal meghatározott koordinátákkal kapnak egy rajzot a behatárolt hiba alakjáról, méretéről.

A megszokott módszerekhez képest újdonság egy olyan vizsgálat, amely egy éjszaka

alatt eredményt szolgáltat például a reaktortartályról, melynek egyes kitüntetett helyeken végzett ultrahangos vizsgálata több mint egy hetet vesz igénybe. A vizsgálat újszerű volta a szemléletváltáson túl új fogalmak bevezetését is szükségessé tette [SzucsP]. Nem, vagy nem jól alkalmazhatóak az eddig használatos regisztrálási határ, hiba határ fogalmak.

Az akusztikus emissziós forrás kritikusságának mértékét két jellemzője határozza meg, az intenzitása és az aktivitása. Intenzitása alatt értjük jelének amplitúdóját és rezgésszámát, aktivitása alatt jeleinek számát, gyakoriságát. Ezekből a forrás által kibocsátott energiára tudunk következtetni. Aktív az a forrás, amelyből származó hangesemények időarányos száma nő állandó, vagy növekvő terhelés hatására. Intenzív, ha hasonló feltételek mellett az események energiája és rezgésszáma növekszik. Kritikusan aktív, vagy intenzív az a forrás, melynek esetében a növekedés mértéke maga is nő állandó, vagy növekvő terhelés hatására. Az 6.32 ábrán, mint egy koordináta rendszerben, láthatjuk a fentieket a biztonsági szempontok szerint összefoglalva.

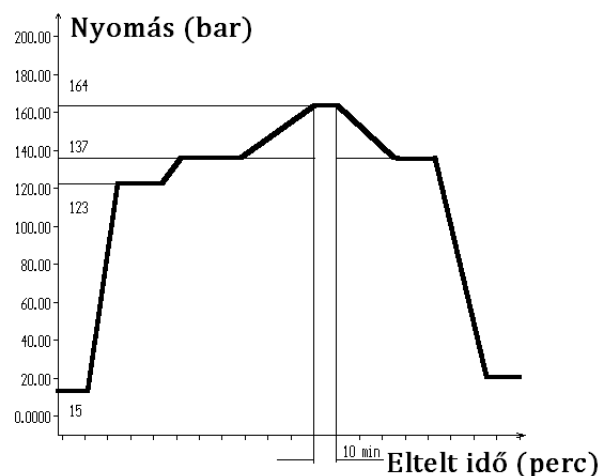
KRITIKUSAN INTENZÍV	A szerkezet integritása nem megfelelő. Azonnal megvizsgálni más módszerekkel is.	A szerkezet integritása nem megfelelő. Azonnal megvizsgálni más módszerekkel is	A szerkezet integritása nem megfelelő. Azonnal megvizsgálni más módszerekkel is
INTENZÍV	Rögzíteni a források helyét. Támpont későbbi vizsgálatokhoz	Lehetőleg ellenőrizni más módszerekkel is. Támpont későbbi vizsgálatokhoz	A szerkezet integritása nem megfelelő. Azonnal megvizsgálni más módszerekkel is
KIS INTENZITÁSÚ	Nem kell analizálni.	Rögzíteni a források helyét. Támpont későbbi vizsgálatokhoz	A szerkezet integritása nem megfelelő. Azonnal megvizsgálni más módszerekkel is
	KIS AKTIVITÁSÚ	AKTÍV	KRITIKUSAN AKTÍV

6.32. ábra. Akusztikus események osztályozása, biztonsági szempontból [Bacsikai]

Megjegyzésként említem meg, hogy az intenzitás számítása külön-külön történik a nyomáspróba különböző szakaszaira [Bacsikai].

A Paksi Atomerőmű fővízkörén, éppúgy, mint minden nyomás alatt működő berendezésén hatásági nyomáspróbát tartanak (6.33 ábra).

A reaktortartályok esetében ez négyéves ciklusidővel történik meg. Az egyik nyomáspróbát az első szakaszában leállították, s másnap került sor az újabb -immár sikeres- nyomáspróbára. Ennek következtében kiválóan detektálhattuk a Kaiser-effektus megjelenését a reaktortartályon. Mivel a tervezett nyomásgörbében (6.33 ábra) nincs a



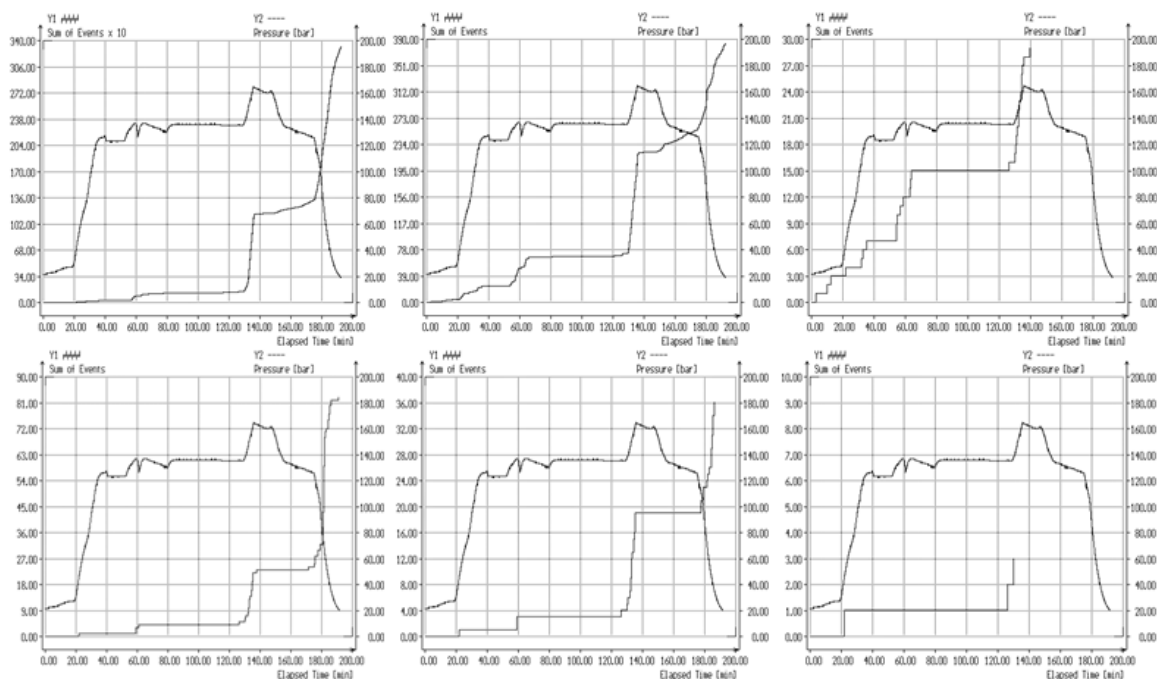
6.33. ábra. A fővízköri nyomáspróba tervezett nyomásgörbéje, az idő függvényében [PA]

nyomáscsökkentés után újbóli nyomásemelés, a Kaiser-effektus detektálása csak kivételes alkalmakkor lehetséges [Bacskai2], ugyanis – mint a majd hivatkozott előadás is bemutatja - a négyéves ciklus alatt a reaktortartály relaxálódik (A reaktortartályba a nyomáspróba során extrém terhelést viszünk be. Az így megváltozott belső feszültségi állapot, az egyéves üzemidő állandónak tekinthető hőmérséklete feszültségi állapota miatt, nagymértékben leépül. Mivel két nyomáspróba között négy üzemidő ciklus telik el, a relaxáció teljesnek tekinthető. Lásd még [Vero-Kaldor]).

A 6.34 ábrán mutatjuk be a reaktortartályon akusztikus emisszióval monitorozott területeket. Bár az 5/6 varraton is jól kimutatható volt a jelenség, a csonkzónában látványosabban figyelhettük meg, egyéb, külső eredetű, a nyomáspróbával együtt járó körülmények miatt. Ezért most csak azt a területet tárgyaljuk. Érdekességgéppen megjegyezném, azóta sem volt példa megismételt nyomáspróbára, tehát a jelenség valóban egyedi a maga nemében!

Az akusztikus emissziós érzékelők pozícióit a csonkzónában a 6.35 ábrán láthatjuk. Az ábrán a reaktor csonkzónájának kiterített ábrája látható. 1-6 számozással a hurkok, illetve ZÜHR jelöléssel a Zóna Üzemzavari Hűtő Rendszer beömlőcsonkjai láthatóak. KIP jelöléssel a csonkzóna méréseinek kivezetése látható. Az X tengelyen az 5 hurok középvonalától mért kerületi távolság, az Y tengelyen a csonkzóna szerelési felületétől mért távolság látható, mm-ben megadva. Figyeljük meg, hogy a csonkok középvonalában elhelyezett érzékelők egyszerre két array-t (azaz egységet, jelen esetben négy érzékelőből álló egységet) szolgálnak ki. Így az a8 érzékelő az a5, a6, a7 és a8 érzékelők egységébe is tartozik, de ugyanez az érzékelő a2 néven az a1, a2, a3, a4(b14) array eleme is.

Ezzel a szellemes megoldással kevesebb érzékelő alkalmazásával is nagy pontossággal



a, ábra

A nyomás és a 21 dB-nél nagyobb amplitudójú események az idő függvényében

b, ábra

A nyomás és a 36 dB-nél nagyobb amplitudójú események az idő függvényében

c, ábra

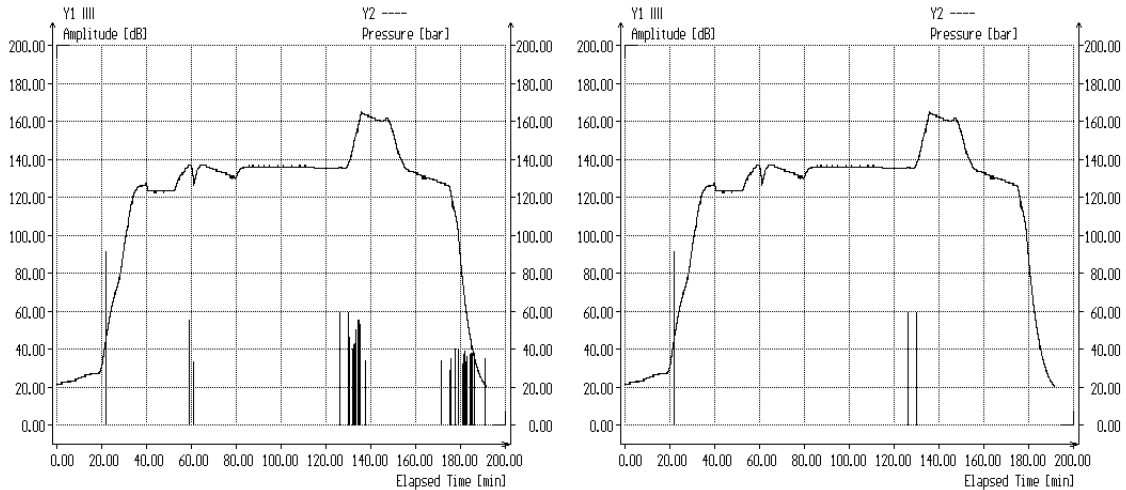
A nyomás és az 56 dB-nél nagyobb amplitudójú események az idő függvényében

6.36. ábra. A reaktortartály csomakzóna akusztikus emissziós mérése: felső képeken az összes esemény összegek, míg az alsó képeken a lokalizált esemény összegek láthatók [KFKI AEKI]

A 6.36 ábra (a) részén láthatjuk a 21 dB-es amplitúdót meghaladó - tehát viszonylag kis intenzitású - eventeket (event: beérkező jelcsomag, esemény) az idő függvényében. Jól megfigyelhető, hogy a kezdő - 123 bar alatti - szakaszban, alig néhány regisztráció történt. (Mivel a beérkező jelcsomagok egy része technológiai eredetű zaj, ezért értékelés szempontjából a lokalizált eseményeket tekintjük mértékadónak. A nem lokalizált eseményeket tájékoztató jelleggel vesszük figyelembe.) A 6.36 ábra (b) és (c) részén ez a jelleg majd fokozottan jelentkezik.

A 6.36 ábra (b) részén a 36 dB-nél nagyobb amplitúdóval rendelkező eseményeket láthatjuk. A jelek mennyiségének csökkenéséből adódik a görbe szögletesebb jellege. A 6.37 ábrán később majd láthatjuk, hogy míg a 21 dB-es szűréssel a b1 detektor kimagaslóan aktív volt, elsősorban a nyomáscsökkenési szakaszban, addig a 36 dB-es szűrés az

a13 és a b1 detektorokat emeli ki, mégpedig a nyomásemelési, illetve nyomáscsökkentési szakaszban.



6.37. ábra. Az akusztikus emissziós események a reaktortartály nyomáspróbája során. Balra: 21 dB-nél nagyobb események, jobbra: 56 dB-nél nagyobb események [KFKI AEKI]

A 6.36 (c) ábrán az 56 dB feletti amplitúdóval beérkező események idő szerinti eloszlását kísérhetjük figyelemmel. Ezeket az eseményeket zömmel az a9, a13 és a b1 jelű detektorok jelezték. Figyeljük meg, hogy az érzékelők mindegyike 1. és 2. hurkok környékén helyezkedik el (lásd az 6.35 ábrán).

A 6.36 (c) ábrán láthatjuk, hogy a legnagyobb -56 dB feletti csúsamplitúdójú- lokalizált regisztrációk a nyomásemelési szakaszra jellemzőek. Ugyanitt figyelhetjük meg, hogy az 56 dB-nél nagyobb események száma elenyésző! Ezért tapasztalhatjuk az ábrának (56 dB-es szűréssel készített) a másik két eloszlástól (21 és 36 dB) eltérő jellegét.

Végkövetkeztetésként kijelenthetjük: a reaktortartály csonkzónájának akusztikus emissziós monitorozása során mintaszerűen jelentkezett a Kaiser-effektus. A második felterhelést követően, az észlelt akusztikus események jellemzően az előző terhelési szint felett jelentkeztek. Az a tény, hogy meghatározó részüik a nyomáscsökkenési szakaszokban jelentkezett, arra is enged következtetni, hogy a reaktortartály fémszerkezeti integritása megfelelő, noha ennek megállapításához az itt ismertetett eredmények önmagukban nem elegendőek [Bacsikai2].

Ám ezt a következtetést alátámasztják az akusztikus emissziós vizsgálati eredmények részletes elemzése is, összhangban a más, konzervatív vizsgálati technológiák eredményeivel, mely módszereket ezt megelőzően tárgyaltunk.

6.5. Idegentest kezelés a Paksi Atomerőműben

Az idegentestek kezelése magába foglalja a megelőzést, felderítést és eltávolítást a Paksi Atomerőműben. E tevékenységhez főleg a vizuális megfigyelés módszerét használják, de mint a következőkben látható ez egy komplex, néha nagyon kreatív megoldásokat igénylő tevékenység.

Szorosan nem tartozik az anyagvizsgálatok témájához, inkább azt mondhatjuk, hogy néhány anyagvizsgálati módszert felhasználó mérnöki területről van szó. Mivel viszont az Atomerőmű gyakorlatában napi szinten előforduló tevékenységről beszélünk, így érdemes röviden bemutatni a témát.

6.5.1. Idegentestek megelőzése

Kétségtelen, hogy a legnagyobb kellemetlenségeket okozhatja egy-egy kritikus helyre kerülő idegentest és eltávolítása gyakran komoly nehézségekbe ütközik. Mi több, néha nem is veszélytelen! Mindig egyfajta diadal egy ilyen művelet eredményes végrehajtása, de az ár, amit ezért a diadalért meg kellett fizetni általában túl magas, hiszen a berendezést rendszerint le kell állítani – esetleg több kiszolgáló berendezést is –, vagy főjavítási időszakban esetleg emiatt csúszik a berendezés visszaadása a karbantartást követően és az állásidő egy atomerőműben nagyon sokba kerül! Éppen ezért fontos, hogy magát a bekerülést előzzük meg, már a lehetőségeket csökkentsük minimumra. Milyen intézkedéseket tehetünk ennek érdekében?

Úgynevezett tisztaszerelési zónát (lásd a 6.38 ábrát) alakítunk ki (Ez egy olyan elkerített munkaterületet jelent, ahová csak engedéllyel szabad belépni, és csak listán rögzített eszközöket, anyagokat szabad bevinni, melyeket a kilépéskor ellenőrizni kell.): A fővízköri berendezéseket tartalmazó helyiségekben történő karbantartási, javítási, átalakítási munkák végzése esetén minden esetben tisztaszerelési zónát kell kialakítani. Ha a tisztaszerelési zónákban szereplő rendszerek berendezései közül akár egy is nyitva van, akkor a területet “1. Tisztaszerelési zónának” kell minősíteni, ellenkező esetben “2. Tisztaszerelési zónának.” [Part2].

A tisztaszerelési zónákba történő belépés feltételekhez kötött. Alapvetően csakis az léphet be, akinek ott dolga van. Kinek lehet ott dolga? Annak, akinek arra a területre érvényes, megnyitott munkautasítása (MUT) van a kezében, vagy akinek munkaköre ezt előírja (gépész, termester, munkavédelmi munkatárs, dozimetrikus). De még ők sem vihetnek be bármit, csakis egy összeállított lista szerinti eszközöket (6.39 ábra):

Az “1. Tisztaszerelési zónába” történő belépéskor a MUT FELADAT mellé egy listát kell készíteni a bevitt szerszámokról, mely listán a szerszám megnevezése és azonosítószáma kell, hogy szerepeljen. Ez a dokumentum a MUT mellékletét képezi és a munka befejezésével együtt kell, hogy leadásra kerüljön a MUT-tal a berendezésfelelősnek. Egy



6.38. ábra. Tisztaszerelési zóna [PA foto]

tisztaszerelési zónában végzett több munka esetén közös számlista alkalmazható, ilyenkor leadni csak azt az egy listát kell [Part2].

Természetesen a feltételek betartását bármikor ellenőrizheti az arra jogosult személy. A lista vezetéséért, annak pontosságáért a munkavezető a felelős. A listán belépéskor bejelöljük a bevitt eszközöket, majd kifelé jövet „kijelöljük” azokat. A hiányzó eszközökért - ha azok nem kerültek beépítésre - vissza kell menni és elő kell őket keríteni. Ha nincs meg, akkor jön a keresés, amit el akartunk kerülni, át kell nézni a berendezést, hogy nem pottyant-e be a „cucc”. Természetes emberi tulajdonság, hogy ilyenkor megpróbálunk sunnyogni és elkerülni a letolást. Természetes, csak nem sportszerű! Ugyanis ha azonnal értesítik a vezetőket, akkor az erre szakosodott VTMKCs (Vizuális Technika és Manipulátor Kezelő Csoport, közismertebb néven a „haváriások”) felvonul és az akkor még jól behatárolható helyen lévő, pontosan ismert tárgyat felleli. Bármeddig is tart, sokkal-sokkal kevesebb idő, fáradság és költség, mintha az elindított berendezést le kellene állítani – esetleg leáll magától, mert akkora kárt okoz az otthagyt tárgy! – és kinyitni (ami esetleg leürítéssel, nyomásmentesítéssel stb. jár!) és adott esetben különleges engedélyek birtokában nekiállni az azóta már ki tudja merre elrúgódott, elsodródott tárgyat megkeresni. Éppen ezért a csoport mindig is kiállt amellett, hogy aki hibázott – mert hiszen ki lehet hiba nélkül való?! – de azonnal szól, soha, semmilyen retorzióban ezért ne részesüljön! Természetesen vannak hosszabb munkák, melyek napokig, esetleg hetekig is eltartanak. A munkaközi szünetekben a munkavégzőknek kötelessége gondos-



6.39. ábra. Tisztaszerelési zóna, irattartó dobozzal [PA foto]

kodni a nyitott berendezések védelméről, azaz arról, hogy idegentest, szennyeződés ne kerülhessen be. Ezt takarással, fedelekkel, illetve (elsősorban csövek esetében) célszerűen kialakított dugókkal oldjuk meg.

De honnan tudhatjuk előre, hogy miféle szerszámok, eszközök lehetnek szükségesek a műveletek végrehajtásához? Erre való a munkaprogram és az elkészültét megelőző széleskörű egyeztetések. ennek során fésülik össze az érintett szervezetek különböző igényeit, biztonsági feltételeit egy legkisebb kockázattal járó, működőképes programmá, melyet megfelelő szinteken ellenőrizve, majd jóváhagyva alkalmazni fogunk. A végrehajtás előtt, a végrehajtókkal külön oktatáson beszéljük meg a programvezetők, hogy mi lesz a munka, azt hogyan kell megoldani és – ez a nagyon fontos! – azt is, hogy miért úgy. Csak az tud megfelelő minőségű munkát végezni, aki tisztában van feladatának súlyával és a hibák következményeivel is.

Bár a berendezések zárását minden esetben tisztaság és idegentestmentességi ellenőrzés előzi meg, ezek hatékonysága csaknem százszázalékosra növelhető a felelős munkavállalói hozzáállással. A zárás feltétele a „Sikeres” minősítésű jegyzőkönyv, s ez a fegyelmezett munkavégzéssel párosulva megbízható eredményt garantál.

A Paksi Atomerőműben nagy szerepet kapnak a különböző oktatások. Ezek egyike az éves szinten tartó képzés. Ennek keretein belül egy előadás alatt ismertetjük az elmúlt év ez irányú tapasztalatait, a felmerült események megoldását, elkerülhetőségük lehetőségeit. S végül, de nem utolsósorban minden előadáson hangsúlyozottan megköszönjük

kollégáink figyelmét és együttműködését, amellyel elősegítették a csoportunk munkáját! Ez a visszacsatolás igen jó eredményeket hozott magával! Azt mondhatjuk, hogy munkatársaink természetesnek veszik, hogy ha javítás, karbantartás közben nehezen, vagy csak veszélyesen megközelíthető helyre véletlenül beejtenek valamit egy nyitott berendezésbe, esetleg észrevesznek egy bekerült idegentestet, azonnal értesítik vezetőiket, akik azonnal a VTMKCs segítségét kérik, s így az idő – mely ilyenkor a legdrágább tényező! – nem telik feleslegesen.

Szakembereink szemléletének formálásában mind a négy lépcsőfok (technológia, oktatás, tisztaszerelési zóna, ellenőrzés) szerepet játszik, de a záró szeme ennek a láncnak a visszacsatolás. Ha az egyes ember is látja felkészült és felelősségteljes munkájának eredményét – biztonsági és anyagi szempontból egyaránt! - és lehetséges következményeit, akkor saját elhatározásából törekszik a biztonságos munkavégzésre. Ez pedig sokkal jobb hatásfokkal kecsegtet, mint az előírások számának növelése, vagy a szankciók szigorítása.

6.5.2. Idegentest felderítés, eltávolítás, manipulátorok

A berendezésekbe szándéktalanul kerülő különböző tárgyak (idegentestek), a későbbiek során galibát okozhatnak (6.40 ábra).



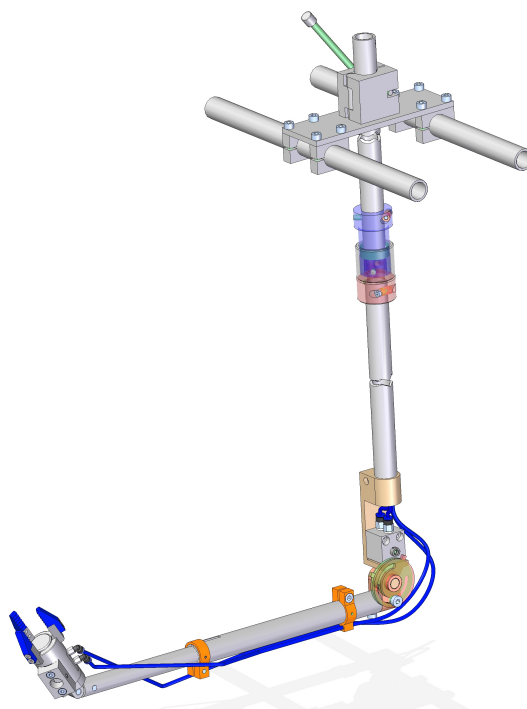
6.40. ábra. Egy turbina károsodott lapátozata, amelybe egy papírtörő gurigája került [PA foto]

Természetesen, az eltávolításukra van speciális csoport, távvezérelt céleszközökkel, robotokkal, de az elsődleges cél a bepottyanás elkerülése. Nem lehet elégszer elmondani, hogy minden egyes dolgozóban tudatosítani kell, hogy ha mégis beejt valamit, azonnal szóljon! Ezzel megelőzhető, hogy a behullott tárgy esetleg még nehezebben megközelíthető helyre kerüljön. Ennek érdekében kiemelt figyelmet kell fordítani minden egyes munkavállaló oktatására, felkészítésére! Soha, senkit retorzió nem érhet, ha az óvatlansága következtében keletkezett idegentestet azonnal jelzi, ezzel szemben a nem jelzett

idegentestekért felelős személyeket minden esetben felelősségre kell vonni. Azonnali jelzés esetén tudjuk, hogy mit keresünk, hol keressük, igen jó eséllyel el is tudjuk távolítani. Az eltitkolt idegentest a későbbiek során sokkal kedvezőtlenebb helyre kerülve nagy kárt okozhat! Hogy ez mennyire fontos kérdés, arra jó példát láthatunk a képen, ahol mindössze egy papírtörő guriga került egy turbinába a szerelés során. A következmények meglehetősen vigasztalanul festenek.

Idegentest eltávolító eszközök a Paksi Atomerőműben

Az eltávolításokat rendszerint kamerákkal tudjuk koordinálni. Manipulátorok segítségével oldjuk meg a feladatokat. Ezek lehetnek a legegyszerűbb kampótól kezdődően, mágnes, vagy villanymotoros csipesz, vagy akár a 6.41 ábrán látható pneumatikus megfogó vagy egy hidraulikus olló is.



6.41. ábra. Pneumatikus megfogó szerkezet [Rajz: Bacskai P.]

Az itt következő videofelvételek mindegyike egy-egy éles helyzet megoldását mutatja be a műveletek során készített videofelvételekből kivágott rövid részletek segítségével. A VTMKCs minden ilyen tevékenységét teljes időben rögzíti. A felvételek egyedülálló tapasztalati tudásbázist biztosítanak! Elemzésükkel felderíthetőek az eljárások esetleges

gyenge pontjai, jobbító javaslatok születhetnek a vizsgálati módszerekre, ráadásul bemutatásukkal a társszervezetek munkatársaiban újra és újra tudatosítható az elv: azonnal szólni! Néhány esetben más atomerőműveknek is elküldtük felvételeinket, hogy a náluk felmerült problémához hasonló esetben mi hogyan oldottuk meg a kérdést. Végül, de nem utolsósorban, kiváló szemelvényeket lehet kivágni belőlük, egyetemi hallgatók okulására!

A "video 9 GF kroki.avi" című videón egy idegentest eltávolításához használt villanymotoros csipesz látható működés közben:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_9_GF_kroki.avi

A "video 10 szivattyu.avi" című videón idegentest eltávolításához használt szivattyús szippantás látható működés közben:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_10_szivattyu.avi

A "video 11 anyacsavar.wmv", "video 12 apacsavar.wmv", "video 13 csm.wmv" és "video 14 cso.wmv" videón a gőzfejlesztőbe behullott kötőelemek eltávolítása látható saját fejlesztésű pneumatikus manipulátorral:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_11_anyacsavar.wmv

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_12_apacsavar.wmv

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_13_csm.wmv

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_14_cso.wmv

A "video 15 fksz.wmv" videón NA500 hurok vizsgálata látható a főkeringtető szivattyú (FKSZ) felől, a végén felnézünk a kollektorba és látható alulról a technológiai fedél, mellyel a gőzfejlesztőt lezárják a karbantartás során:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_15_fksz.wmv

A "video 16 GF csiszolopapir.wmv" videón az látható, ahogy egy porszívóval eltávolítanak egy smirglipapírt a gőzfejlesztőből. A lényege, hogy azonnal szólt a kolléga amikor beejtette, tudták hogy mit keressenek, hol keressék, honnan került oda, így egyszerű volt eltávolítani:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_16_GF_csiszolopapir.wmv

A "video 17 pihmed cso.wmv" videón egy beesett csövet távolítanak el a pihentetőmedence egyik tálcájáról:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_17_pihmed_cso.wmv

A tananyaghoz tartozó videók letölthetők a "Videók letöltése" című interaktív animáció segítségével.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Videok_letoltese_D01.swf

6.6. Adminisztráció és archiválás

Az idegentestek eltávolítását fontos megfelelően adminisztrálni és archiválni, melynek Atomerőművi gyakorlatát írjuk le a következőkben.

6.6.1. Vizsgálati technológiák szükségessége és felépítése

Miért van szükség vizsgálati technológiára?

Egy vizsgálati technológia körültekintő egyeztetések során születik meg. Az egyeztetések során az érintett szakterületek képviselői mérlegelik az egyes lépések feltételeit és azok megteremtésének módját. Meghatározzák a szükséges intézkedéseket, alkalmazott eszközöket, a minimális kockázatra törekedve. Egy jól átgondolt technológia mentén, fegyelmezten végrehajtott művelet a legritkább esetben jár eseménnyel. Ezek jellemzően a kapkodás, vagy a fegyelmezetlenség következményei.

Vizsgálati technológia felépítése:

A vizsgálati technológia minden esetben rögzítse a vizsgálat célját, annak személyi, dokumentációs, technikai és technológiai feltételeit. Egyértelműen írja le, hogy a művelet végrehajtása során milyen vizsgálati feladatokat kell végrehajtani és azok végeztével milyen ellenőrzéseket kell elvégezni a terület átadása előtt. Meg kell határoznia a lehetséges kockázatokat és azok elkerülésére irányuló lépéseket.

Követelményrendszer és kritérium:

Egy-egy berendezést általában többféle eljárással is megvizsgálunk. Minden egyes eljárásához tartozik egy-egy olyan követelmény, amelynek teljesülnie kell ahhoz, hogy az adott eljárás szerint a vizsgált terület „megfelelt” minősítést kapjon. Például hegesztési fröcskölés nem megengedett. Ezeket kritériumoknak nevezzük.

Minden vizsgált berendezéshez hozzá kell rendelni az egyes vizsgálati eljárásokhoz tartozó követelményt, amely szerint a berendezés megfelelő, vagy sem. Vizuális és penetrációs vizsgálatoknál ezt általában a hibának bizonyuló indikáció geometriai jellemzői

alapján határozzák meg, úgymint hosszúság, vagy vastagság. (Mint már tudjuk, mélységet ezen vizsgálatokkal nem tudunk meghatározni.) Berendezésekre, vagy berendezés csoportokra általánosan határozhatunk meg megfelelőségi követelményeket, rendszerbe foglalva azokat. Praktikusan követelményrendszer néven hívják ezeket.

6.6.2. Jegyzőkönyvezés és archiválás

Miért van szükség jegyzőkönyvre?

Újabb vizsgálat elvégzésekor a korábbi vizsgálatok jegyzőkönyveiben foglalt megállapítások és észrevételek, fontos támpontokat adhatnak egy berendezés állapotának megítélésében a döntéshozatalhoz. Ezért a jegyzőkönyveket mindig gondosan meg kell őrizni. Az irattáron kívül erre ma már remek digitális lehetőségek is vannak.

A jegyzőkönyv tartalmi és formai követelményei:

A jegyzőkönyvben rögzíteni kell a vizsgálatot végrehajtók adatain és a vizsgálati eredményeken kívül mindazon körülményeket, melyek a későbbiek során segítséget nyújthatnak a vizsgálat rekonstruálásához. Ilyen adat például a készített videofelvétel azonosítója is. A vizsgálati jegyzőkönyvben minden esetben nyilatkoznia kell a felelős vizsgálónak, hogy a vizsgált területek az adott kritériumokat kielégítik-e, azaz „megfelelt”, vagy „nem felelt meg”. Egy rendes cég rendelkezik saját jegyzőkönyv formátummal, melyen az összes szükséges adatnak megvan a kitöltendő rubrikája.

Mellékletek csatolása:

Egy-egy jegyzőkönyvhöz több mellékletet is csatolhatunk. Lehetnek ezek fényképek, adatlapok, de videofelvételek is. (Érdekességgéppen: lehet a melléklet például egy kavitációs felület szilikon lenyomata is!) A jegyzőkönyvben minden esetben rögzíteni kell, hogy hány és miféle mellékletet csatoltunk hozzá. A mellékleteket egyértelmű azonosítókkal kell ellátni és a jegyzőkönyvben rögzíteni kell azokat! Digitális tárolásnál a megfelelő kereszthivatkozásokról gondoskodni kell!

Archivációs rendszer:

Előbb-utóbb olyan tömegű jegyzőkönyvünk lesz, hogy áttekinthetetlen tömeggé duzzad. Ezért érdemes már jó előre felépíteni egy archivációs rendszert. Valamilyen célszerű szempont, vagy szempont-szisztéma szerint csoportosítva a jegyzőkönyveket. Csakis így van esélyünk egy évekkel korábbi dokumentum előásására. Digitális tárolás híján csaknem lehetetlen feladat az áttekinthető tárolás, különösen ha videofelvételek, fényképek is tartoznak egy-egy jegyzőkönyvhöz. Az internetnek köszönhetően egy így felépített adatbázist – megfelelő jogokkal bírva – bárhonnan elérhetünk, és adott esetben már a vizsgálat helyszínén okosak lehetünk a korábbi jegyzőkönyvek, videofelvételek alapján. Mindez persze csak akkor ér valamit, ha alkalmazni is tudjuk a megszerzett tudást!

6.7. A fejezethez tartozó videók

- Az 1990-ben készült "video 5 kozbensorud 1990 jo.avi" és a "video 6 kozbensorud 1990 torott.avi" egy megfelelő és egy törött közbensőrudat mutatnak be, az akkori színvonal adta minőségben:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_5_kozbensorud_1990_jo.avi

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_6_kozbensorud_1990_torott.avi

- A "video 7 kozbensorud 2012.avi" videó a 2012-es év egy vizsgálatából mutat be egy részletet, amin egy megfelelő rúd látható. A különbség meglehetősen markáns:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_7_kozbensorud_2012.avi

- 1991-ben, egy alkalommal tükrökkel oldottuk meg egy közbensőrud három oldali vizsgálatát. Akkor még nem állt rendelkezésünkre olyan mennyiségű kamera, mint manapság, ezért gondolkodással pótoltuk a tárgyi eszközöket. A vizsgálatból egy rövid bemutatót láthatunk a "video 8 kozbensorud tukor 1991.avi" videóban:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_8_kozbensorud_tukor_1991.avi

- A "video 9 GF kroki.avi" című videón egy idegentest eltávolításához használt vilanymotoros csipesz látható működés közben:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_9_GF_kroki.avi

- A "video 10 szivattyu.avi" című videón idegentest eltávolításához használt szivattyús szippantás látható működés közben:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_10_szivattyu.avi

- A "video 11 anyacsavar.wmv", "video 12 apacsavar.wmv", "video 13 csm.wmv" és "video 14 cso.wmv" videón a gőzfejlesztőbe behullott kötőelemek eltávolítása látható saját fejlesztésű pneumatikus manipulátorral:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_11_anyacsavar.wmv

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_12_apacsavar.wmv

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_13_csm.wmv

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_14_cso.wmv

- A "video 15 fkszw.wmv" videón NA500 hurok vizsgálata látható a főkeringtető szivattyú (FKSZ) felől, a végén felnézünk a kollektorba és látható alulról a technológiai fedél, mellyel a gőzfejlesztőt lezárják a karbantartás során:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_15_fkszw.wmv

- A "video 16 GF csiszolopapir.wmv" videón az látható, ahogy egy porszívóval eltávolítanak egy smirglipapírt a gőzfejlesztőből. A lényege, hogy azonnal szólt a kolléga amikor beejtette, tudták hogy mit keressenek, hol keressék, honnan került oda, így egyszerű volt eltávolítani:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_16_GF_csiszolopapir.wmv

- A "video 17 pihmed cszw.wmv" videón egy beesett csövet távolítanak el a pihentetőmedence egyik tálcájáról:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/video_17_pihmed_cso.wmv

6.8. A fejezethez tartozó animációk

A fejezethez tartozó animációk a következők:

- Az anyagvizsgálatok két csoportját szemlélteti példák megadásával az "Anyagvizsgálatok felosztása" című interaktív animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Anyagvizsgalatok_felosztasa_D01.swf

- Az ebben a fejezetben bemutatott anyagvizsgálatok közül négynek az elvével ismerttet meg a "Interaktív animáció néhány roncsolásmentes anyagvizsgálat elvéről" című interaktív animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Roncsolasmentes_anyagvizsgalatok_D01.swf

- A tananyaghoz tartozó videók letölthetők a "Videók letöltése" című interaktív animáció segítségével.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Videok_letoltese_D01.swf

- A folyadékbehatolásos vagy penetráló folyadékos módszer elvét mutatja be a "Penetrációs vizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Penetracios_vizsgalat_D01.swf

- A mágneses penetrációs vagy mágnesporos tesztelés elvét mutatja be a "Mágneses vizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Magneses_vizsgalat_D01.swf

- Az örvényáramos vizsgálat elvét mutatja be az "Örvényáramos vizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Orvenyaramos_vizsgalat_D01.swf

- Az ultrahangos vizsgálat elvét mutatja be az "Ultrahangos vizsgálat" című animáció.

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Ultrahangos_vizsgalat_D01.swf

6.9. Ismétlő kérdések a 6. fejezet anyagához

1. Mit lehet kiolvasni a 6.1 ábrán látható diagramból?
2. Miért van szükség anyagvizsgálatokra egy működő atomerőműben?
3. Mit nevezünk idegen testnek?
4. Mit nevezünk szennyeződésnek?
5. Miből épül fel egy VVER-440/V213-as primer köre?

6. Milyen eszközöket használnak atomerőműben vizuális vizsgálatokra?
7. Milyen hőmérsékleti tartományban használható a penetráló folyadékos vizsgálat?
8. Milyen próbatesteket használnak mágnesezhető poros vizsgálatnál?
9. Hol alkalmazzák az Atomerőműben a mágnesezhető poros vizsgálatot?
10. Melyik változatát használják az ultrahangos vizsgálatnak az Atomerőműben?
11. Melyik vizsgálatot, a röntgen vagy izotópos vizsgálatot használják elsősorban az Atomerőműben? Miért?
12. Hogy kalibrálják a röntgen és az izotópos vizsgálatot?
13. Hol használják az örvényáramos repedésvizsgálatot az Atomerőműben?
14. Hogyan osztályozzuk az akusztikus eseményeket biztonsági szempontból?
15. Mely területeket monitorozzák a reaktortartályon az Atomerőműben akusztikus emisszióval?
16. Milyen területeket foglal magában az idegentest kezelés az Atomerőműben?
17. Milyen módon lehet megelőzni az idegentestek bekerülését egy atomerőmű zárt részeibe?
18. Milyen példákat tud felsorolni idegentest eltávolításra az Atomerőműben?
19. Milyen eszközöket használnak idegentest eltávolítására az Atomerőműben?
20. Miért van szükség vizsgálati technológiára?
21. Milyen egy vizsgálati technológia felépítése, követelményrendszere és kritériumai?
22. Miért van szükség jegyzőkönyvre?
23. Mit tartalmaz egy jegyzőkönyv? Mik a formai követelményei? Milyen mellékleteket kell hozzá csatolni és milyen archivációs módszerrel kezelik?

6.10. Feladatok a 6. fejezet anyagához

1. Idegentest eltávolítás esetén, mi az első szempont, amit mérlegel?
2. Milyen vizsgálatokat alkalmaznak atomerőművi főberendezések (reaktortartály, gőzfejlesztő) anyaghibáinak felderítése esetében?

A 6. fejezethez tartozó feladatokat és azok megoldásait mutatja be a "Feladatmegoldások letöltése a 6. fejezethez" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_letoltese_6_fejezethez_D01.swf

7. fejezet

Anyagvizsgálatok a szekunder köri gyakorlatban

A fejezetet összeállította: *Bácskai Péter István*

A szekunder kör főbb berendezéseinek áttekintése olvasható a következőkben.

7.1. Csővezetékek általánosságban

Anyagvizsgálat szempontjából a csövek olyan zárt terű fémszerkezetek, melyeket általában belülről koptató igénybevétel terhel (7.1 ábra). Ez a koptató igénybevétel lehet enyhébb (pl. levegő, vagy gázok szállítása), de lehet intenzív is (pl. folyadék, vagy gőz szállítása). A koptató igénybevétel hatására a csőfal belülről vékonyodik el. Feladatunk, hogy a csőfal kilyukadása előtt megtaláljuk és kicseréltsük a kritikus csőszakaszt. Ha lehetőség van a csővezetékbe történő behatolásra – kisserelt tolózár, vagy szelep házán, vagy éppen vizsgálócsonkon keresztül – akkor legcélszerűbb és legolcsóbb is, egy vizuális ellenőrzés (az általános anyagvizsgálati eljárásokat az előző fejezetekben részleteztük).

Ezt a csővezeték átmérőjétől függően végrehajthatjuk endoszkóppal, vagy kamerával. A látható kopásnyomok elhelyezkedéséből, jellegéből és intenzitásából meg lehet határozni a további anyagvizsgálatok helyét és módszerét. Anyagválasztás tekintetében a legfőbb különbség, hogy a primerkörü csővezetékek általában saválló acélból készülnek, míg a szekunder körű vezetékek jellemzően szénacélból. A vizsgálóanyagok megválasztása során mindig tekintettel kell lenni a vizsgálandó objektum anyagminőségére. Így például ausztenites acélokat nem szabad klórtartalmú anyaggal vizsgálni, a feszültségkorrózió veszélye miatt. (A halogének általában ilyen veszélyt jelentenek, de vizsgálóanyagokban csak a klór szokott előfordulni, ezért elegendő ezt korlátozni.)

Interkrisztallin (kristályközi) korrózió heterogén kristályszerkezetű anyagokban következhet be. Ilyenkor az anyag szerkezetén belül (pl. ötvözők dúsulása a kristályhatá-



7.1. ábra. Csőrengeteg az Atomerőműben [Bacsikai P. foto 2]

rokon, különböző összetételű elegykristály-halmazok között) jelentős potenciálkülönbség keletkezik. Ettől függően a korróziós folyamatban vagy a kristályhatár, vagy maga a kristály oldódik. A kristályközi korrózió igen veszélyes, mert a felület épnek látszik, noha az anyag szilárdsági tulajdonságai már jelentősen megromlottak. A korrózió mértékét az anyagból kivett minták szilárdságának és nyúlásának csökkenése is jelzi. A reális veszélyt a feszültségkorrózió jelenti, de lehet olyan formája, mely interkristallin megjelenést eredményezhet. Nagy feszültségek esetén a korróziós repedés gyorsabban terjedhet a kristályhatárokon, s könnyen összetéveszthető a két jelenség! A nálunk alkalmazott magas titán ötvöztetű anyagok azonban elejét veszik a kristályközi korrózióknak, ám a feszültségkorrózió sajnos elő-elő fordul.

Vannak ettől eltérő meghibásodások is, így például a tervezettől eltérő mechanikai feszültségek hatására károsodhat a csővezeték (rendszeresen rálépnek, nekitolják a tartókra, vagy éppen a léc mozgását lehatárolják.), illetve nem az előírt anyagválasztás - vagy nem az előírt közeg szállítása! - következtében feszültségkorrózió, galvánkorrózió (vörösréz-vas!) léphet fel. Ez utóbbiak felderítésére a vizuális ellenőrzések mellett egyéb, akár roncsolásos vizsgálati módszerek alkalmasak.

Minden ilyen jellegű ellenőrzésnek a célja az, hogy információnk legyen az adott szerkezeti elem aktuális állapotáról. Erre azért van szükség, hogy minél nagyobb valószínűséggel cseréljük, vagy javítsuk ki az elromló szakaszt, vagy elemet, annak meghibásodása, tönkremenetele előtt.

7.2. Turbina

Anyagvizsgálat tekintetében a turbina (7.2 ábra) egy erős erózió és dinamikus igénybevételnek kitett zárt, de nyitható berendezés. A turbinatengely siklócsapágóinak penetrációs vizsgálata, a turbinatengely ultrahangos, valamint a turbinalapátok mágneses és penetrációs vizsgálata az általános. Emellett általános vizuális ellenőrzést is végeznek. A zárt berendezésen kialakított vizsgálócsonkokon keresztül, a leállított, de ki nem bontott berendezés lapátsorai közé is be lehet hatolni endoszkóppal, vizuális anyagvizsgálat céljából. Idegentest, vagy szennyeződés mentességet is ellenőrizhetünk így.



7.2. ábra. A turbina és a generátor: Sárga: turbinaház; Kék: generátor; Piros: gerjesztőgép [Bacscai P. foto 2]

A 7.3 ábrán láthatunk egy kiemelt turbina forgórészt, penetrációs vizsgálat után. A karbantartás során a forgórész kiemelése nélkül is végrehajtható részleges vizsgálat, s a turbina villanymotorral történő átforgatásával a részleges vizsgálatok a forgórész teljes vizsgálatává állhatnak össze. Ilyenkor nagy figyelemmel kell lenni a rések, nyílások letakarására, mert a sürgés-forgásban könnyen beeshet valami a turbinaházba. Márpedig az ott nem maradhat, ki kell szedni, az pedig többletmunka, többletidő, többletköltség.

7.3. Kondenzátorok, hőcserélők

A kondenzátorok, hőcserélők vizsgálata több szempont miatt is fontos. Egyrészt a benne áramló közegtől függően lerakódások képződhetnek benne, másrészt a benne uralkodó nyomás repedéseket eredményezhet. A 7.4 és 7.5 ábrák jól szemléltetik a különbséget a két állapot – karbantartás előtt és után – között.



7.3. ábra. Karbantartásra kiemelt turbina forgórész lapátsorok [Bacsikai P. foto 2]



7.4. ábra. Két évet üzemelt hőátadó cső, karbantartás előtt [Bacsikai P. foto 2]

7.4. Az SD (gőz)kondenzátorok vizsgálata

Az SD kondenzátorok vizsgálata – a berendezés fontossága mellett (az SD kondenzátorok hűtik le a turbináról lejövő gőzt, egyszersmind vákuumot is létrehozva a turbina mögött) - a nagy mennyiségű, azonos cső vizsgálata miatt érdekes. Korábban endoszkóppal vizsgáltuk ezt a berendezést. Egy tíz méter feletti ipari endoszkóp tízmillió forint feletti nagyságrendbe kerül (2013-ban a 12 méteres endoszkóp 12 millió, a 18 méteres 16 millió Ft-ba került). Mivel a vizsgálat jól tipizálható, ezért érdemes volt külön céleszközt gyártani hozzá. A hőátadó cső belső átmérője 22 mm. A céleszköz egy fél-merev szárral ellátott, 19 mm átmérőjű kamera, beépített LED világítással. A berendezés ára alig harmada az endoszkópénak, s képminősége jobb annál. Ez jó példa arra is, hogy nagy tömegű, egyforma alkatrész vizsgálatához érdemes külön berendezést kifejleszteni.



7.5. ábra. Két évet üzemelt hőátadó cső, karbantartás (tisztítás) után [Bacsikai P. foto 2]

7.5. Ismétlő kérdések a 7. fejezet anyagához

1. Minek tekintjük az atomerőművekben használt fémcsöveket az anyagvizsgálat szempontjából?
2. Milyen módszerekkel vizsgáljuk az atomerőművekben használt fémcsöveket?
3. Minek tekintjük az atomerőművekben használt turbinákat az anyagvizsgálat szempontjából? Milyen terhelések hatnak rá?

7.6. Feladatok a 7. fejezet anyagához

1. Előfordulhat-e, hogy egy atomerőmű gőzfejlesztőjének szekunder oldalán felderített idegentestet nem távolítják el? Válaszát indokolja!
2. Létezik-e olyan készen kapható berendezés, amellyel univerzálisan el lehet távolítani egy atomerőmű gőzfejlesztőjének szekunder oldalán talált idegen testeket? Válaszát indokolja!

A 7. fejezethez tartozó feladatokat és azok megoldásait mutatja be a "Feladatmegoldások letöltése a 7. fejezethez" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_letoltese_7_fejezethez_D01.swf

8. fejezet

Megoldások a fejezeteket záró feladatokra

A fejezetet összeállította: *Kiss Attila*

Ebben a fejezetben felsoroljuk az egyes fejezetekhez készült feladatokat és azok megoldásait.

8.1. Megoldás a 2. fejezet feladataira [Jarfas]

1. Határozzuk meg, hogy a szabályos (kőbös) rácsszerkezetnek milyen fajtái vannak! A megoldást mutatja a "Feladatmegoldások 2.1" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_2p1_D01.swf

2. Az olvadásról és dermedésről tanultakat felhasználva, a lehűlési görbén fölfelé haladva (lásd a 2.10 ábrát), állapítsuk meg, hogyan játszódik le az ötvözetek olvadása. A következő kérdések segítséget adnak a feladat megoldásához: Mi játszódik le a dermedéspontra felmelegített ötvözetben? Mi jön létre, ha az ötvözetet tovább melegítjük? Mi történik az olvadáspont és a dermedéspont közötti hőmérsékleteken, valamint az olvadáspont hőmérsékletén? A megoldást mutatja a "Feladatmegoldások 2.2" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_2p2_D01.swf

3. Határozzuk azt meg, hogy milyen rácsszerkezete van a krómnak, a nikkelnak és a vasnak! A megoldást mutatja a "Feladatmegoldások 2.3" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_2p3_D01.swf

4. Hasonlítsuk össze a 2.10 ábrán látható ötvözetekre jellemző lehűlési görbét a Cu-réz lehűlési görbéjével (lásd 2.7 (b) ábra)! Milyen eltérést látunk? A megoldást mutatja a "Feladatmegoldások 2.4" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_2p4_D01.swf

5. Határozzuk meg a 2.17 ábra, a Cu-Ni, réz-nikkel ötvözetrendszer állapotábrája segítségével az ötvözet olvadási- és dermedéspontjának hőmérsékletét az alábbi százalékos összetételeknél: a, 75% nikkel, b, 25% réz, c, 50% nikkel, d, 75% réz. A megoldást mutatja a "Feladatmegoldások 2.5" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_2p5_D01.swf

6. Határozzuk meg a 2.18 ábra alapján, hogy a következő hőmérsékleteken milyen összetételű Sn-Bi ötvözetek találhatóak folyékony, pépes, valamint szilárd halmazállapotban! a, 271,442°C fölött, b, 231,9681°C és 271,442°C között, c, 139°C és 231,9681°C között d, 13°C és 139°C között. A megoldást mutatja a "Feladatmegoldások 2.6" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_2p6_D01.swf

8.2. Megoldás a 6. fejezet feladataira

1. Idegentest eltávolítás esetén, mi az első szempont, amit mérlegel? A megoldást mutatja a "Feladatmegoldások 6.1" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_6p1_D01.swf

2. Milyen vizsgálatokat alkalmaznak atomerőművi főberendezések (például reaktor-tartály, gőzfejlesztő) anyaghibáinak felderítése esetében? A megoldást mutatja a "Feladatmegoldások 6.2" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_6p2_D01.swf

8.3. Megoldás a 7. fejezet feladataira

1. Előfordulhat-e, hogy egy atomerőmű gőzfejlesztőjének szekunder oldalán felderített idegentestet nem távolítják el? Válaszát indokolja! A megoldást mutatja a "Feladatmegoldások 7.1" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_7p1_D01.swf

2. Létezik-e olyan készen kapható berendezés, amellyel univerzálisan el lehet távolítani egy atomerőmű gőzfejlesztőjének szekunder oldalán talált idegen testeket? Válaszát indokolja! A megoldást mutatja a "Feladatmegoldások 7.2" című interaktív animáció:

http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/kissa/Aei_av_jegyzet_Vids_Anims/Interaktiv_Feladatmegoldasok_7p2_D01.swf

Irodalomjegyzék

- [Aszodi] Aszodi, Attila, Boros, Ildikó, A FUKUSIMAI ATOMERŐMŰ BALESETE EGY ÉV TÁVLATÁBÓL, www.reak.bme.hu/munkatarsak/dr_aszodi_attila/japan_foeldrenges.html.
- [Bacsikai] Bácskai Péter: "Reaktortartály akusztikus emissziós integritás vizsgálata", előadás, DIAGON'97 diagnosztikai konferencia, 1997.
- [Bacsikai2] Bácskai Péter: „A Kaiser-effektus megjelenése a Paksi Atomerőmű egyik reaktortartályán, a fővízköri nyomáspróba alatt”, előadás, DIAGON'98 diagnosztikai konferencia, 1998.
- [Bacsikai P. foto] A fényképet Bácskai Péter készítette a Paksi Atomerőmű Visatec gyártmányú robotjáról.
- [Bacsikai P. foto 2] A fényképet Bácskai Péter készítette.
- [Bihari] Bihari, Péter, Műszaki termodinamika, *BME Energetikai Gépek és Rendszerek tanszék*, Ideiglenes jegyzet kézírata, 2001.
- [BME ATT] BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék Munkaközössége, Segédlet az Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat (BMEGEMTAGA1) tárgy hallgatói számára, *BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék Munkaközössége*, Elektronikus jegyzet, 2012.
- [Czoboly] Czoboly-Havas: Fémek törése és fáradása, Hegesztéstechnológia című tárgy segédletei 18. sz. füzet.
- [Csizmazia1] Csizmazia, Ferencné, Anyagismeret I. (Fémtan), *Széchenyi István Egyetem*, Egyetemi jegyzet, 2000.
- [Csizmazia2] Csizmazia, Ferencné, Anyagismeret II. (Anyagvizsgálatok), *Széchenyi István Egyetem*, Egyetemi jegyzet, 2001.

- [Csom1] Csom, Gyula, Atomerőművek üzemtana I. kötet - A reaktorfizika és - technika alapjai, *Műegyetemi kiadó*, Egyetemi tankönyv, ISBN: 9634205143ö ISBN: 9634205111I, Budapest, 1997.
- [Csom2] Csom, Gyula, Atomerőművek üzemtana II/1. kötet - Az energetikai reaktor üzemtana, *Műegyetemi kiadó*, Egyetemi tankönyv, ISBN: 9634205143ö ISBN: 9634208282, Budapest, 2005.
- [Csom3] Csom, Gyula, Atomerőművek üzemtana II/2. kötet - Az energetikai reaktor üzemtana, *Műegyetemi kiadó*, Egyetemi tankönyv, ISBN: 9634205143ö ISBN: 9634208290, Budapest, 2005.
- [Darwin] Darwin, Charles, A fajok eredete, *TYPOTEX ELEKTRONIKUS KIADÓ KFT.*, ISBN: 9789639664449, 2009.
- [Deritolap web] <http://spottr.hu/2011/01/24/studio-berendezese-otthon-1-resz/>
- [ELECTRO-SPECT TESTING INC. web] www.estsinc.com/images/MT-NDTS-MTU.jpg
- [Endoszkop web] www.atecorp.com/ATECorp/media/ProductImages/RFSSystemlab-VJ-Adv-3-9mm.jpg
- [Grimas web] www.grimas.hu
- [Heavy Engineering Research Association web] www.hera.org.nz/images/inspectionqualitycontrol/PhasedArray_diagram.jpg
- [Helling Gmbh web] www.helling-ndt.de/media/filter/l/transfer/account/4c6d5a9c-dd5c-4569-bdb1-06a41a25c659/img/berthold_2.jpg
- [Jarfas] Járfas, Istvánné; Koncz, Ferenc; Róka, Gyuláné, Fémipari anyag- és gyártásismeret 18. kiadás, *Műszaki Könyvkiadó*, Budapest, 1996.
- [Kbfiunio web] http://kbfiunio.hu/sites/default/files/styles/slideshow_full/public/magnes.jpg?itok=UpX2RBtK
- [Ke-Tech Kft web] <http://ketech.hu/images/termek/272/large/0.jpg>
- [KFKI AEKI] Bácskai Péter a KFKI AEKI engedélyével közölte az ábrákat, a hivatkozott vizsgálat – melynek a Paksi Atomerőmű részéről vezetője volt - értékeléséből, mely a Paksi Atomerőművel közös tulajdona.
- [Lupe web] gyfricy.files.wordpress.com/2013/06/nagyito.jpg
- [NDT web] www.ndt-ed.org/AboutNDT/aboutndt.htm

- [Part] MVM Paksi Atomerőmű munkaközössége - MVM Paksi Atomerőmű, Társasági szakkifejezéstár 2. kiadás 2009-12-21.
- [Part2] MVM Paksi Atomerőmű munkaközössége - TLF004U Tisztaszerelési tevékenységek, végrehajtási utasítás – MVM Paksi Atomerőmű Zrt.
- [NBSz] Nukleáris Biztonsági Szabályzat, Országos Atomenergia Hivatal (OAH).
- [NDT web] www.ndt.org
- [Olympus Hun web] http://www.roncsolasmentes-anyagvizsgalat.hu/tavoli_vizualis_vizsgalat/fiberszkop_fiberscope.html
- [Olympus Hun web 2] http://www.roncsolasmentes-anyagvizsgalat.hu/tavoli_vizualis_vizsgalat/boroszkop_borescope.html
- [Olympus web] www.olympus-global.com/en/
- [PA] Az ábra a Paksi Atomerőmű által készített és az Országos Atomenergia Hivatal által jóváhagyott fővízköri nyomáspróba technológiából származik.
- [PA foto] Az ábrák a Paksi Atomerőmű Anyagvizsgálati Osztályának felvételei.
- [PA foto 2] A kép a Paksi Atomerőmű PDMS rendszeréből származik.
- [PA Web] Forrás: www.atomeromu.hu
- [Pellionisz] Pellionisz, Péter, Akusztikus emissziós anyag- és szerkezetvizsgálatok (szerk: Pellionisz Péter, GTE Bp.), 1992.
- [Polinszky] Polinszky, Károly, Műszaki lexikon I-III. + kiegészítés, *Akadémiai Kiadó*, 1984.
- [Prohaszka] Prohaszka, János, Bevezetés az anyagtudományba I., *Tankönyv Kiadó*, Budapest, 1988.
- [Rajz: Bacskai P.] Bácskai Péter által készített illusztráció.
- [Rajz: Gemes Gy.] Dr. Gémes György András által készített illusztráció.
- [Rajz: Kiss A.] Kiss Attila által készített illusztráció.
- [Rajz: Por G.] Pór Gábor által készített illusztráció.
- [RONTGEN KANIZSA Kft web] www.rontgenkanizsa.hu/gallery/devices/eresco_65_mf.jpg

- [RONTGEN KANIZSA Kft web 2] www.rontgenkanizsa.hu/gallery/devices/gm-tsi.jpg
- [Sitkei] Sitkei, Béla, Reaktor-berendezés szerkezeti ismeretek, Tanfolyami jegyzet, Atomerőművi karbantartók számára, Paksi Atomerőmű, belső tanfolyami jegyzet, 2012.02.14.
- [SlovCert] <http://old.slovcert.sk>
- [SzucsP] Szűcs Pál: "Az akusztikus emisszió története", Anyagvizsgálók lapja III., 1993. 4.
- [TCP-online] <http://shop.tcp-online.net/out/pictures/master/product/1/ketosring.jpg>
- [TohtL] Tóht L. - Segio Crutzenn: Roncsolásmentes vizsgálati módszerek, Miskolc-Petten, 1999.
- [Trampus] Forrás: Bencze Áron, Trampus mérnökiroda, http://innoteka.hu/cikk/nemzetkozi_szinvonal_pakson.127.html
- [Tudasbazis web] <http://cms.sulinet.hu/get/d/bfcf4800-d6f9-4d69-86e9-253b9a538b93/1/8/b/Normal/arammagneseshatas13.jpg>
- [University of Queensland web] www.physics.uq.edu.au/pain/bc2011/Ferro2.jpg
- [Vero-Kaldor] Verő-Káldor, Fémtan, Tankönyvkiadó, 1969.
- [Videoszkop] http://www.roncsolasmentes-anyagvizsgalat.hu/tavoli_vizualis_vizsgalat/videoszkop_videoscope.html
- [VISATEC Gmbh web] www.visatec.net/EN/01_Produkte/Inspektionssysteme/Produktblaetter/VT_XLRAD_PT.php
- [Web foto] www.informed.hu/_Images/history/000044650_wilhelm_roentgen.jpg.jpg_orig.jpg