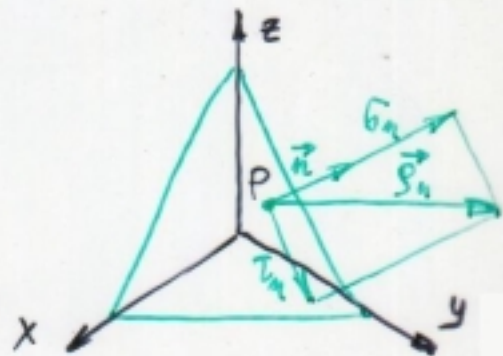


1. A feszültség és az alakváltozás kapcsolata

1.1. A feszültségi állapot

x, y, z koordináta-rendszerekben valamely test tetszőleges P pontjában az $\underline{F}$ feszültségtenzor:

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$



A P ponton átfektetett bármely síkon ható

$\vec{S}_n$ feszültségvektor: $\vec{S}_n = \underline{F} \cdot \vec{n}$

$\vec{n}$ a sík normálvektora (egységvektor)

$$\vec{n} = \{n_x, n_y, n_z\} = n_x \vec{i} + n_y \vec{j} + n_z \vec{k}$$

$$\vec{S}_n = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y + \tau_{xz} n_z \\ \tau_{yx} n_x + \sigma_y n_y + \tau_{yz} n_z \\ \tau_{zx} n_x + \tau_{zy} n_y + \sigma_z n_z \end{bmatrix}$$

$$(C_{ik} = a_{i1} b_{1k} + a_{i2} b_{2k} + \dots)$$

$i = 1 \dots 3 \quad j = 1 \dots 3$

$$\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = 1$$

Feszültségtenzor a főfeszültségekkel:

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ főfeszültségek

A feszültségtenzor bontása $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ bevezetett
szelvény

$$\underline{\underline{F}} = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - \sigma_m \end{bmatrix} \quad \text{, azaz}$$

$$\underline{\underline{F}} = \sigma_m \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{F_D}} \quad \text{egységtenzor}$$

$\underline{\underline{F_D}}$ a hidrnostatisztikus állapottól eltérést leíró deviator tenzor

- a hidrnostatisztikus fesz. állapot csak rugalmas térfogatváltozást okoz

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{1}{\chi} \cdot \sigma_m$$

χ a kompresszibilitási tényező, vagy Bulk-modulus.

- a képlekenny alakváltozás az $\underline{\underline{F_D}}$ -hez kötődik

ha $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \rightarrow \sigma_m = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \rightarrow \underline{\underline{F_D}} = \underline{\underline{0}}$
Képlekenny alakváltozás nem következhet le

A képlekenny alakváltozás szempontjából különösen jelentősége van az ún. oktaéderes csúcsirányú feszültségnek, amely a főteengelyekkel azonos méretű becsúszó oktaéderes síkban ébred.

$$\vec{n} = \frac{1}{\sqrt{3}} \vec{e}_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \vec{e}_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \vec{e}_3$$

$\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ főirányok²

Az oktaéderes feszültségek meghatározása:

$$\vec{S}_m = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} \end{bmatrix} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{3}} \vec{e}_1 + \frac{\sigma_2}{\sqrt{3}} \vec{e}_2 + \frac{\sigma_3}{\sqrt{3}} \vec{e}_3$$

Az oktaéder síkra merőleges normál feszültségi komponens

$$\sigma_m = \vec{n} \cdot \vec{S}_m \quad (\text{skalár szorzás})$$

A csústábfeszültség:

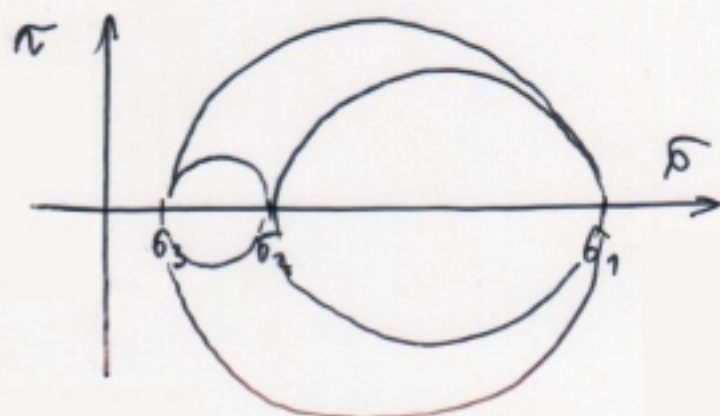
$$\tau_m = \sqrt{S_m^2 - \sigma_m^2}$$

$$\sigma_m = \sigma_{\text{okt}} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_m$$

$$S_m = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{3} + \frac{\sigma_2^2}{3} + \frac{\sigma_3^2}{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}$$

$$\tau_m = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \tau_{\text{okt}}$$

A Mohr körökkel



1.2. Az alakváltozási állapot

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{zx} & \frac{1}{2} \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}, \text{ ahol}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\gamma_y}{\gamma_x}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\gamma_y}{\gamma_y} + \frac{\gamma_x}{\gamma_x} \dots$$

A főirányokban:

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix}$$

1.3. Az általános Hooke törvény

$$\underline{\underline{A}} = \frac{1+\mu}{E} \underline{\underline{F}} - \frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \underline{\underline{I}}$$

1.4. Az egytengelyű feszültségállapot jellemzése

$$\sigma_1 \neq 0 \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

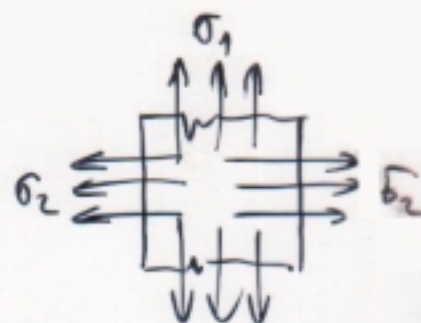
$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \frac{1+\mu}{E} \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \frac{\mu}{E} (\sigma_1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1+\mu}{E} \sigma_1 - \frac{\mu}{E} \sigma_1 = \frac{\sigma_1}{E} \quad ; \quad \varepsilon_2 = -\frac{\mu \sigma_1}{E} = -\mu \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_3 = -\mu \varepsilon_1 \quad E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad ; \quad \mu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

1.5. A síkfenültekési állapot

$$\sigma_1 \neq 0 ; \sigma_2 \neq 0 ; \sigma_3 = 0$$



$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \frac{1+\mu}{E} \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

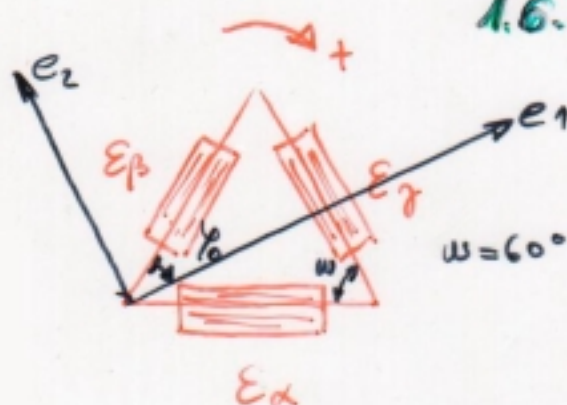
$$\varepsilon_1 = \frac{1+\mu}{E} \sigma_1 - \frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{1}{E} (\sigma_1 - \mu \sigma_2)$$

$$\varepsilon_2 = \dots = \frac{1}{E} (\sigma_2 - \mu \sigma_1)$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2), \text{ illé}$$

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2) \text{ és } \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1)$$

1.6. Hárdbélyeges mérés:



$$\varphi_0 = \frac{\arctg(A \operatorname{tg} \omega)}{2}$$

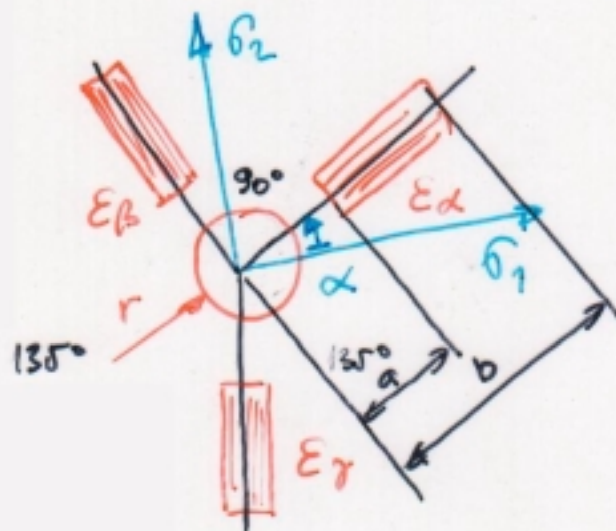
$$\varepsilon_1 = B + C$$

$$\varepsilon_2 = B - C, \text{ ahol}$$

$$A = \frac{\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\beta}{2 \varepsilon_\beta - \varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma} ; B = \frac{1}{3} (\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma) ;$$

$$C = \frac{1}{3} \sqrt{(2 \varepsilon_\beta - \varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma)^2 + 3 (\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\beta)^2}$$

1.7. A belső maradék feszültség meghatározása a Mathar-féle lyukfúrás módszerrel



Működés felrás előtt,
mérés a fúrás után

$$\sigma_1 = \frac{\epsilon_\alpha + \epsilon_\beta}{2A} + \frac{\epsilon_\alpha - \epsilon_\beta}{2B \cos 2\alpha}$$

$$\sigma_2 = \frac{\epsilon_\alpha + \epsilon_\beta}{2A} - \frac{\epsilon_\alpha - \epsilon_\beta}{2B \cos 2\alpha}$$

$$\tan 2\alpha = \frac{2\epsilon_\gamma - \epsilon_\alpha - \epsilon_\beta}{\epsilon_\alpha - \epsilon_\beta}$$

$$A = - \frac{1+\mu}{E} \frac{r^2}{ab} \quad \text{és}$$

$$B = - \frac{1}{E} \frac{r^2}{ab} \left[4 - (1+\mu) \frac{r^2(a^2+ab+b^2)}{a^2b^2} \right].$$

2.1. A mérőbéllyeges mérés technikája

a) A mérőbéllyeges mérés alapelve

A kuzal ellenállása $R = \rho \frac{l}{A}$, Ω

ρ fajlagos ellenállás,

l hosszúság, A keresztmetszet.

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln A \text{ és } \ln A = 2 \ln r + \ln \pi$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r}$$

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon, \quad \frac{dr}{r} = -\mu \varepsilon, \quad \frac{d\rho}{\rho} = \nu \varepsilon$$

$$\text{tehát } \frac{dR}{R} = (1 + 2\mu + \nu) \varepsilon$$

$$k = 1 + 2\mu + \nu = \frac{\frac{dR}{R}}{\varepsilon} \text{ gauge faktor,}$$

értéke a kuzal anyagától függ

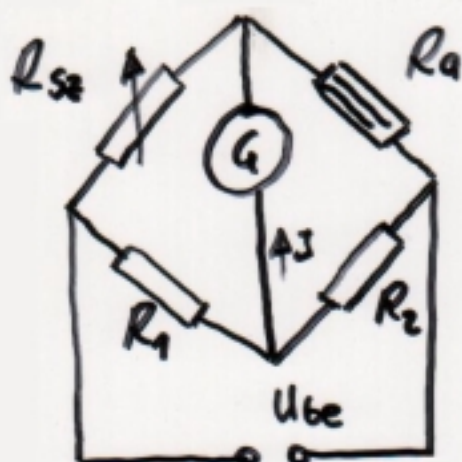
(a leggyakrabban használt mérőbéllyezeteknél:

$$k = 2.$$



Kiegyenlített hídnaál

Wheatstone hídkapcsolás



$$R_a = 100 - 400 \Omega$$

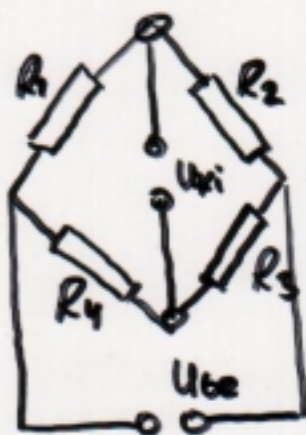
$$\Delta R_a = \frac{R_2}{R_1} \Delta R_3$$

R_2 (kompenzációs
betyeg)

ha $\beta = \phi$ és $R_1 = R_2$

$$\Delta R_a = \Delta R_3$$

Kiegyenlítettlen hídnaál



- félhíd esetén

$$R_1 = R_2 = R_A = R_0$$

$$R_3 = R_4 = R_B$$

$$U_{ki} = U_{be} \frac{1}{4} \left(\frac{dR_1 - dR_2}{R_A} + \frac{dR_3 - dR_4}{R_B} \right)$$

ha $dR_3 = dR_4 = \phi$ $U_{ki} = U_{be} \frac{dR_1 - dR_2}{R_0}$

- teljes híd esetén $R_A = R_B = R_0$

$$U_{ki} = U_{be} \frac{dR_1 - dR_2 + dR_3 - dR_4}{4R_0}, \quad \frac{dR}{R_0} = k \varepsilon$$

$$U_{ki} = U_{be} \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

- Egy aktív belyeggel:

$$k \times 2 \text{ esetén } \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{1}{2} \varepsilon \quad \left(= 0.5 \cdot \frac{mV}{V} \right)$$

$$\frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{k}{4} \varepsilon_1$$

- felhídban mérésnél

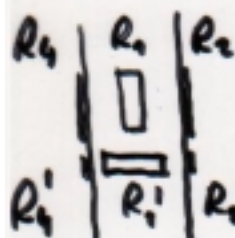
$$\frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

Hídérzékelység n_e

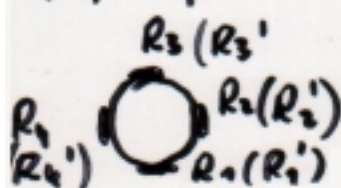
$$\frac{U_{ki}}{U_{be}} \left(\frac{mV}{V} \right) = \frac{k}{4} \varepsilon n_e$$

R_e : - síkfel. diápotban mérés 3 belyeggel
1 aktív belyeg esetén

$$n_e = 1$$



- erőmérés 8 belyeggel



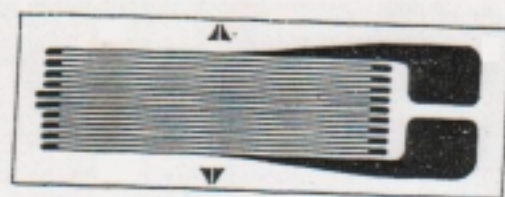
$$n_e = 2(1 + \nu)$$



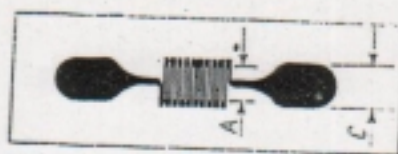
Sorszám	A nyúlásmérő ellenőrzések elhelyezése		Az érzékelt nyúlás, ha az igénybevétele				Mérőáramkör (A, B, C és D a mérőhíd csatlakozói)	A műszeren leolvasható nyúlás
	aktív (adat-és felületben)	kompensáló	nyúlás	hajlítás	csavartás	hő-ökizto		
1			ϵ_1 ϵ_2	ϵ_H 0	0 0	ϵ_L 0		Megjegyzések $\epsilon_F + \epsilon_H + \epsilon_L$ A rúd terhelésének vízszintes lódd az 5.38. ábrán
			ϵ_1 ϵ_2	ϵ_H $-\mu \epsilon_F$	0 0	ϵ_L ϵ_L		$(1+\mu)(\epsilon_F + \epsilon_H)$ μ a Poisson-szám
3			ϵ_1 ϵ_2	ϵ_H $-\epsilon_H$	0 0	ϵ_L ϵ_L		$2\epsilon_H$ Csak a hajlítást érzékeli
			ϵ_1 ϵ_2 ϵ_3 ϵ_4	ϵ_H $-\epsilon_H$ 0 0	0 0 0 0	ϵ_L ϵ_L 0 0		$\epsilon_F + \epsilon_L$ A hajlítást nem érzékeli
5			ϵ_1 ϵ_2	$q\epsilon_F$ $q\epsilon_H$	ϵ_L $-\epsilon_L$	ϵ_L ϵ_L		$2\epsilon_F$ Csak a csavartást érzékeli
			$q - \frac{\sqrt{2}}{2}(1-\mu)$					

Mérés két hídágban

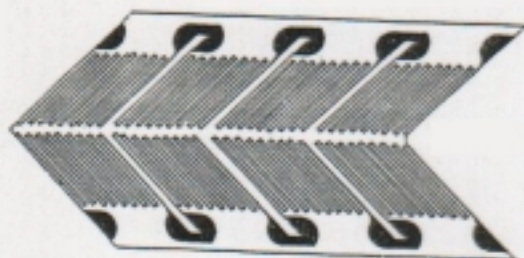
Mérés négy hídában									
6		ε_1 ε_2 ε_3 ε_4	ε_f ε_f 0 0	ε_n $-\varepsilon_n$ 0 0	0 0 0 0	ε_L ε_L 0 0			
7		ε_1 ε_2 ε_3 ε_4	ε_f ε_f $-\mu\varepsilon_f$ $-\mu\varepsilon_f$	ε_n $-\varepsilon_n$ $-\mu\varepsilon_n$ $\mu\varepsilon_n$	0 0 0 0	ε_L ε_L 0 0			
8		ε_1 ε_2 ε_3 ε_4	ε_f ε_f $-\mu\varepsilon_f$ $-\mu\varepsilon_f$	ε_n $-\varepsilon_n$ $-\mu\varepsilon_n$ $\mu\varepsilon_n$	0 0 0 0	ε_L ε_L 0 0			
9		ε_1 ε_2 ε_3 ε_4	ε_f ε_f ε_f ε_f	ε_n ε_n $-\varepsilon_n$ $-\varepsilon_n$	0 0 0 0	ε_L ε_L ε_L ε_L			
10		ε_1 ε_2 ε_3 ε_4	$q\varepsilon_f$ $q\varepsilon_f$ $q\varepsilon_f$ $q\varepsilon_f$	$q\varepsilon_n$ $q\varepsilon_n$ $-q\varepsilon_n$ $-q\varepsilon_n$	ε_f $-\varepsilon_f$ ε_f $-\varepsilon_f$	ε_L ε_L ε_L ε_L			
11		ε_1 ε_2 ε_3 ε_4	$q\varepsilon_f$ $q\varepsilon_f$ $q\varepsilon_f$ $q\varepsilon_f$	$q\varepsilon_n$ $q\varepsilon_n$ $-q\varepsilon_n$ $-q\varepsilon_n$	ε_f $-\varepsilon_f$ ε_f $-\varepsilon_f$	ε_L ε_L ε_L ε_L			
$2(\varepsilon_f + \varepsilon_L)$ A hajlítást nem érzékel $2(1+\mu)\varepsilon_f$ Csak a húzást érzékel $2(1+\mu)\varepsilon_n$ Csak a hajlítást érzékel $4\varepsilon_n$ Csak a hajlítást érzékel $4\varepsilon_f$ Csak a csavarást érzékel $(q - \frac{1}{2})(1-\mu)\varepsilon_n$ $\sqrt{2}(1-\mu)\varepsilon_n$ Csak a hajlítást érzékel									



a)



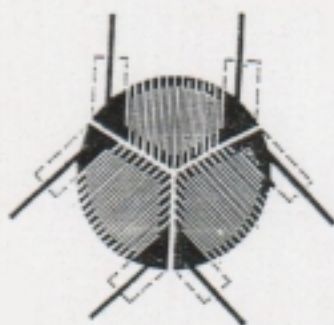
b)



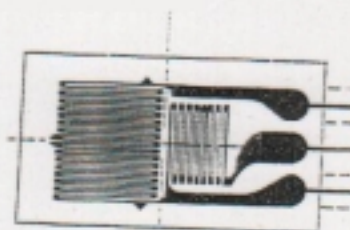
c)



d)



e)



f)

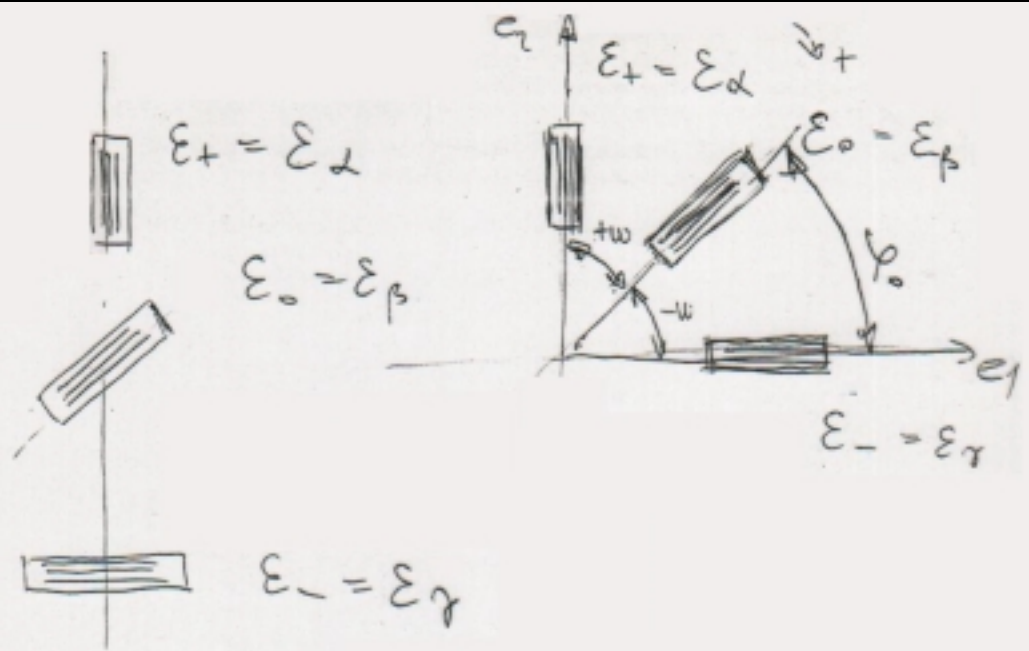
Különböféle fólia nyúlásmérő ellenállások

A 45° -os szögben álló mérőellenállások a pozitív és a negatív főnyúlásokat érzékelik.

A d) ábrán bemutatott típus a membránok nyúlásmérésére alkalmas. A középső kettős spirális a tangenciális nyúlásokat érzékeli, míg a sugárirányú részek ellenállásváltozása a radiális nyúlással arányos.

Az e) ábrán nyúlásmérő rozettát láthatunk. A két alsó vezetékrendszer egymásra merőleges, a középső pedig ezekkel 45° -os szöget zár be. Szokásos a $3 \times 60^\circ$ -os elrendezés is.

Az f) ábrán bemutatott „feszültség—nyúlásmérő ellenállás”-nak két mérőrendszere van, e két rész ohmos ellenállásának aránya a mérendő tárgy anyagának



$$\epsilon_\beta = \epsilon_0 = \frac{1}{2} (\epsilon_1 + \epsilon_2) + \frac{1}{2} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \cos \varphi_0$$

$$\epsilon_\alpha = \epsilon_+ = \frac{1}{2} (\epsilon_1 + \epsilon_2) + \frac{1}{2} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \cos 2(\varphi_0 + \omega)$$

$$\epsilon_\gamma = \epsilon_- = \frac{1}{2} (\epsilon_1 + \epsilon_2) + \frac{1}{2} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \cos 2(\varphi_0 - \omega)$$

$$\log \varphi_0 = A \log \omega$$

$$\epsilon_1 = B + C$$

$$\epsilon_2 = B - C$$

$$A = \frac{\varepsilon_- - \varepsilon_+}{2 \varepsilon_0 - \varepsilon_+ - \varepsilon_-}$$

$$B = \frac{\varepsilon_+ + \varepsilon_- - 2 \varepsilon_0 \cos 2\omega}{2 (1 - \cos 2\omega)}$$

$$C = \frac{-\varepsilon_+ + \varepsilon_-}{2 \sin 2\omega \sin 2\psi_0}$$

$$\omega = 45^\circ \text{ exact}$$

$$A = \frac{\varepsilon_\gamma - \varepsilon_\alpha}{2 \varepsilon_\beta - \varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma}$$

$$\hat{b}_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2)$$

$$\hat{b}_2 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\mu \varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

$$B = \frac{1}{2} (\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\gamma)$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{\mu}{E} (\hat{b}_1 + \hat{b}_2)$$

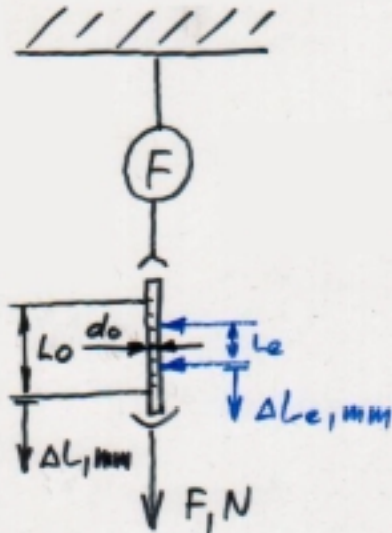
$$C = \frac{1}{2} \sqrt{(2 \varepsilon_\beta - \varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma)^2 + (\varepsilon_\gamma - \varepsilon_\alpha)^2}$$

$$\varepsilon_\beta = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\gamma - \varepsilon_\beta$$

Szakítóvizsgálat

MSZ EN 10002

EUV:



$T = -10 \div 35^\circ\text{C}$

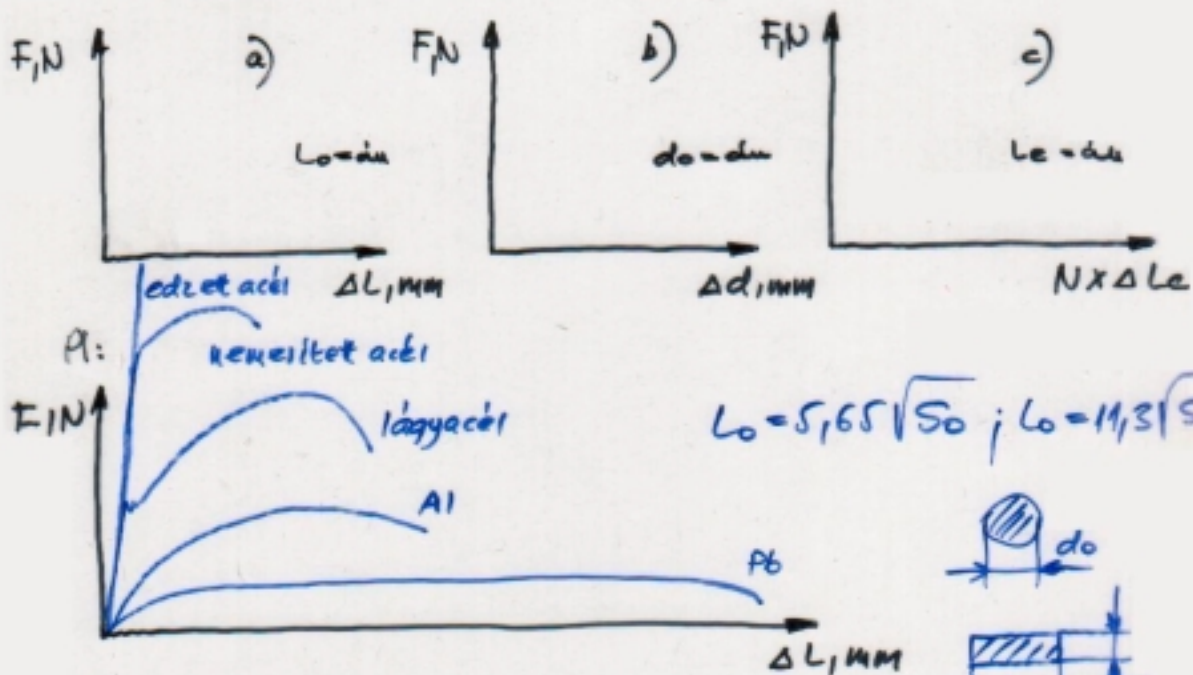
terhelési sebességek

$$\dot{\epsilon} = 10 \frac{\text{MPa}}{\text{s}}$$

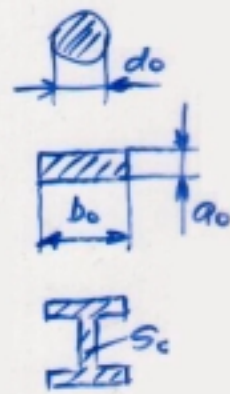
$$\dot{\epsilon}_{AL} = 0,1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

- Célja:
- rugalmassági,
 - szilárdsági,
 - alakváltozási és
 - szilárdsági jellemzők meghat.

A szakítódiagramok típusai:

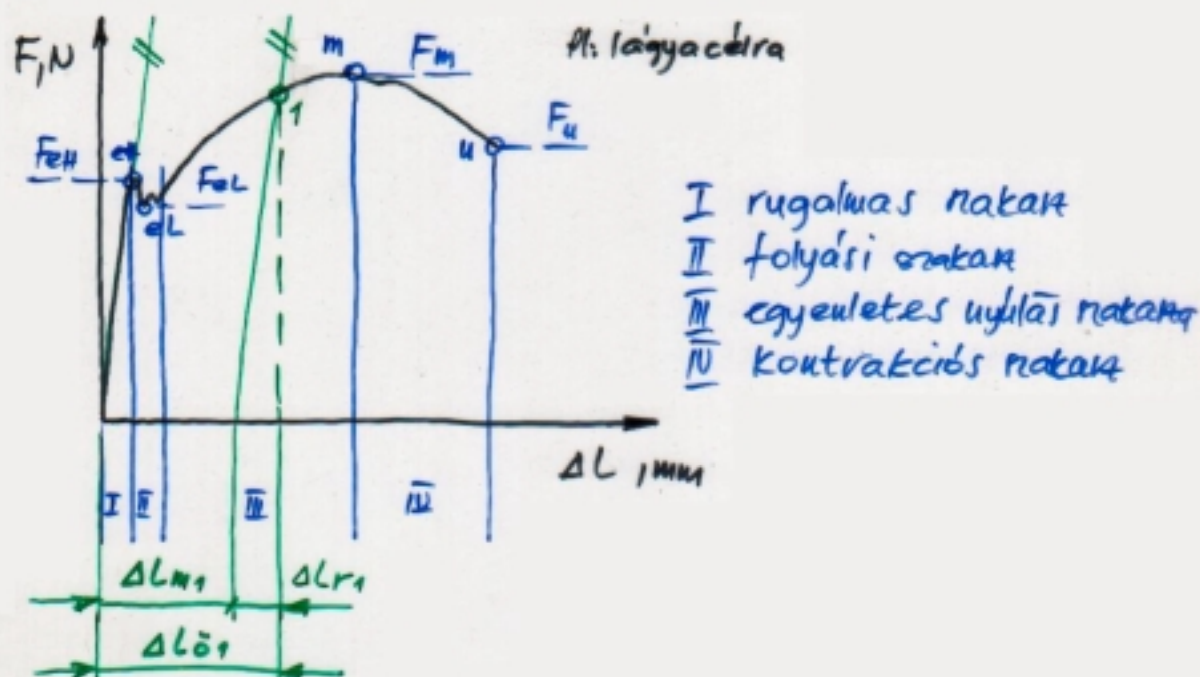


$$L_0 = 5,65 \sqrt{S_0} ; L_0 = 11,3 \sqrt{S_0}$$



- nyúlás mérés
- átmérés mérés
- finomnyúlás mérés

A szakítódiaagram jel. szakaszai:



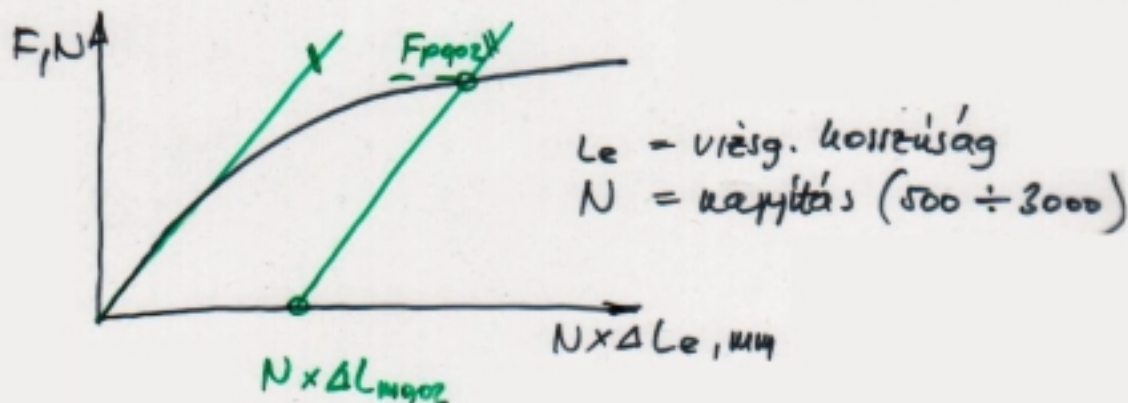
I A rugalmas szakasz

- csupán ráérkezői torzulás; terhelés után a méret visszatér.

Meghatározandó mérőszámok: $R_{p0,02}$, E , ν

$R_{p0,02}$, MPa egyezményes rugalmassági határ

$$R_{p0,02} = \frac{F_{p0,02}}{S_0} \quad (\sigma_m = 0,02\% = \frac{\Delta L_{m0,02}}{L_e} \cdot 100\%)$$



A rugalmas alakváltozás mértékét – a feszültség (terhelés),
 – az E rug. modulus,
 – a G csúsztató modulus,
 – a ν Poisson tényező,
 – a χ kompressibilitási tényező határozza meg

E , MPa azt a fiktív feszültséget jelenti, amely 100%-os rugalmas megnyúlást okozna
 ($\sigma_r = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\% = 100\% \rightarrow \epsilon_r = \frac{\Delta L}{L_0} = 1$)

G , MPa azt a fiktív feszültséget jelenti, amely egységnyi sugarú rúd palástjának egységnyi körüli ívén egy radián nagyságú rugalmas elcsavarodást okozna

ν , – a Poisson tényező a feszültség irányára merőleges méretek és a feszültséggel párhuzamos méretek rugalmas alakváltozásának hányadosa

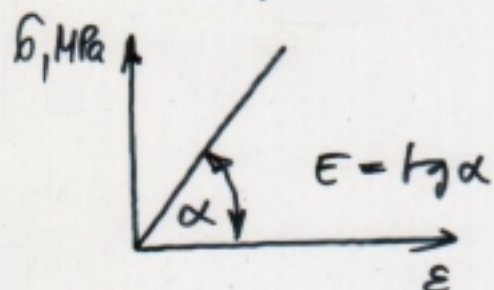
χ , a felm egységnyi térfogatának megváltozása a minden irányú nyomással egy arányosulóval való növekedése következtében

A rugalmasági tényezők kapcsolata

$$\frac{E}{2G} = 1 + \nu ; \chi = \frac{3(1-2\nu)}{E}$$

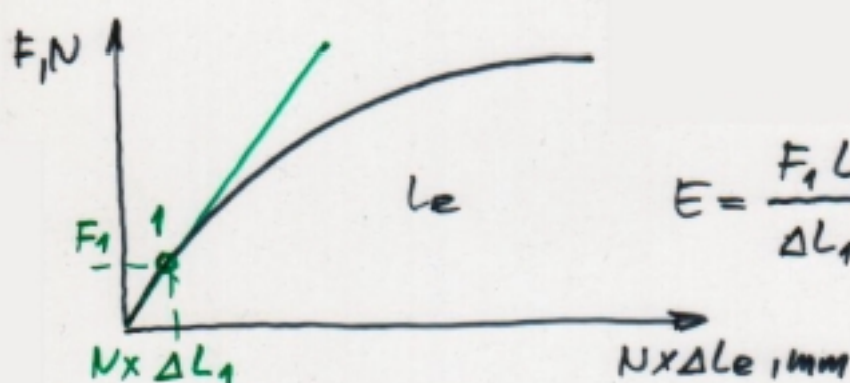
E rugalmassági modulus , MPa v. GPa

Az egyszerű Hooke törvény $\sigma = \varepsilon E$



$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, -$$



$$E = \frac{F_1 L_e}{\Delta L_1 \cdot S_0}, \text{ MPa}$$

ν Poisson tényező

$$\nu = - \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l}, \text{ ahol } \varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}$$

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta L}{L_e}$$

G csúsztató modulus , MPa v. GPa

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

χ kompresszibilitási tényező $\frac{1}{\text{MPa}}$ v. $\frac{\text{mm}^2}{\text{N}}$

$$\chi = \frac{3(1-2\nu)}{E}$$

Színfémek rugalmassági tényezői (25°C-on)

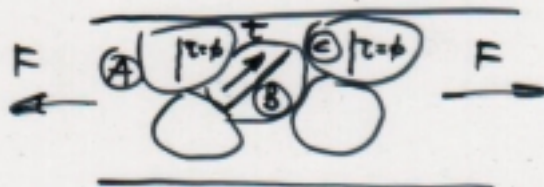
	E, MPa	G, MPa	$\nu, -$	$\chi, \frac{\text{mm}^2}{\text{N}}$ 10^{-5}
Al	$0,74 \cdot 10^5$	$0,27 \cdot 10^5$	0,340	1,34
Cu	$1,20 \cdot 10^5$	$0,40 \cdot 10^5$	0,35	0,72
Fe	$2,12 \cdot 10^5$	$0,80 \cdot 10^5$	0,27	0,59
Ni	$1,65 \cdot 10^5$	$0,60 \cdot 10^5$	0,28	0,53
Pb	$0,18 \cdot 10^5$	$0,06 \cdot 10^5$	0,45	2,37
Ti	$1,06 \cdot 10^5$	$0,40 \cdot 10^5$	0,34	0,80
W	$4,15 \cdot 10^5$			0,32

Egyéb anyagokra:

	E, MPa
ötvezetlenn acél	$2,1 \cdot 10^5$
öntöttvas	$1,0 \cdot 10^5$
Ni acél	$1,9 \cdot 10^5$
fenyőfa	$0,1 \cdot 10^5$

A rugalmas alakváltozás sajátosságai:

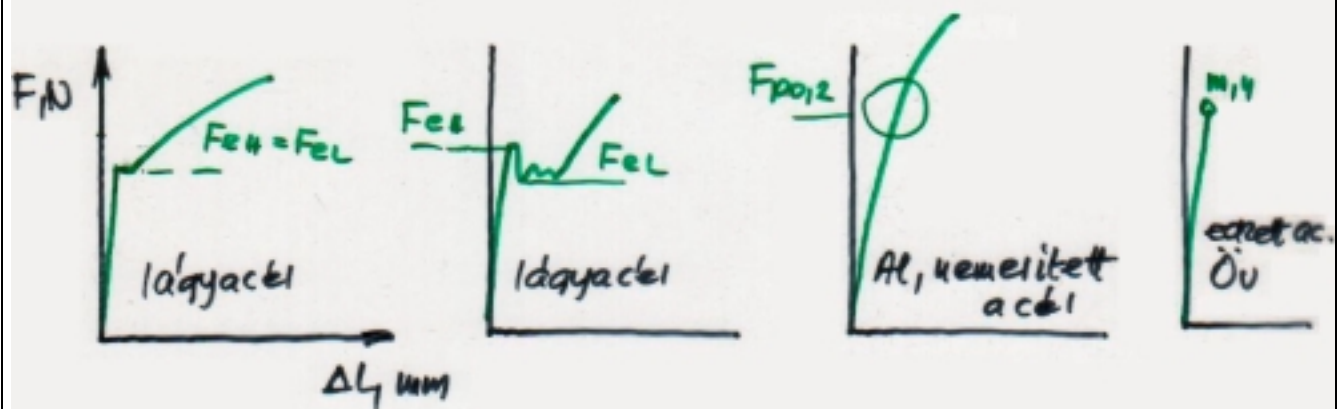
- egykristályban maradó alakváltozás T_k felett (homogén és anizotróp a mindkét irányban)
- polikristallin fém esetében



(homogén és izotróp)

a képlekény alakváltozás leírására nagyobb felületre kerül indul be.

II A folyási alakát



Főbb fizikai jelenségek:

- a képlékeny alakváltozás diszlokációs mech.,
- a Cottrell-atmoszféra befolyása,
- az alsó és felső folyáskor különválása

Mérőszámok:

alsó folyáskor $R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}, MPa$

felső folyáskor $R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}, MPa$

egyezményes folyáskor (terhelt állapotban) $R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}, MPa$

névtelen folyáskor (δ átváltozás %-ban) $R_t(\delta) = \frac{F_t(\delta)}{S_0}, MPa$

III Az egyenletes nyúlás miatt

fajlagos nyúlás ε , -

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L_0} \quad ; \quad \varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L_0} = \frac{1}{L_0} L \Big|_{L_0}^L = \frac{L-L_0}{L_0}$$

$$\varepsilon_m = \frac{L_m - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_m}{L_0}$$

valódi nyúlás φ , -

$$d\varphi = \frac{dL}{L} \quad ; \quad \varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln L \Big|_{L_0}^L = \ln \frac{L}{L_0}$$

a térfogatállandóság $L_0 S_0 = L S \rightarrow \varphi = \ln \frac{S_0}{S}$

$$\varphi_m = \ln(1 + \varepsilon_m) = \ln \frac{S_0}{S_m} = 2 \ln \frac{d_0}{d_m}$$

reaktórreakciósság R_m , MPa

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ MPa}$$

valódi feszültség R' , MPa

$$R' = \frac{F}{S} = R \cdot (1 + \varepsilon) = R e^{\varphi}$$

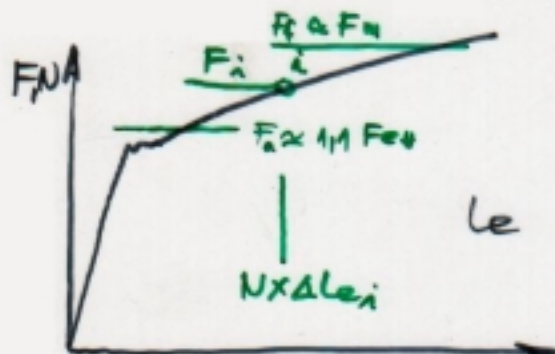
$$R'_m = \frac{F_m}{S_m} = R_m (1 + \varepsilon_m) = R e^{\varphi_m}$$

keményedési kitevő n , -

Utóbbi szerint az $R' - \varphi$ kapcsolat jól közelíthető

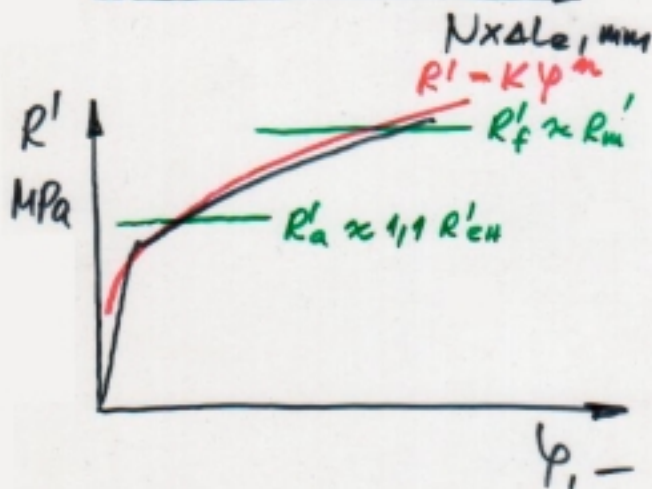
$$R' = K \varphi^{(n)} \text{ függvényrel}$$

A Keményedési kitévő meghatározása



$$R'_i = \frac{F_i}{S_0} \left(1 + \frac{\Delta l_{ei}}{l_e}\right)$$

$$\varphi_i = \ln \left(\frac{l_e + \Delta l_{ei}}{l_e} \right)$$



$$R' = K \varphi^n$$

$$\lg R' = \lg K + n \lg \varphi$$

$$Y = a + b X$$

n : a keményedésképtelenség mértéke, az anyag azaz tulajdonságát jellemző, hogy képlékeny alakváltozáskor az anyag mennyire ad ellen a növekvő igénybevételnek

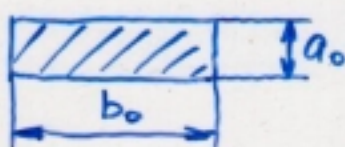
r képlékenységi anizotrópia - (keményedési)

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_a}$$

φ_b valódi nyúlás a szélességi irányban

$$\varphi_b = \ln \frac{b_0}{b}$$

Lapos próba raktára



φ_a valódi nyúlás a vastagsági irányban

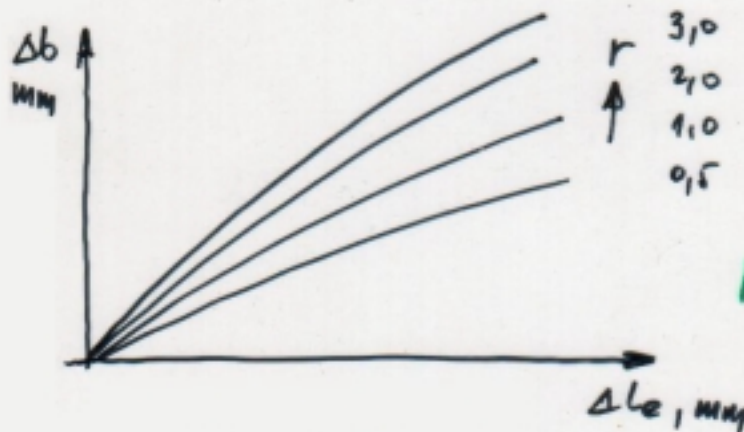
$$\varphi_a = \ln \frac{a_0}{a}$$

r : a kúszerek alakja, ahol a kúszvastagság
változásával szemben tanúsított ellenállást jelenti.

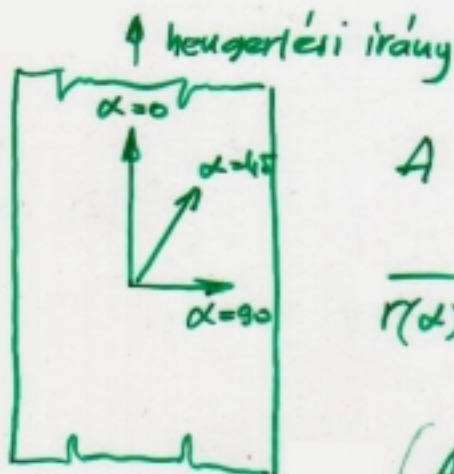
A térfogatátandóság: $L b_0 a_0 = L b a$, így

$$r = \frac{\gamma_b}{\gamma_{le} - \gamma_t} \quad ; \quad \gamma_{le} = \ln \frac{L}{l_e}$$

$$\Delta b = b_0 \left[1 - \left(1 + \frac{\Delta l_e}{l_e} \right)^{-\frac{r}{r+1}} \right], \text{ mm}$$



M1-05 33.022-77

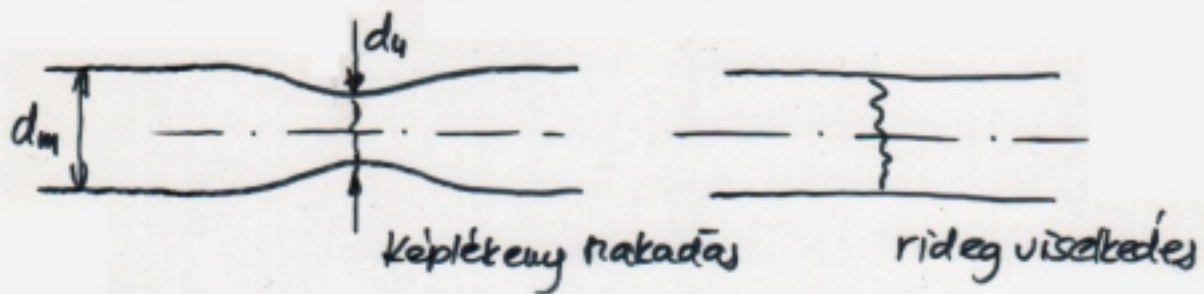


A Langford szám

$$\overline{r(\alpha)} = \frac{r(0) + 2r(45) + r(90)}{4}$$

(Anizotrópia - tértép)
 $r(\alpha)$

IV A kontrakciós szakasz



a kontrakciós feszültség R_u , MPa

$$R_u = \frac{F_u}{S_u}, \text{ MPa} \quad R_u = R_u'$$

sakadásti fajlagos nyúlás A , %

$$\text{ha } L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}, \text{ akkor } A$$

$$\text{ha } L_0 = 11,3 \sqrt{S_0}, \text{ akkor } A_{11,3}$$

nem arányos próbatételkor $A(L_0)$ pl: A_{80}

$$A = \frac{\Delta L_u}{L_0} \cdot 100 \%$$

térjes fejl. nyúlás szakadáskor A_t , %

$$A_t = \frac{L_{u \text{ öttek} } - L_0}{L_0} \cdot 100 \%$$

kontrakció ε , %

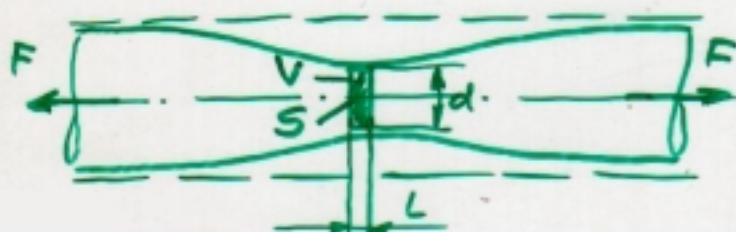
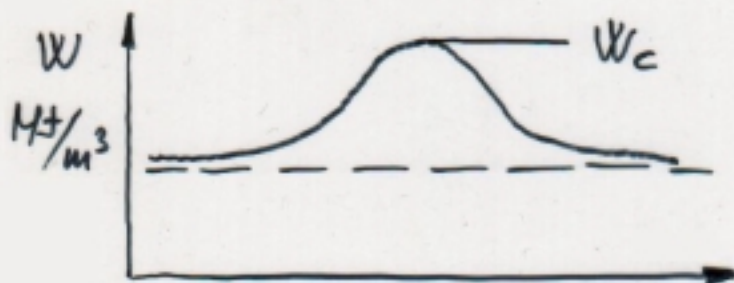
$$\varepsilon = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \%$$

Különböző jelöléseken mért fejl. nyúlások átnevezése az Oliver-keplet alapján

$$A = 2A_5 \left(\frac{\sqrt{S_0}}{L_0} \right)^{0,4}$$

A fajlagos törésmunka W_c , MJ/m^3

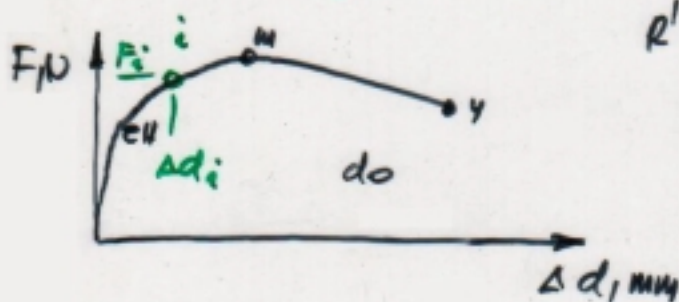
W_c : a törést okozó munkának a térfogatra vonatkoztatott fajlagos értéke



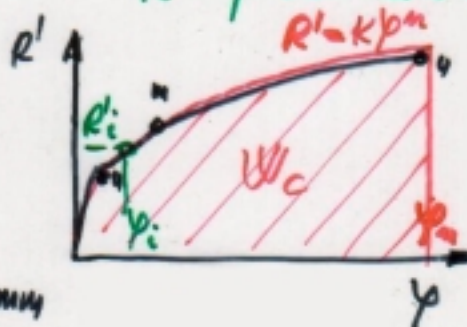
$$W_c = \int_{L_0}^{L_f} \frac{F dL}{V} = \int_{L_0}^{L_f} \frac{F dL}{SL} = \int_{\varphi=0}^{\varphi_f} R' d\varphi$$

W_c meghatározása:

- $F - \Delta d$ diagram felvétele



- $R' - \varphi$ szerkesztése



$$d_i = d_0 - \Delta d_i; S_i = \frac{d_i^2}{4}$$

$$R'_i = \frac{F_i}{S_i} \text{ MPa}; k_i = 2 \ln \frac{d_0}{d_i}$$

Kiértékelés:

a) grafikusan (a diagram alatti terület planimetrikiával)

b) számítással

A Nádai közelítés szerint $R' = K \varphi^n$

$$W_c = \int_{\varphi=0}^{\varphi_n} R' d\varphi = \int_{\varphi=0}^{\varphi_n} K \varphi^n d\varphi = \frac{K \varphi^{n+1}}{n+1} \Big|_{\varphi=0}^{\varphi_n} =$$

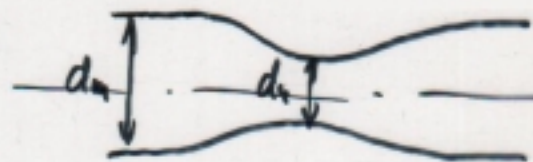
$$= \frac{K \varphi_n^n \cdot \varphi_n}{n+1} = \frac{R_u' \varphi_n}{n+1}$$

$$R_u' = \frac{F_u}{S_u}$$

$$\varphi_n = 2 \ln \frac{d_0}{d_m}$$

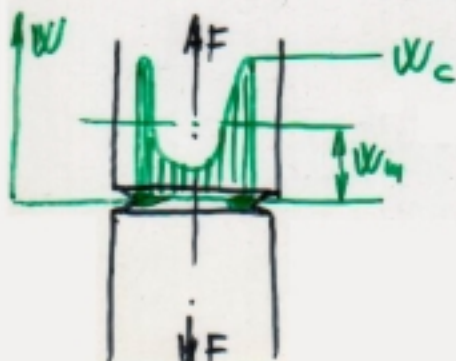
jó közelítéssel: $n = \varphi_m - 2 \ln \frac{d_0}{d_m}$

$$W_c = \frac{R_u' \varphi_n}{1 + \varphi_m}, \text{ Mt/m}^3$$

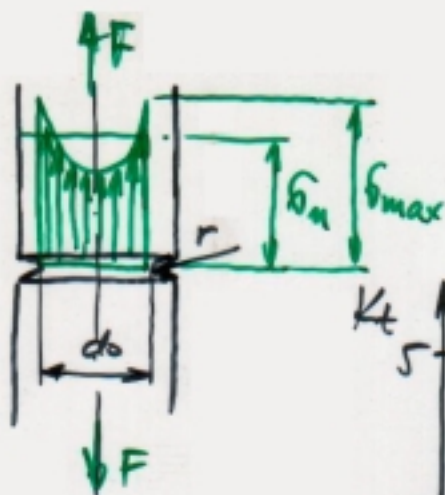


W_m az átlagos fajlagos törésmunka, Mt/m^3

W_m : bevezetett próbátípus!

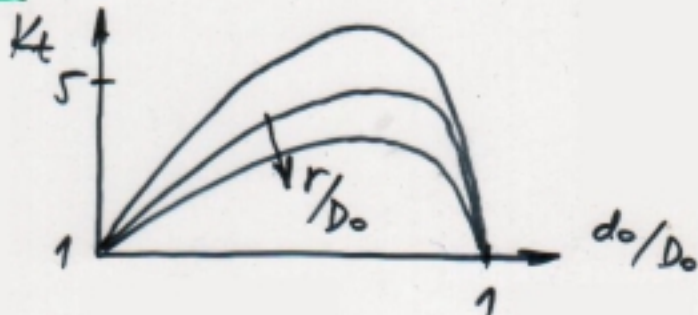


$$W_m = \int_{\varphi=0}^{\varphi_n} R' d\varphi$$



a formateüvező

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$$

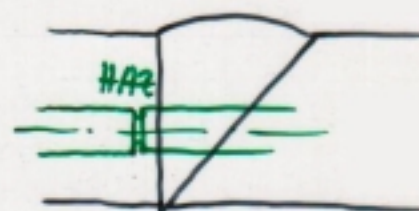


A geometriai hatásra többteengelyű közörfeszítési állapotba kerül a pt. $\rightarrow$ ridegesedés



Alk: - a ridegeségi hajlami
ellenőrzésére

- helyi merőlegesként



Radiális nagyrágrend:

50-500 Mt/m³

100 alatt ritteg

Szilvársági merőleges

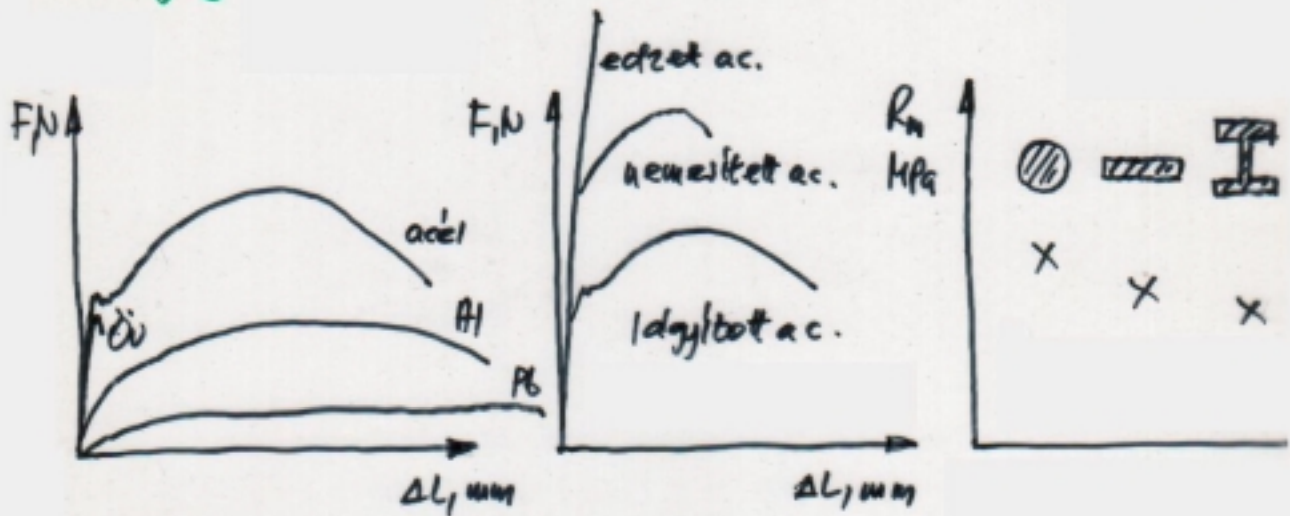
Az állapotüvezők (hőmérséklet, sebesség, ferr. óri)
hatásának ellenőrzése

A szaktörzsvizsgálat eredményeit befolyásoló tényezők

1. anyag

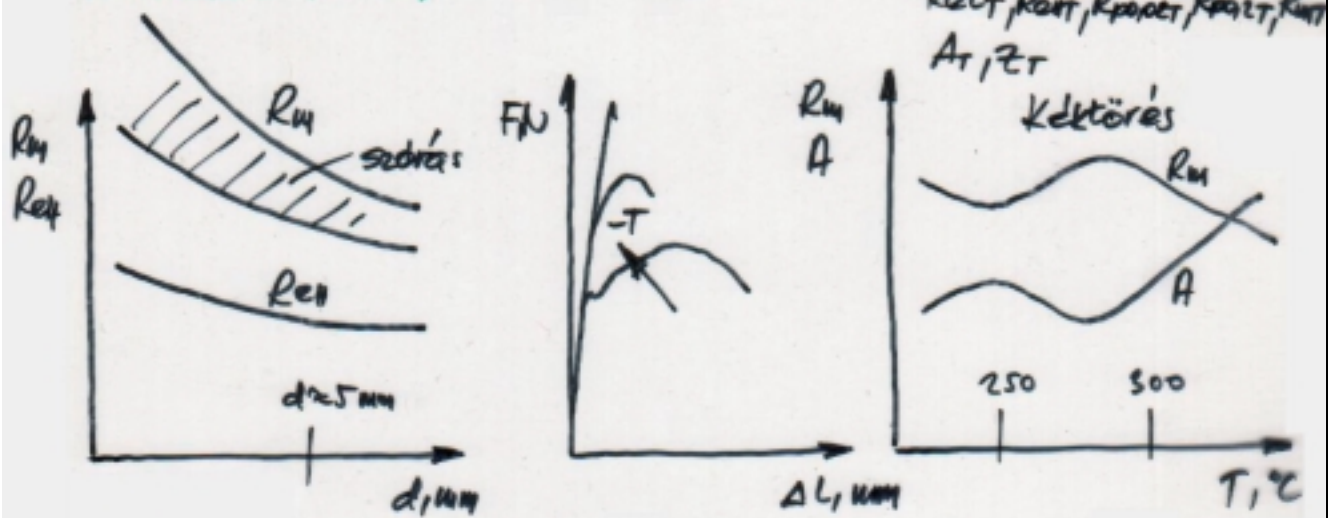
2. hőkezelés

3. a pt. alakja



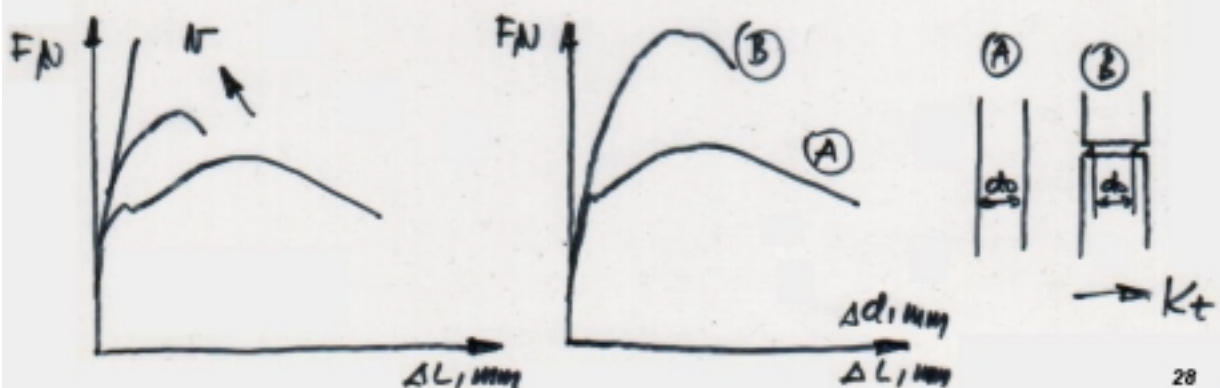
4. átmérő (méret)

5. hőmérséklet



6. sebesség

7. bemetrzési életrége (fesz. állapot)



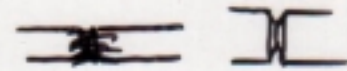
Hegesztett kötések szakítópróbái

A) Vastag lemezeknél

a) hegyeres pt.



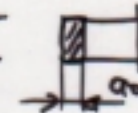
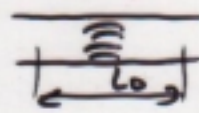
b) beemeltetett hegyeres pt.



$$L_0 = 5,65\sqrt{S_0} ; 11,3\sqrt{S_0}$$

B) Lemez, szalag, rúd és ídomacéllokuk

a) lapos pt.



$$b_0/a_0 \leq 4$$

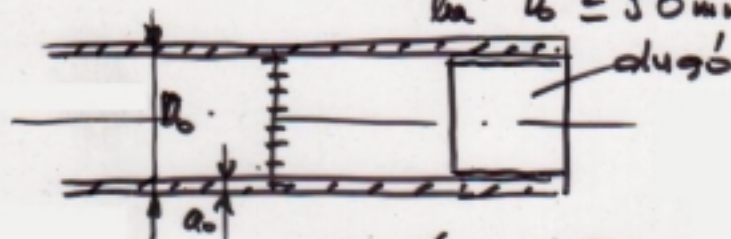
b) beemeltetett lapos pt.



C) csővek próbái

a) teljes keresztmetszetű cső pt.

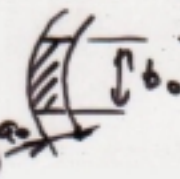
$$b_0 \leq 50 \text{ mm}$$



$$S_0 = (D_0 - a_0) \pi a_0$$

b) csőíű pt.

$$S_0 = k a_0 b_0, \text{ ahol } k = 1 + \frac{b_0^2}{6 D_0 (D_0 - 2a_0)}$$



$$b_0 \leq 10$$

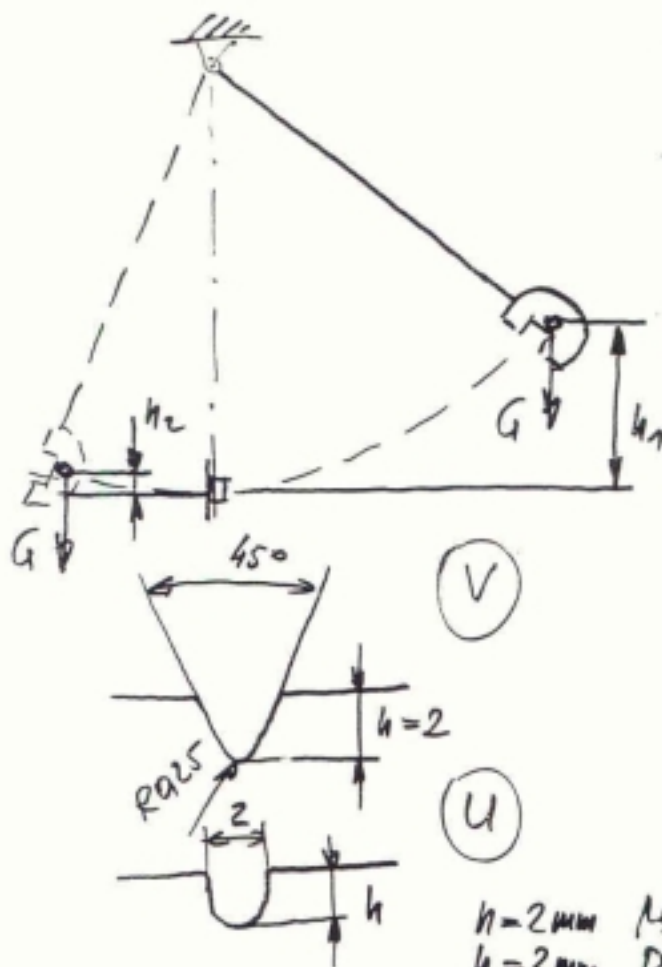
$$S_0 = a_0 \cdot b_0 \quad (S > 10 \text{ -nél})$$

ūtveikajlito vīzģālat

A szülszög mértékai:

- fajlagos törésmunka $W_c, \text{MJ/m}^3$,
- átlagos fajl. törésmunka $W_m, \text{MJ/m}^3$,
- nemerített acélben $R_{p0.2}/R_m$ viszonyra
- törési szilárdság $K_{Ic}, \text{MPa m}^{1/2}$,
- kritikus repedéskinyílás COD, mm ,
- az ütővizsgálatból
 - ütőmunka KU, J ,
 - KV, J , ill.
 - fajlagos ütőmunka $KCU, \text{J/cm}^2$,
 - $KCV, \text{J/cm}^2$.

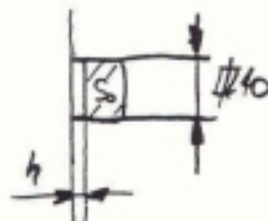
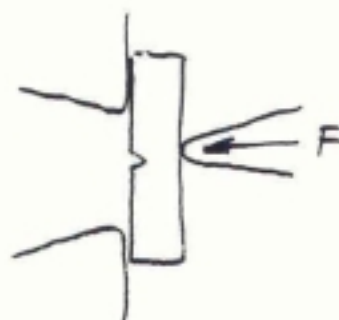
A vizsgálát elve, próbatételjei:



$$K = G(q_1 - q_2), f$$

$$K_{max} = G h_1 \quad (150,300 \text{ t})$$

$$v = 5 - 7.4 \text{ m/s}$$



h = 2 mm Messenger
h = 3 mm DVM
h = 5 mm ISO 4

A mérőszámok:

űtőmunka: KU , ill. KV J-ban,

fajlagos űtőmunka: KCU , ill. KCV J/cm²-ben

$$KCU = \frac{KU}{S_0} \quad , \quad KCV = \frac{KV}{S_0}$$

Jelölés:

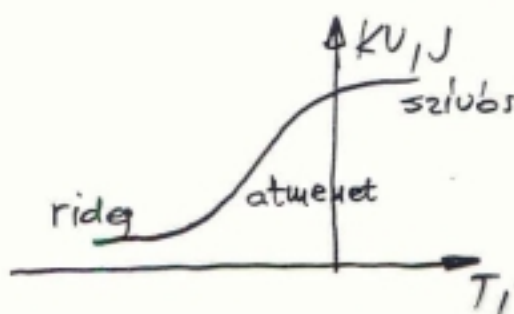
$$KU \overset{-40}{\underset{150/3}{\underset{K_{max}}{\text{---}}}} \overset{-T}{\text{---}} = 25 \text{ J}$$

A vizsgálat fontosabb alkalmazásai:

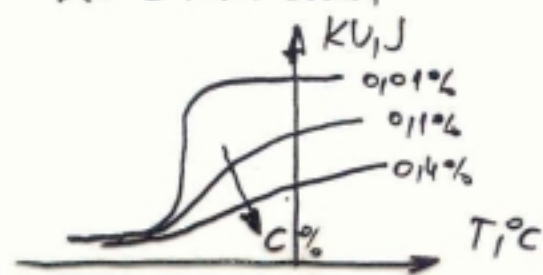
- átvételi vizsgálatban a szivósság minősítésére,
- a ridegedési hajlamléleddézésére,
- az öregedési hajlamléleddézésére,
- a megeresztési elridegedési éleddézésére,
- a hőkezelési technológiai problémákra,
- a készített kötések technológiai problémáira,
- nyomástartó edények megeresztési üzemi hőmérsékletének kijelöléséhez,
- a cél szerkezetek anyagválasztásához.

az B) A ridegedési hajlamléleddézés

A ridegség fogalma, az állapotüzeret befolyása: (T, v, ϕ) .
Az átmeneti hőmérséklet T_T , °C értelmezése

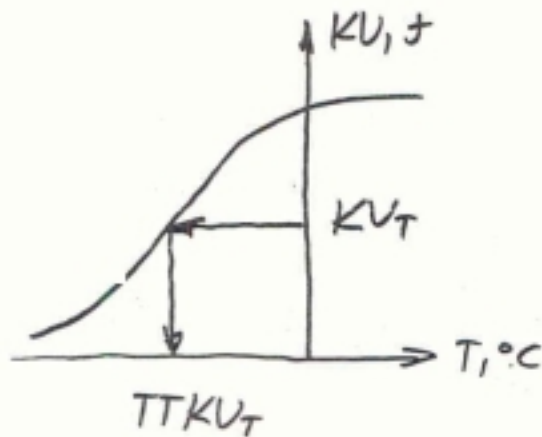


DE: C tart. katasz



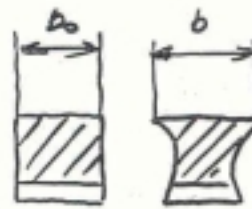
Az átmeneti hőmérséklet meghatározásának módszerei

a) KV-I diagramból



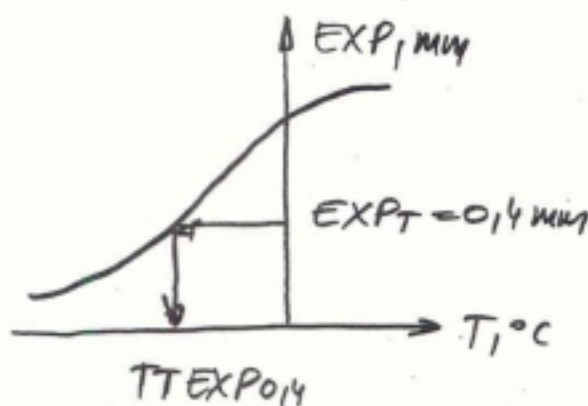
ha $R_m \leq 470 \text{ MPa}$, $KV_T = 27 \text{ J}$

ha $R_m > 470 \text{ MPa}$, $KV_T = 40 \text{ J}$

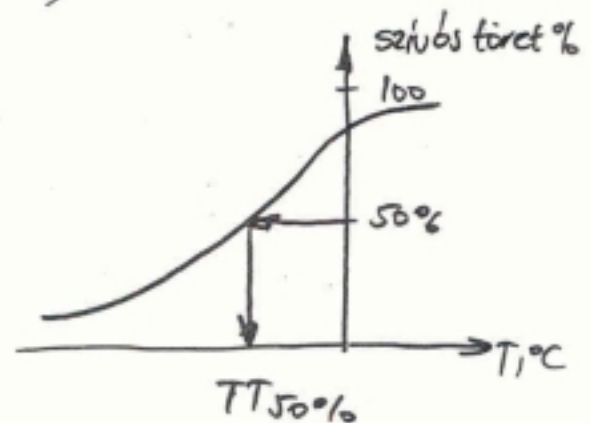


$$EXP = b - b_0, \text{ mm}$$

b) EXP-T diagramból



c) a töret alapján



adC) Az öregedési hajlaml vizsgálat

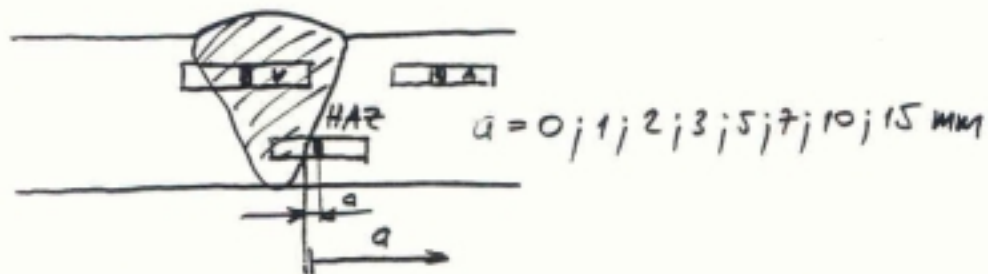
Az öregedés felutáni magyarázata (Cottrell elm.)

A mesterséges öregítés: 10%-os hidegalakítás,
250°C-on 1/2 óráig tartó tartózkodás,
ütés

Az öregedés mértéke:

$$\ddot{O} \% = \frac{KV_n - \overset{\text{normalizált}}{KV_{\ddot{O}}}}{KV_n} \cdot 100\%$$

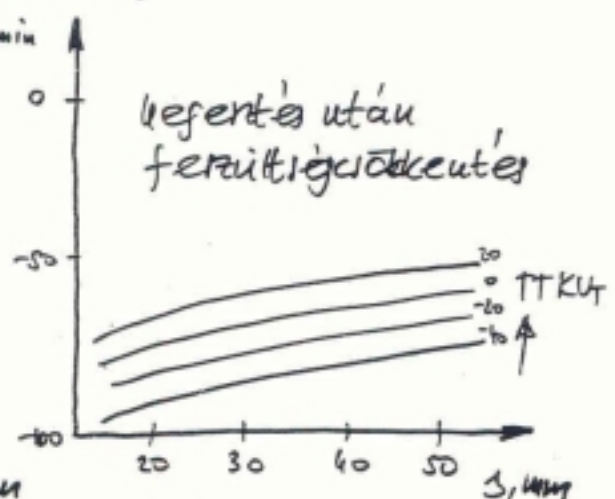
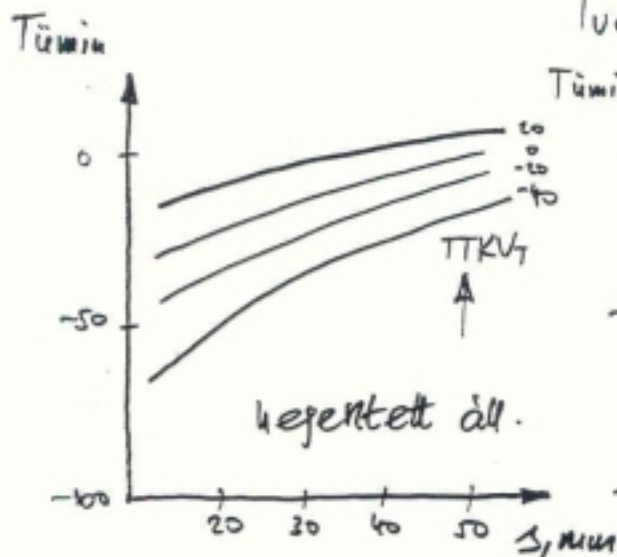
ad F) Hegesztett kötés elevebrzése



ad G) Nyomástartóbedények megfelelő minimális üzemi hőmérsékletének kijelölése

$$T_{\min} = f_{gu} (TTKV_T; s, \Phi)$$

, fer. állapot
vastagság



ad H) Negatív hőmérsékleten üzemelő acél szerkezetekhez anyagválasztás

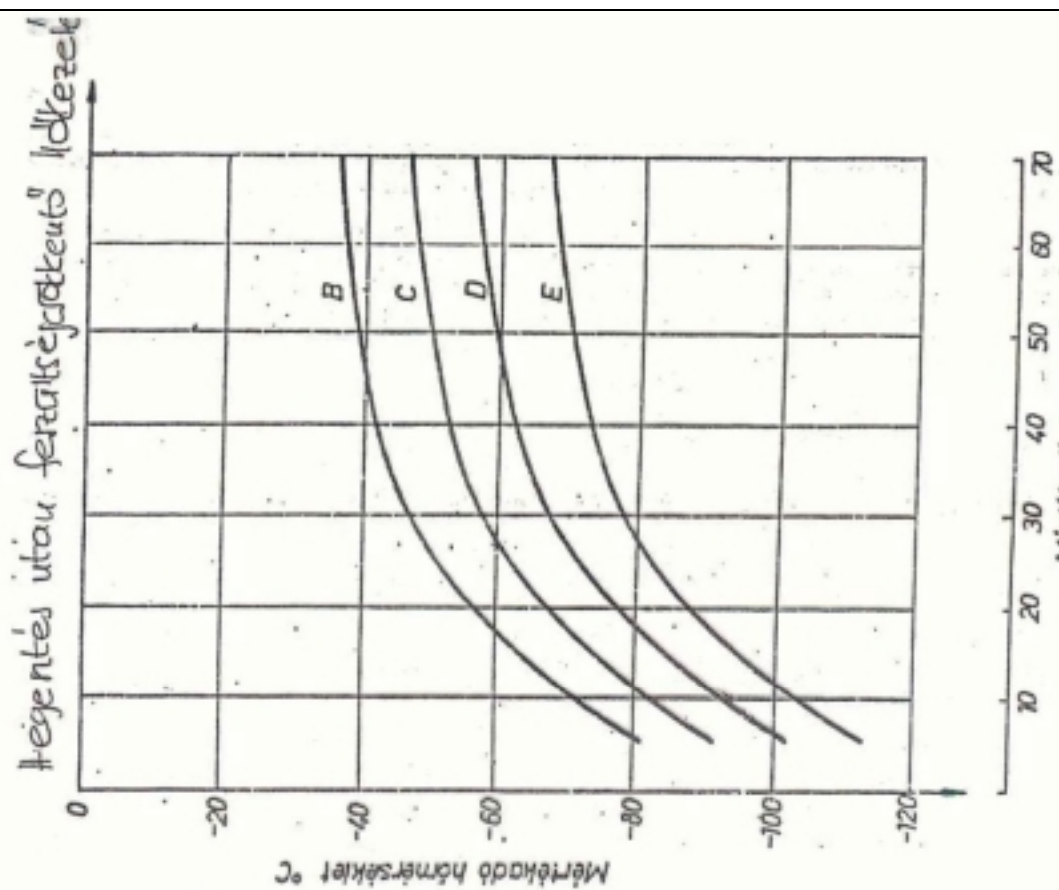
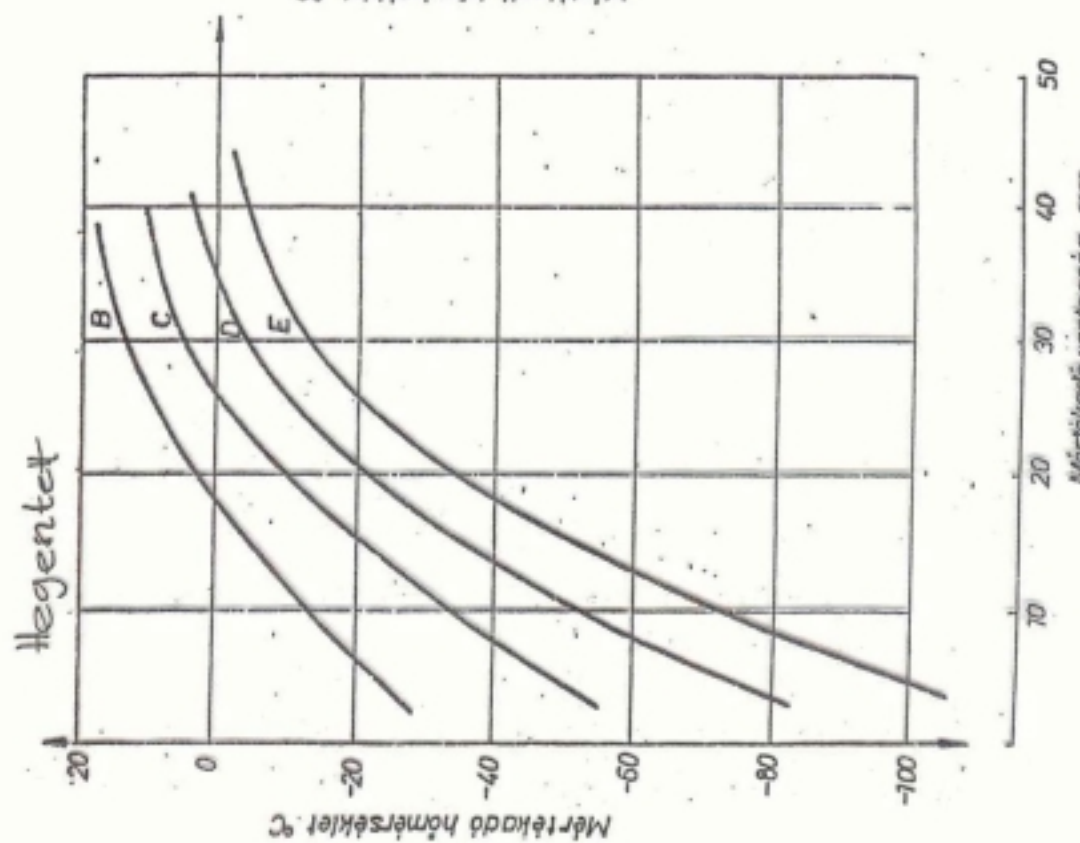
A befolyásoló tényezők:

$$R_m \quad s \quad T_u \quad K \quad S \quad q$$

HPa mm °C | alakítás mértéke

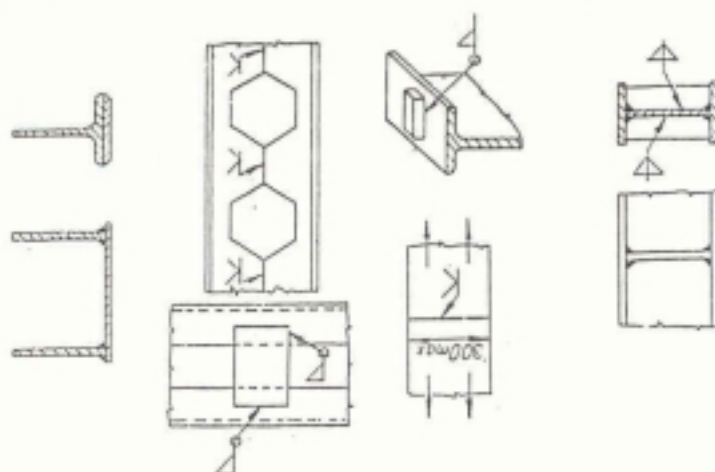
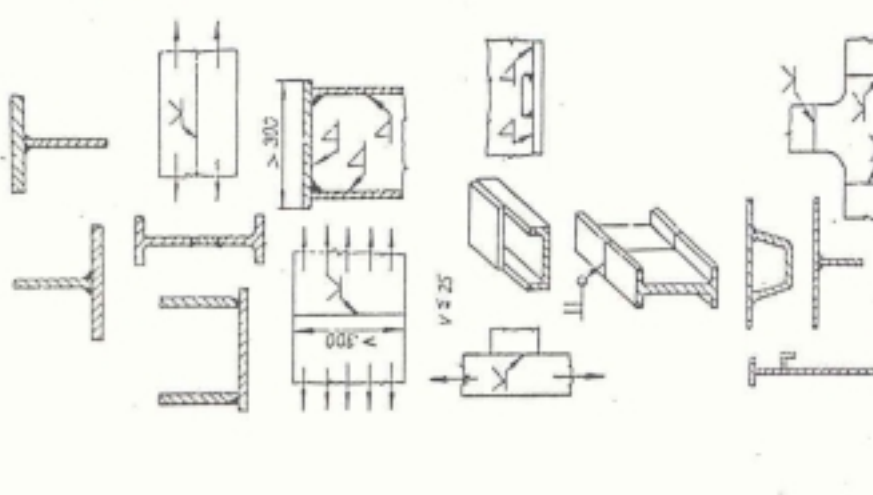
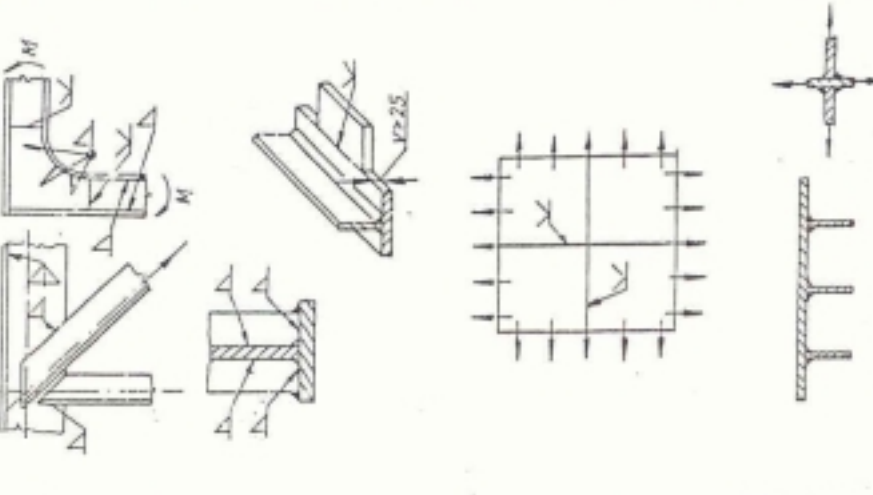
| jelentőségi tényezők

szerkezetalkotási tényezők



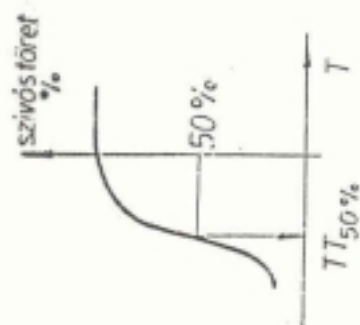
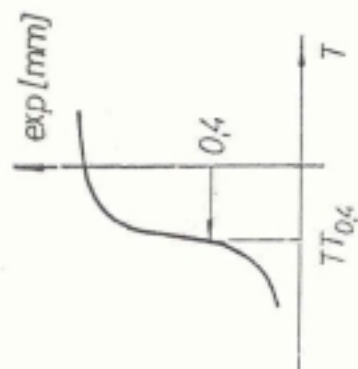
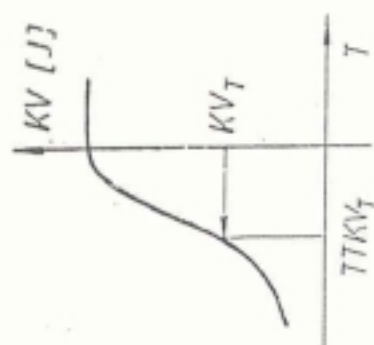
3.2. táblázat

A szerkezeti kialakítás	K	A szerkezeti kialakítás jellemzése
kedvező	1,0	egyszerű kialakításu, főként egytengelyű igénybevételű szerkezeti részek, melyeknél a képlékeny alakváltozás lehetősége csak mérsékelten gátolt, így a sajátfeszültségek beépülhetnek,
közepesen kedvezőtlen	1,4	főként egytengelyű vagy mérsékelten kéttengelyű igénybevételű szerkezeti részek, melyeknél a képlékeny alakváltozások gátoltak, így a sajátfeszültségek beépülése kétséges,
különösen kedvezőtlen	2,0	jelentős, mértékű, tömbtengelyű feszültségállapotban üzemelő szerkezeti elemek, melyeknél a képlékeny alakváltozás gátolt.

Kedvező eset $K=10$	Közepesen kedvezőtlen eset $K=14$	Különösen kedvezőtlen eset $K=20$
		

3.3. táblázat

Az elem jelentősége	S	Idé tartoznak mindazon szerkezeti elemek, melyek tönkremenetele:
csekély	0,5	nincs hatással a szerkezet biztonságára
közepes	0,7	helyi sérülést vagy a használhatóság részleges csökkenését idézi elő, de a szerkezet egészének használhatóságát nem veszélyeztetik; pl. fiókgerenda, szélrács, keresztmérés, stb.
nagy	1,0	a szerkezet egészének vagy legfontosabb alkatrészeinek használhatóságát veszélyezteteti, pl. főtartók, kiálló tartók, darupályatartók, oszlopok, stb.



A TTKU átmeneti időértékre utaló jelek

Szerkezeti acélokhoz Mű EN 10025

		TTKU _T	KU _{T, J}
pl.	S355 J2 G3	-20	27
	S355 K2 G3	-20	40
JR	+20		
JO	0		
J2	-20		

Nyomtatott acélok anyagaihoz Mű EN 10025-

pl.		T	KU _{T, J}
	P355 N	-20	40
	NH	-20	40
	NL1	-50	27
	NL2	-50	30

Alacsony hővezelő, hővezető, fűtővezető szerkezeti acélok Mű EN 10113 -1, -2, -3

pl.		T	KU _{T, J}
	S355 N	-20	40
	NL	-50	27
	M	-20	20
	L	-50	16

Hűtőelektrodeknak

hűtési $R_{p,1} = 460 \text{ MPa}$

48

2 A 0 2 3... $R_{p,1}$ EN 756 - S 46 (3) ABS 2 $R_{p,1}$ $R_{p,1}$
 0 +20 0 - $KU_T = 421$

KORRÓZIÓS VIZSGÁLATOK

A műszaki gyakorlatban legelterjedtebben alkalmazott fémek természetes előfordulási formájukban, különböző vegyületek, többnyire oxidok, szulfidok, vagy karbonátok formájában találhatók a természetben.

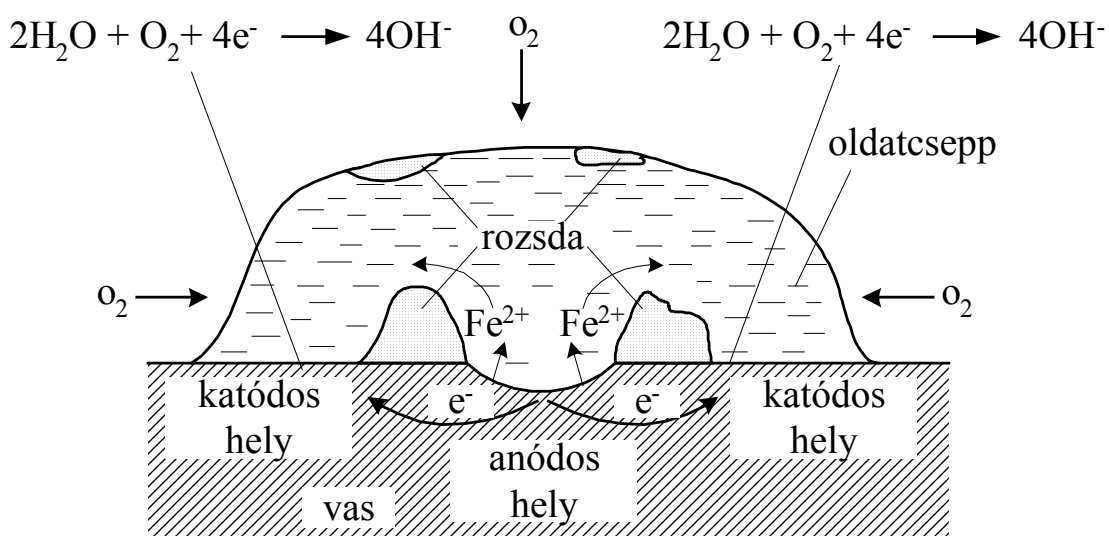
A metallurgiai eljárások révén előállított fémek és ötvözetek többsége így a környezete nemfémes komponenseivel érintkezve hajlamos arra, hogy energia-leadás közben a fémes állapotból ionos állapotba menjen át, azaz ismételten a számára legkedvezőbb minimális energia állapotba kerüljön.

Az ilyen módon bekövetkező károsodásukat **korróciónak** nevezzük.

A korróziós folyamatok típusai

Kémiai korrózióról akkor beszélünk, amikor az anyag és a gázhalmazállapotú közeg, vagy nem vezető folyadék között közvetlen kémiai kölcsönhatás jön létre.

Elektrokémiai korrózió az elektrolit közvetítésével megvalósuló reakcióban az anódos helyen a fémionok lépnek ki, amíg a katódos helyen az elektronok.



Helyi elem keletkezésének modellje

A korróziós folyamatok a kémiai reakció jellege alapján:

- *Hidrogén-depolarizációs* folyamatok esetében a fém H_2 gáz fejlődése mellett oldódik: ilyen például a fémek többségének oldódása erős savakban, vagy az alumínium oldódása lúgokban.
- *Oxigén-depolarizációs* folyamatnak tekinthetők az oxigén-fogyasztással járó korróziós folyamatok: ilyen például a vas és acél korróziója semleges sóoldatokban (ásványvízben, tengervízben és nedves levegőben), a cink korróziója semleges oldatban.
- *Vegyes típusú* folyamatok esetén egyidőben játszódik le a hidrogén-fejlődés és az oxigénfogyasztás: ilyen például az alumínium korróziója semleges oldatokban.

A korróziót előidéző és sebességét befolyásoló tényezők

- *az anyag minőségével* és állapotával kapcsolatos, az oldódási potenciál-különbséggel jellemezhető oldódási hajlam,
- *a korrozív közeg jellemzői*,
- a reakció-sebességet befolyásoló környezeti tényezők: *hőmérséklet, nyomás*.

Fémes anyagok korróziója

A korróziót előidéző elektrokémiai reakció sebességét alapvetően meghatározza a fémnek az ún. **oldódási potenciálsorban** elfoglalt helye.

Különböző fémek érintkezésekor az oldódási potenciál különbség ún. **kontakt korróziót** idézhet elő.

Amennyiben a szemcsehatárok menti dúsulások, idegen fázisok kiválása, vagy az ötvözőelemben való elszegényedés okoz mikroszkópikus méretű helyi elemeket, a **szemcsehatármenti korrózió** alattomos veszélyével kell számolnunk.

Az **energiaszint-különbség** oldódási potenciál-különbségeket hoz létre az anyag egyes részei között.

A korrózióknak kitett anyag minőségével és állapotával összefüggő tényezők mellett röviden ki kell térjünk **a korróziós közeg koncentráció-viszonyainak** hatására is. A légköri korrózió esetében a levegő oxigén- és páratartalma mellett szerepe van az egyéb légszennyező komponensek mennyiségének is.

A **kóboráramok** hatása, amely elsősorban városi környezetben, illetve villamosvasúti pályák közelében okozhat váratlanul gyors anyagromlást.

A korrózió megjelenési formái

Egyenletes korrózióról, vagy felületi korrózióról akkor beszélhetünk, ha a fém károsodását előidéző folyamatok a teljes felületre kiterjedően, azonos sebességgel zajlanak.

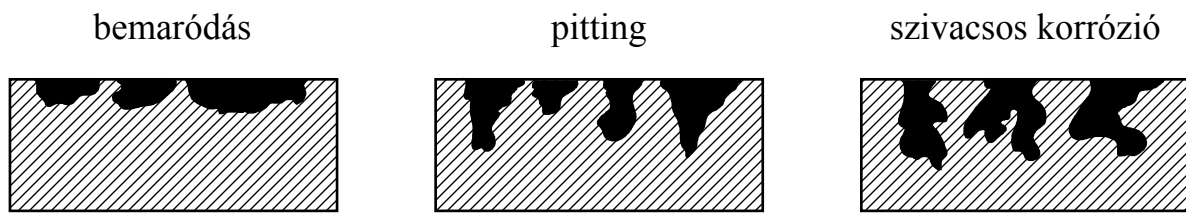
Adott körülmények között a korrózió sebessége az adott anyagra jellemző értéként meghatározható, mérhető. Jellemzésére alkalmas mérőszámok a fém felületegységéről időegységben oldatba ment fém tömege ($\text{g/m}^2\text{év}$), vagy **az időegység alatt elkorrodált réteg vastagsága (mm/év)**.

A **helyi korrózió** különböző formáit lényegesen veszélyesebb károsodási formáknak kell tekintenünk, mivel jóval rövidebb idő alatt okoznak tönkremenetelt, kevésbé prognosztizálhatók, emellett más károsodási mechanizmusok (például kifáradás, kopás) érvényesülését is elősegítik.

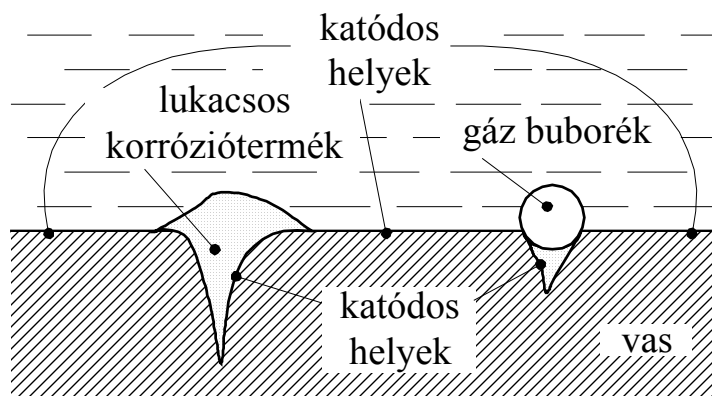
A helyi korrózió három alaptípusa:

- a) **bemaródás**: a korrózió mélysége a károsodott felülethez képest viszonylag kicsi,
- b) **pont- vagy lyuk-korrózió**, idegen szóval pitting: kis felületi kiterjedésű, nagy mélységű, tűszúrás jellegű lyukak keletkezése,
- c) **szivacsos korrózió**: szabálytalan alakú, mélyreható szivacsos járatok kialakulása, amely tipikusan a kontakt-

korrózió, vagy kóboráram okozta károsodás megjelenési formája.



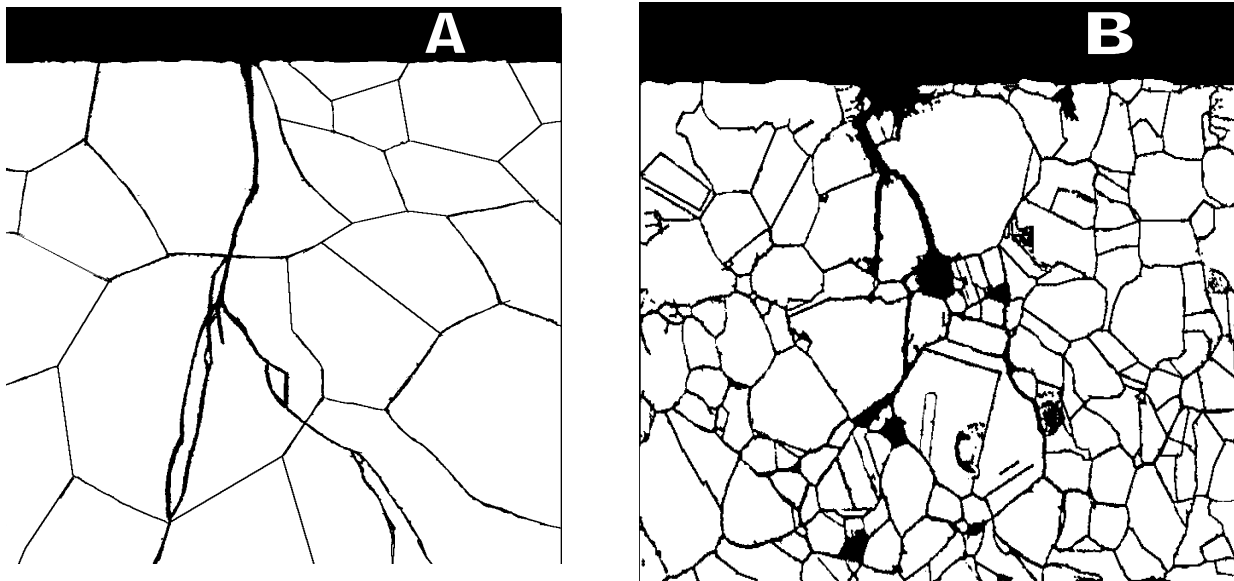
A helyi korrózió tipikus megjelenési formái



Réskorrózió keletkezésének modellje

Kristályszerkezeti korrózió megjelenési formái repedésszerű jelleget mutatnak.

- **transzkrisztallin korrózióról** akkor beszélhetünk, ha a korróziós repedések az egyes szemcséken keresztül haladnak,
- **interkrisztallin** – azaz kristályhatármenti – **korrozió** esetén pedig a szemcsehatárok mentén hálószerűen kialakuló korróziós károsodást észlelhetünk.



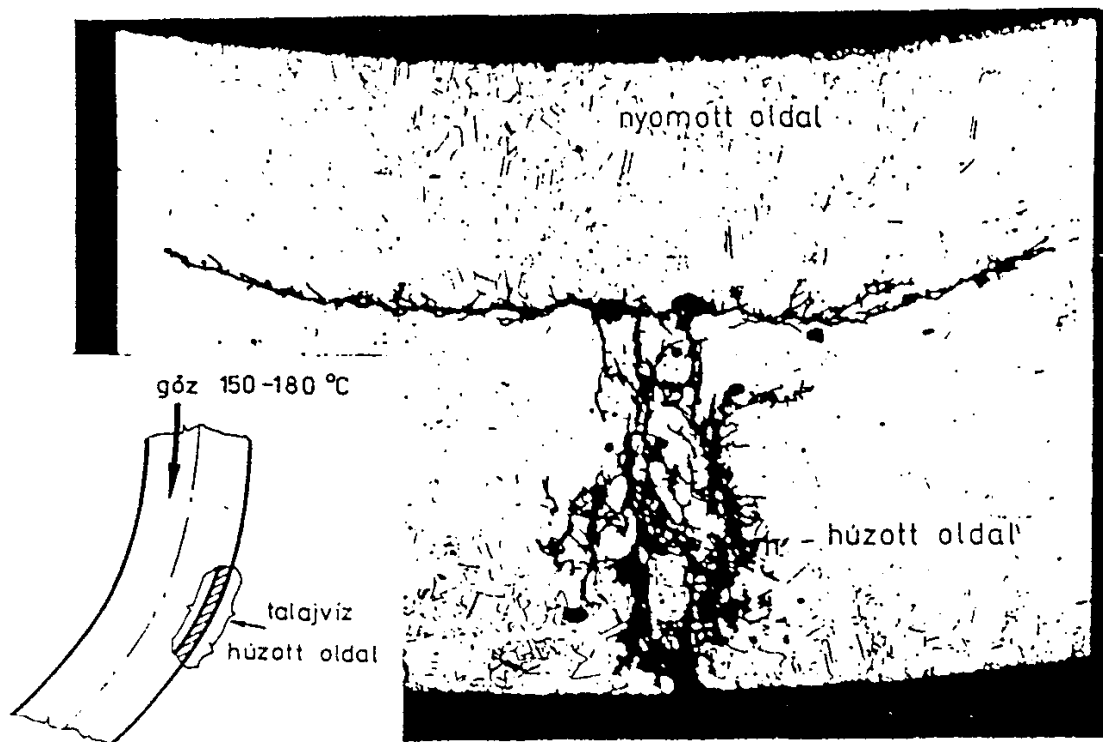
A kristályszerkezeti korrózió megjelenési formái:
transzkrisztallin (A), interkrisztallin (B)

Néhány anyagfajta különösen hajlamos az interkrisztallin korrózióra (pl. a 18/8-as saválló acél), s bizonyos technológiai eljárásoknak (például hegesztés) is tipikus velejárója az ilyen jellegű károsodás.

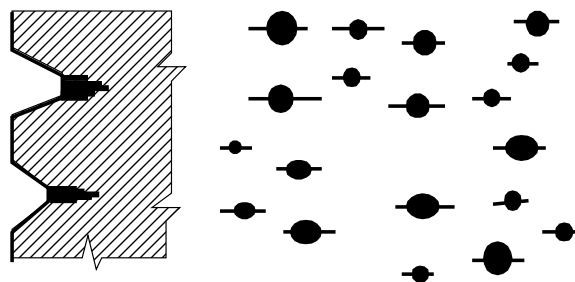
A kristályszerkezeti korrózió egy másik speciális fajtájának tekinthető az ún. **szelektív korrózió** is. Ez esetben nem a kristályhatár anyagának, hanem a heterogén szövetű ötvözet egyik fázisának vagy komponensének gyorsabb oldódása okozza az anyag tönkremenetelét. Jellemző példa a szelektív korrózióra a sárgaréz ötvözetek elcinktelenedése.

Az interkrisztallin korrózió egyik speciális megjelenési formája a **réteges, vagy lemezes korrózió**. Oka a megmunkálások következtében rétegesen elhelyezkedő kiválások által kialakuló inhomogenitás. Elsősorban *Al-Mg* és *Al-Mg-Zn* ötvözeteknél fordul elő.

Külön kiemelést érdemel az interkrisztallin korrózió egy speciális fajtája az **interkrisztallin feszültség-korrózió**. A nemzetközi szakirodalomban gyakran csak az *SCC - Stress Corrosion Cracking*.



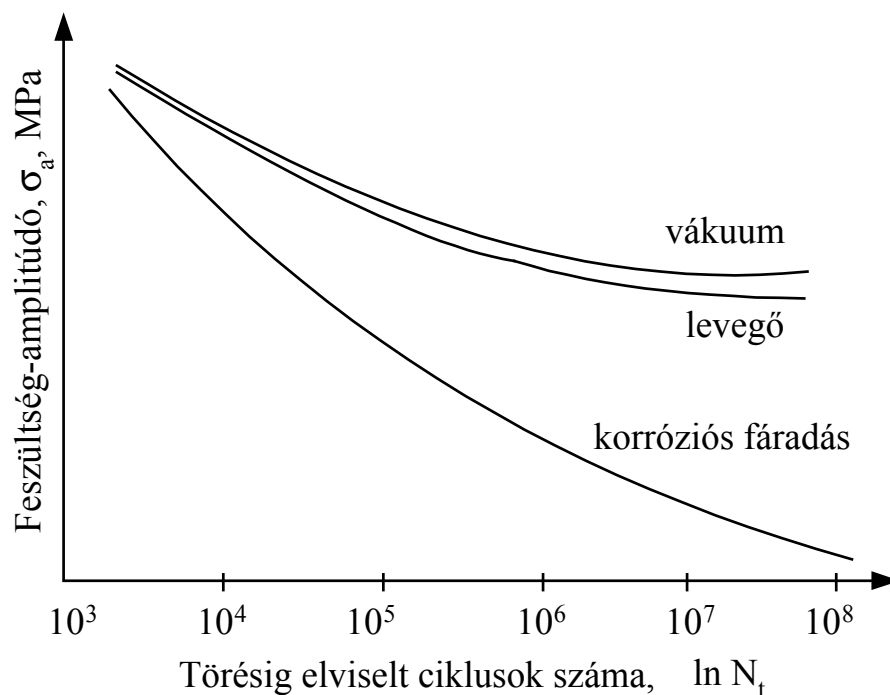
Interkrisztallin feszültségkorrózió egy gyakorlati példája



Fáradási korrózió megjelenési formája

A **korrózió és a fárasztás** együttes hatása nem additív módon jelentkezik, hanem egymást kölcsönösen fokozva, lényegesen alacsonyabb terhelhetőséget, rövidebb élettartamot eredményeznek, mintha a két hatást külön-külön vizsgálva összegeznénk.

Korróziós körülmények között tehát tulajdonképpen kifáradási határ helyett **tartamszilárdságról** beszélhetünk, azaz egy adott ismétlődési számhoz rendeljük hozzá azt a feszültség tartományt, amelyen belül a korrózió és a fáradás együttes hatása még nem vezet töréshez.



Különböző közegekben végzett fárasztóvizsgálatok Wöhler görbéi

A korrózióvédelem alapelvei

- a környezeti feltételek szabályozásával (például a szerkezeti elemet, gépalkatrészt körülvevő **közeg összetételének változtatása, inhibitorok alkalmazása, a hőmérséklet változtatása**),
- **megfelelő anyagmegválasztással** (a tiszta fémek, a homogén szilárd oldatos ötvözetek általában ellenállóbbak) és a gyártási folyamatok gondos tervezésével és végrehajtásával (szemcsehatármenti dúsulások, kiválások lehetőségét kizáró ötvöztetés, gyártás, vagy azokat megszüntető hőkezelés),
- a védendő anyagnak az elektrokémiai rendszerben betöltött szerepének szabályozásával (például **aktív védelem, katódos védelem** alkalmazásával),
- természetes védőbevonat keletkezésének (passzíválódás) elősegítésével, vagy mesterséges **védőbevonatok** alkalmazásával.

Korróziós vizsgálatok

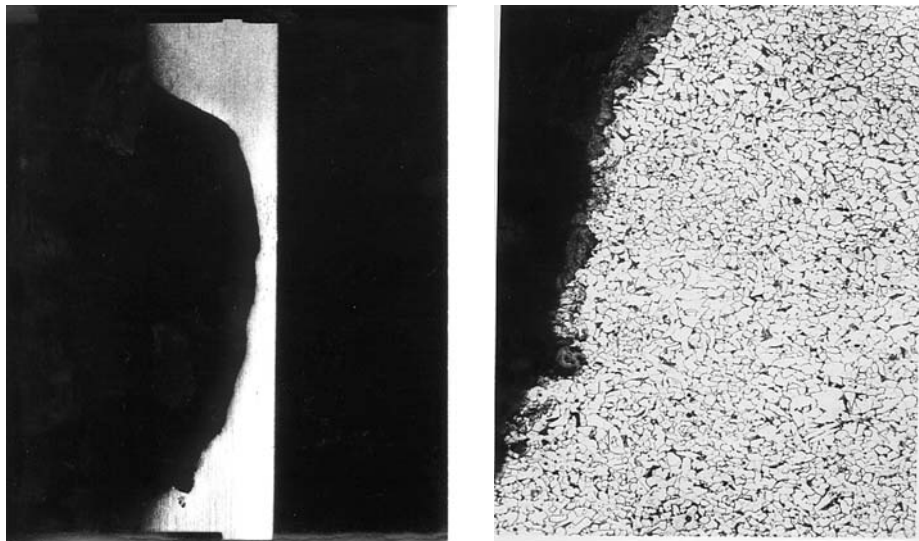
A módszerek csoportosítása:

- ***Valós körülmények között***, valós szerkezeten létrejött korróziós károsodás mértékének megítélése, ha
 - * üzemelő berendezés állapotát kívánjuk ellenőrizni (*in-service monitoring*), a károsodás mértékének meghatározása révén következtetni kívánunk annak veszélyességére.
 - * már bekövetkezett tönkremenetel esetén a korrózió szerepét kívánjuk feltárni, meghatározni jelentőségét a szerkezet tönkremenetelét előidéző folyamatokban és a tapasztalatokat hasznosítani a további káresetek megelőzése érdekében.
- ***Valós körülmények között, nem valós szerkezeten***, hanem mintadarabokon bekövetkező korróziós károsodás tanulmányozása segítséget adhat a megfelelő anyagválasztás, minőségellenőrzés feladataiban.
- ***Laboratóriumi körülmények között, modell-kísérletek során***, felgyorsított korróziós folyamatok eredményeire alapozva ugyancsak az adott alkalmazási célnak leginkább megfelelő anyag kiválasztása és minőségellenőrzése válik lehetővé.
- ***Laboratóriumi mérésekkel nem közvetlenül a korróziós károsodás mértékét vizsgáljuk***, hanem olyan, műszeres mérésekkel jól követhető, számszerűsíthető jellemzőket határozunk meg, amelyeknek a korróziós folyamatokkal való kapcsolatrendszer ismert.

A korrózió megjelenési formájától függ azonban, hogy milyen geometriai méreteket határozhatunk meg, illetve hozhatunk kapcsolatba a korróziós károsodás mértékével, annak helyes megítélésére:

- ***Egyenletes korrózió*** esetén a vastagság csökkenés fejezi ki leginkább a korrózió előrehaladásának mértékét.

-
- **Helyi korrózió** – lyuk-korrózió, gödrös kimaródással járó korróziós megjelenési formák esetén szokásos például a meghatározott falvastagságú lemez átfúródásához szükséges idővel jellemezni a korrózió sebességét.
 - **Kristályközi (transzkrisztallin / interkrisztallin) korrózió** esetén a keresztmetszet mikroszkópi vizsgálatát alkalmazzák. A korrodált anyag további terhelhetőségére, az értékvesztés mértékére, a károsodás súlyosságára vonatkozóan viszont mechanikai vizsgálatok (pl. szakítóvizsgálat) segítségével következtethetünk a legmegbízhatóbban.



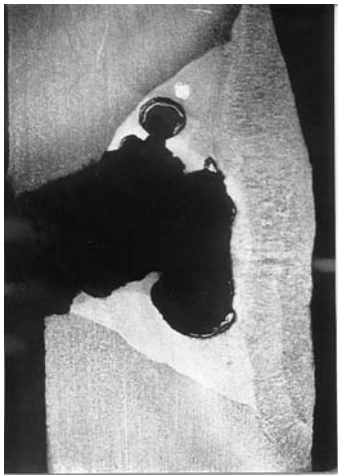
Helyi korrózió makro- és mikro-felvétele

A korszerű on-line – üzemközbeni – felülvizsgálati rendszer ún. **intelligens csőgörények** segítségével többek között a korróziós károsodások helyéről, jellegéről, eloszlásáról, mértékéről képes megbízható adatokat szolgáltatni.

Bekövetkezett káresetek vizsgálata során minden esetben körültekintő szemrevételezéssel, a próbatestek kivételi helyének és módjának kiválasztásával és annak dokumentálásával kezdődik a vizsgálat. A korrózió megjelenési formájának azonosításában elsősorban mikroszkópi vizsgálatokra támaszkodhatunk, emellett

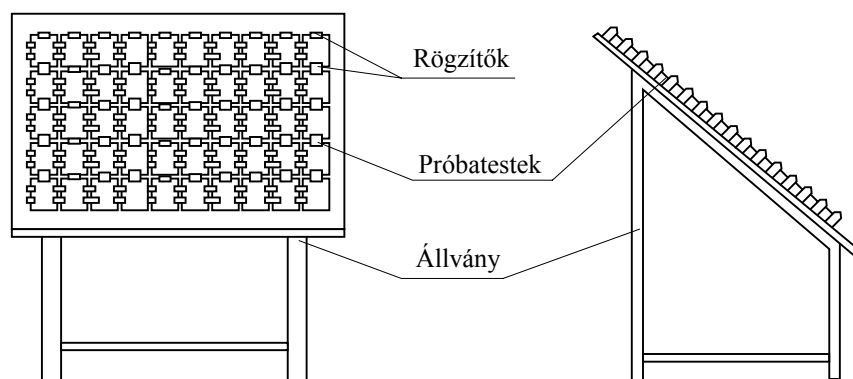
azonban körültekintően elemezni kell a működési körülményeket, azok esetleges változásait is. Sok esetben a korróziós termék fázis-analízise segítheti a korróziós folyamat mechanizmusának feltárását.

Kiemelt figyelmet kell fordítanunk a ***hegesztett szerkezetek korróziós vizsgálatánál*** arra, hogy a hegyvarrat és a hőhatásövezet anyaga és feszültségállapota természetesen különbözik az alapanyagétól, így helyi elemek képződése nagyobb valószínűséggel okoz jelentős korróziós károsodást

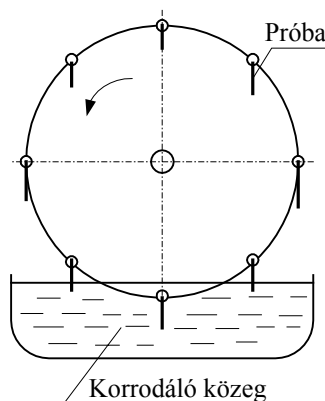


Hegesztett kötések korróziós károsodása (Nagyítás: $N = 5\times$)

A légköri korróziós hatások vizsgálatára szolgáló ún. *kitéti vizsgálatot* szemléltet az ábra.



Légköri viszonyok korróziós hatásának vizsgálata - *Kitéti vizsgálatok*



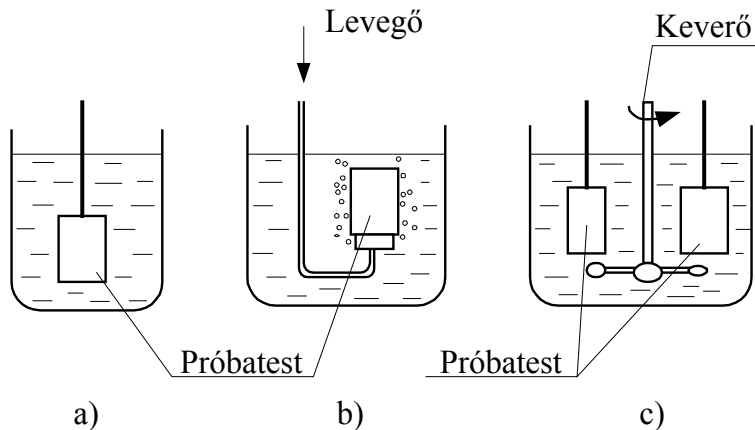
Vizsgálati elrendezés időszakosan oldatba merülő fémtárgy korróziójának modellezésére

A vizsgálat gyorsítása

- a **környezeti hatások gyorsított ütemű szimulációjával** – erre mutat példát a *mártogatásos próba*, amellyel az időjárást, a csapadékos és száraz időszakok váltakozását szimuláljuk. Az egyszerű szerkezet segítségével rövid időszakokra – pl. néhány percre – a korrozív folyadékba merítjük, majd száradásig szabad levegőn tartjuk a próbatesteket.
- a **hőmérséklet emelésével**: ez általában a kémiai és elektrokémiai folyamatok sebességének fokozását okozza, többek között azáltal is, hogy a korrozív közeg viszkozitását

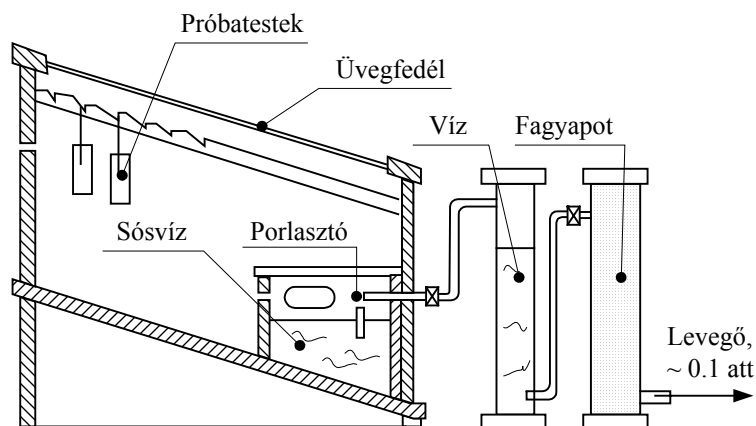
csökkenti és az elektromos vezetőképességét növeli, illetve az oxigénnek a fémfelülethez való diffúzióját befolyásolja.

- **agresszívebb korróziós közeg alkalmazásával**, illetve a közeg folyamatos áramoltatásával, oxigénnel való telítettségének biztosításával.



Vizsgálati elrendezési lehetőségek állandóan oldatba merülő tárgyak korróziójának vizsgálatára
 nyugvó oldat, *b)* levegőzött oldat,
a) mozgásban tartott oldat hatásának modellezése

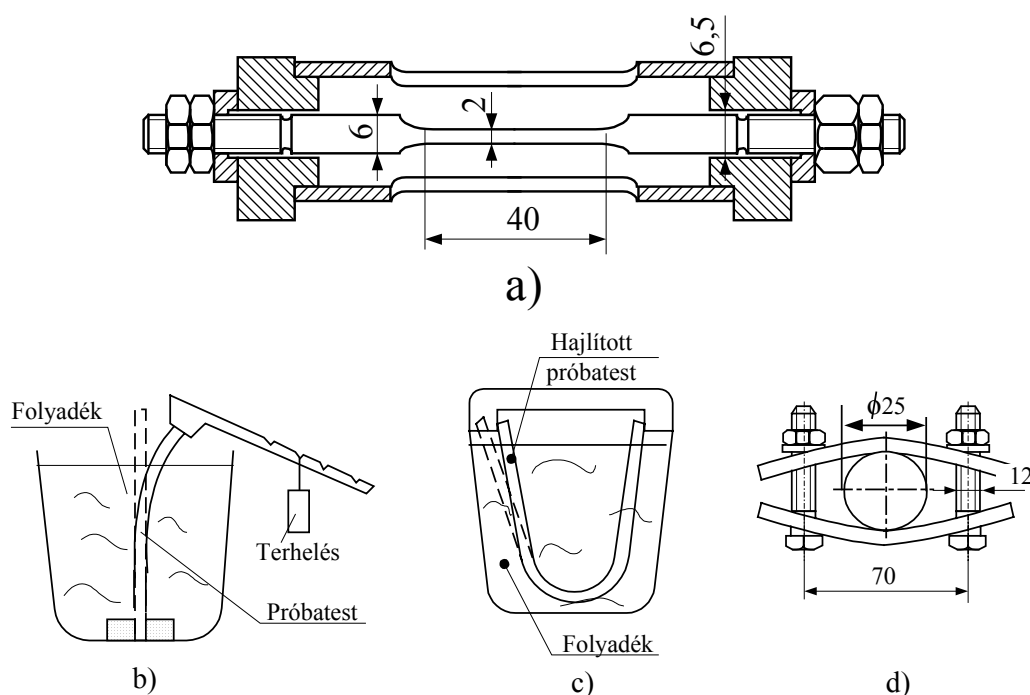
- **az előbbieket kombinált hatásával:** A ködkamra vagy más néven sópermet kamra üvegfalai parafinnal itatott fakeretbe illeszkednek. A korrodáló folyadékot – rendszerint konyhasó-oldatot – finom cseppekben juttatják a kamra légterébe.



Ködkamra vagy sópermet kamra korróziós kísérletekhez

A gyorsított laboratóriumi vizsgálatok között a műanyagok egyik leggyakoribb korróziós vizsgálata a **bemártásos vizsgálat**. Ennek során vizsgálják a *nedvesség felvételt*, illetve az ennek nyomán bekövetkező *súlybeli, méretbeli változásokat* különféle szabványos összetételű közegben.

Az **egyes anyagok feszültségkorrózióra való hajlamát** szintén gyorsított laboratóriumi vizsgálattal állapíthatjuk meg: feszültség alatt lévő – előfeszített, vagy előzetesen maradó alakváltozásig hajlított – próbatesteket teszünk ki különböző korróziós hatásoknak. A korróziós folyamat felgyorsítása érdekében általában növelt koncentrációjú oldatba való merítést, mártogatásos módszert vagy ködkamrába való helyezést és magas hőmérsékletet alkalmazunk. A vizsgálati próbatestek alakjára és a feszültség alatti állapot biztosítására láthatunk néhány szokásosan alkalmazott példát az ábrákon.



Feszültségkorróziós vizsgálatok

a - szabályozott húzófeszültség alatti vizsgálat feszítőkészüléke

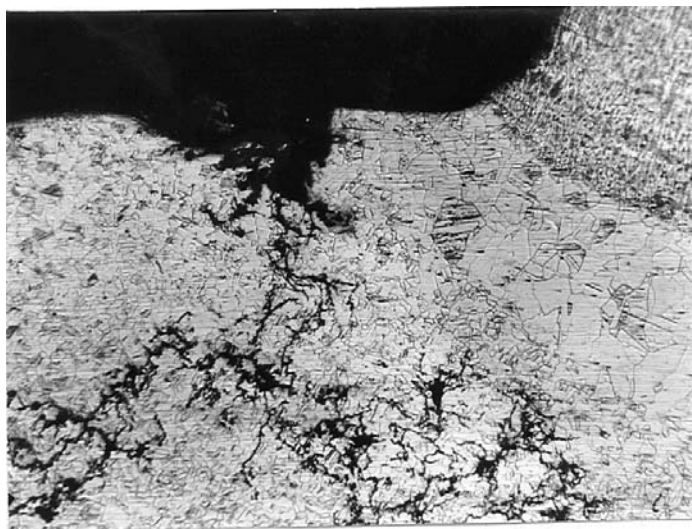
b, c, d – hajlítófeszültséggel való terhelés módjai korróziós vizsgálatához

A ***korróziós kifáradás*** vizsgálata során egyidejűleg kell megvalósítani az ismétlődő jellegű mechanikai igénybevétel és a korróziós körülmények modellezését, lehetőség szerint gyorsított folyamatok adataiból vonva le következtetéseket az anyag fáradási korrózióval szembeni ellenállóképességére. Ennek során egy speciális problémával találkozunk: míg korróziós hatásoktól mentes körülmények között mért kifáradási határ tág frekvencia-tartományban (500-5000 igénybevétel percenként) gyakorlatilag azonos értékűnek adódik, addig a korróziós fárasztás során az eredményekre jelentős befolyással van a vizsgálatnál alkalmazott frekvencia. A korróziós fárasztóvizsgálat tehát csak akkor ad reális képet a valóságban várható korróziós kifáradás jelenségéről, ha a percenkénti igénybevételek száma a valóságos viszonyokkal megegyező. A vizsgálat gyorsítása érdekében növelt frekvencia alkalmazása esetén még akkor is a valóságosnál nagyobb kifáradási határ értéket mérnénk, ha a többi tényezőt – feszültség, igénybevételi szám és a korrozív közeg jellemzői – azonos értéken tartanánk.

Interkrisztallin típusú korrózióval nemcsak a már említett, mechanikai feszültség és korrózió együttese okozta feszültségkorrózió esetén találkozunk: a kristályhatárok szelektív korrózióját gyakran okozzák a szemcsehatárokon előforduló dúsulások és kiválások is. Mindenekelőtt a homogén szövettű, így alapján kedvező korrózióállóságú anyagok előállítása során, gyártási, hőkezelési problémák miatt fordul elő ez a jelenség, melyet az egyik legelterjedtebben alkalmazott rozsdamentes acél, az ún. 18/8-as *Cr-Ni* ötvözet példájával kívánunk bemutatni. Korrózióállóságát alapvetően két tényezőnek köszönheti: a nagy *Cr* tartalom passzíváló hatásának, illetve a nagy *Ni* tartalom miatt kialakuló, homogén ausztenites szövetének. Amennyiben azonban ebben az acélban 0,02%-nál több karbon van szabad állapotban (azaz erős karbidképzővel, pl. *Ti*-nal, *Nb*-mal nem stabilizált, nem lekötött állapotban), 600-700 °C-os hőmérsékletközben a tútelítetté váló ausztenitből a karbon $Cr_{23}C_6$ típusú karbid

formájában a szemcsehatárokon kiválik. Ezáltal a szemcsehatár közvetlen közelében a rozsdállóság biztosításához szükséges 13% alá esik a krómtartalom, így az már önmagában is korrózióra hajlamosabbá válik.

Ehhez járul még hozzá, hogy a Cr-ban elszegényedett anyagrészek potenciálja mind a szemcse belsejéhez viszonyítva, mind a kivált karbidokhoz viszonyítva eltérő, azoknál kevésbé nemes lesz - a három elektród alkotta helyi elem jelenléte miatt a korrózió a szemcsehatárok mentén így méginkább felgyorsul.



Interkrisztallin korrózió (Nagyítás: $N=200\times$)

A 18/8 ausztenites CrNi acél interkrisztallin korrózióra való hajlama gyorsított laboratóriumi vizsgálattal a következőképpen ellenőrizhető. A vizsgálat kezdetén a lemez anyagában először mesterségesen előidézzük a szemcsehatármenti korróziót okozó karbidok kiválását: e célból a próbatesteket 700-800 °C –on 15-20 percig hőntartják, majd lassan hűtik. Ezután 12-72 órán át főzik a következő korrozív közegben: 1 liter vízben oldott 100 cm³ kénsav és 110 g réz-szulfát vizes oldatában. A vizsgálati eredmény kiértékelése történhet

- ***hangpróbával*** – a károsodás mértékével egyre csökken a kő, vagy acéllapra ejtett próbatestek fémes csengése,
- ***szakítóvizsgálattal*** - a károsodás következtében fellépő szilárdság-csökkenés számszerűsíthető,

- ***mikroszkópi vizsgálattal*** - pontos képet kaphatunk a korrózió megjelenési formájáról, kiterjedésének mértékéről és súlyosságáról.

1. RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATOK

A roncsolásos mechanikai anyagvizsgálatokkal szemben ezen eljárások jellemzően nem valamilyen méretezési alapadatot jelentő szilárdsági, alakváltozási mechanikai anyagjellemző meghatározására, vagy előírt mechanikai anyagjellemzők ellenőrzésére szolgálnak, hanem – amint arra az összefoglaló elnevezésük is utal – többnyire az alkatrészekben, szerkezetekben, berendezésekben előforduló, kimutatható hibák feltárására, kimutatására irányulnak.

A széles körben alkalmazott klasszikus roncsolásmentes vizsgálati eljárások – mint az *ultrahangos*, a *radiológiai* (röntgen és izotópos) vizsgálatok, vagy a *mágneses elven alapuló* különféle eljárások – mellett az elmúlt évtizedekben számos új eljárást dolgoztak ki és vezettek be az ipari gyakorlatban.

Az újabb eljárások kidolgozása mellett a *"klasszikus"* roncsolásmentes anyagvizsgálatok is jelentős fejlődésen mentek keresztül és a vizsgálatok célkitűzésében is számottevő hangsúly eltolódás figyelhető meg. E vizsgálatoknál – a korábbi *"hibafeltáró"* jelleg megtartása mellett – egyre nagyobb jelentősége van a korszerű minőségbiztosítási, diagnosztikai szemléletnek, amely napjainkban a *célra való alkalmasság (fitness for purpose)*, illetve a *szerkezet-integritás komplex fogalom rendszerében ölt testet*.

A roncsolásmentes hibafeltáró vizsgálatok különösen nagy jelentőséggel bírnak a hegesztett varratok és a hegesztett szerkezetek vizsgálatában, ezért e kérdéskörrel az egyes eljárásoknál kiemelten foglalkozunk.

1.1. ULTRAHANGOS VIZSGÁLAT

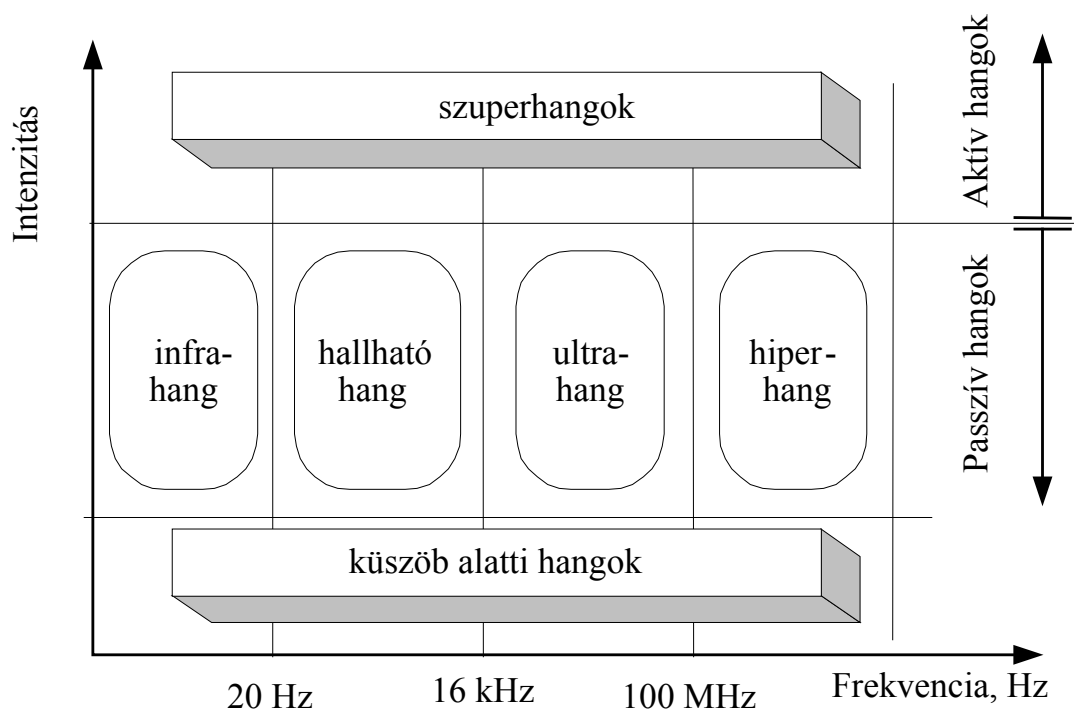
Több száz éve alkalmazott vizsgálati módszer kézzel, kézi szerszámokkal formált agyagedények, kerámia tárgyak kopogtatással történő ellenőrzése. A hallható hang más a repedt edénynél, mint a hibamentes állapotban. A hangpróbát ma is sikeresen alkalmazhatjuk ilyen célra. A módszert az öntvények, kovácsolt, hengerelt termékek repedésmentességének ellenőrzésére napjainkban is használjuk. A hallható hang frekvencia tartományában a hanghullámok elnyelődése jelentős, ezért e módszer csak kis méretű tárgyak ellenőrzésére alkalmas.

Az ultrahang, mint mechanikai rezgés, a hallható hangtól alapvetően a frekvenciában tér el. Az ultrahang első alkalmazásai az első világháború idejére tehetők, főleg a tengeralattjárók felkutatására alkalmazták. A piezoelektromos elv felhasználásával az első nagyenergiájú ultrahangos adó - vevő berendezést Langevin (1917) francia kutató fejlesztette ki. Az ultrahangos berendezéseket kezdetben jéghegyek, egyéb tengeri akadályok és tengeralattjárók felkutatásához használták. E berendezések kisugárzott és visszaverődés után felfogott ultrahanggal működtek. Az ultrahang ipari alkalmazása a második világháború után vált csak lehetővé. Az anyaghibák kimutatását szolgáló első anyagvizsgáló készülék a "szonogramm" volt. Hang- fénytani eljárásával a belső hibát láthatóvá tette. E vizsgáló berendezés már egy olyan vizsgálati elvet alkalmazott, amelyet továbbfejlesztve az orvosi gyakorlatban például a terhesség vizsgálatában, ma is eredményesen alkalmaznak. A módszer az ipari gyakorlatban máig sem terjedt el.

1.1.1. Az ultrahang gerjesztése

Az ultrahang nagyfrekvenciájú mechanikai rezgés, amely az infra-, a hallható- és a hiperhangoktól alapvetően csak a frekvenciában különbözik, a szuper-, az aktív-, a passzív és a küszöb alatti hangoktól pedig csak az intenzitásukban. A mechanikai rezgések csoportosítását a 1.1. ábra mutatja.

Frekvenciától függetlenül a nagy intenzitású hangokat szuperhangoknak nevezzük. Erre az intenzitási tartományra használjuk az aktív hang fogalmát is. Ezek a mechanikai rezgések aktívak abban a vonatkozásban, hogy a vizsgálat tárgyára úgy hatnak, hogy azokban anyagszerkezeti változásokat is előidézhettek. Nagy intenzitású ultrahanggal például műanyag fóliákat össze lehet hegeszteni. Az aktív ultrahangok a vizsgáló személyre is hatást gyakorolnak. A nagy intenzitású hangok akár a hallható frekvencia tartományon belül is káros elváltozást idézhetnek elő, az emberi szervezetben. Az anyagvizsgálati célra alkalmazott ultrahang passzív hang. Alkalmazása semmilyen veszélyt sem jelent a vizsgáló személyre. Az anyagvizsgálati ultrahangos berendezések az $f = 0,25 - 14$ MHz frekvenciatartományban üzemelnek.

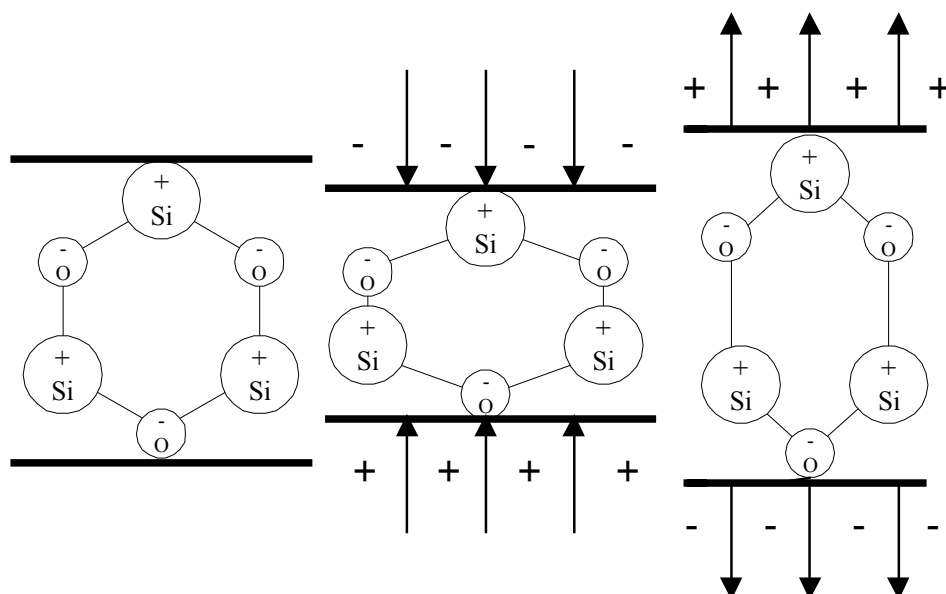


1.1. ábra

A mechanikai rezgések csoportosítása a frekvenciájuk és az intenzitásuk alapján

Az ultrahang, mint mechanikai rezgés előállítására egyaránt számításba vehetők a mechanikus, termikus, mágneses, magnetosztatikus és a piezoelektromos elvek. Mechanikus elven működő léghang-generátorokkal és a termikus kisülésekkel, az ultrahang előállítása nehézkes, pl. hordozható készülékeknél egyáltalán nem alkalmazhatók. Ha ferromágneses anyagból készült rudat azzal párhuzamosan haladó mágneses mezőbe helyezzük, akkor a rúd hossza megváltozik, ezt a jelenséget magnetosztatikciónak nevezzük. Ilyen elv alapján, ha a mágneses teret $f = 16 \text{ KHz} - 100 \text{ MHz}$ frekvenciával változtatjuk, a rúdban ugyanolyan frekvenciájú rezgést tudunk előidézni.

Az anyagvizsgálati célú ultrahangos berendezéseknél az ultrahang előállítására túlnyomóan a piezoelektromos elvet alkalmazzák. A piezoelektromos jelenséget először 1880-ban a Curie testvérek fedezték fel. Megfigyelték, hogy bizonyos kristályok kitüntetett irányokban (a poláris tengelyeik mentén) például a kvarc egykristály poláris tengelyére merőleges metszetében villamos feszültség keletkezik, ha azt nyomásnak, vagy húzásnak vetjük alá. Ez a jelenség megfordítva is fennáll, nevezetesen ha a kristály megfelelő irányában villamos feszültséget kapcsolunk ennek hatására méretüket, a polaritásuktól függően megváltoztatják, összenyomódnak, vagy kitágulnak. Amennyiben a felületükre a feszültséget, villamos rezgés formájában visszük, a lapok a villamos rezgés frekvenciájával egyező frekvenciájú mechanikai rezgést eredményeznek. Az ultrahangos adó tehát, a fordított piezoelektromos elvet hasznosítja. az ultrahang vételénél az egyenes piezoelektromos elvet hasznosíthatjuk. Az elv jobb megértéséhez, tekintsük a 1.2. ábrát.



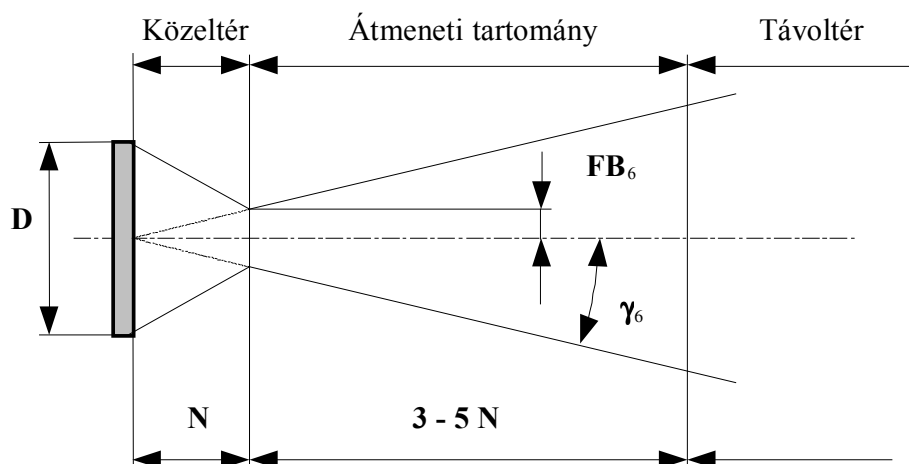
1.2. ábra

A piezoelektromos elv magyarázata SiO_2 ionfelépítésének változásával

Összenyomáskor a negatív töltésű O ionok a felső felületen többségbe kerülnek, negatív potenciált okozva, húzáskor a pozitív töltésű Si ionok hatása érvényesül.

1.1.2. Az ultrahang terjedése

Az adókristályok által kibocsátott ultrahang irányított sugárzás a térben terjed. Az ultrahangos vizsgálatokban, a hangtérnek csak azt a részét hasznosítjuk, ahol még jelentős a hangnyomás. Ez a fősugárzás közvetlen környezetében van. Ezt a térfogatot hangnyalábnak nevezzük. A hangnyaláb határának kijelölése, megállapodás szerinti. Általánosan elfogadott, az 50 %-os hanghatár, amelynél a hangnyomás értéke fele a középső fősugárban mért értéknek. A hangnyaláb körtárcsa rezgő (ultrahangos adó) esetén az 1.3. ábra szerinti alakot mutatja.



1.3. ábra

A hangnyaláb jelölései

A köztér hosszúságát, fókusztávolságnak is nevezzük. Hossza az

$$N = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot c} \quad (1.1)$$

összefüggéssel számolható, ahol

D a rezgő (ultrahangos sugárzó) átmérője,
 f az alkalmazott frekvencia és
 c az ultrahang-hullám terjedésének sebessége az adott közegben.

A fókusz FB_6 jelű szélessége a köztér végén mért fél hengernyaláb átmérőjét jelenti. Ez a sugárzó átmérőjéből az alábbi összefüggéssel számolható:

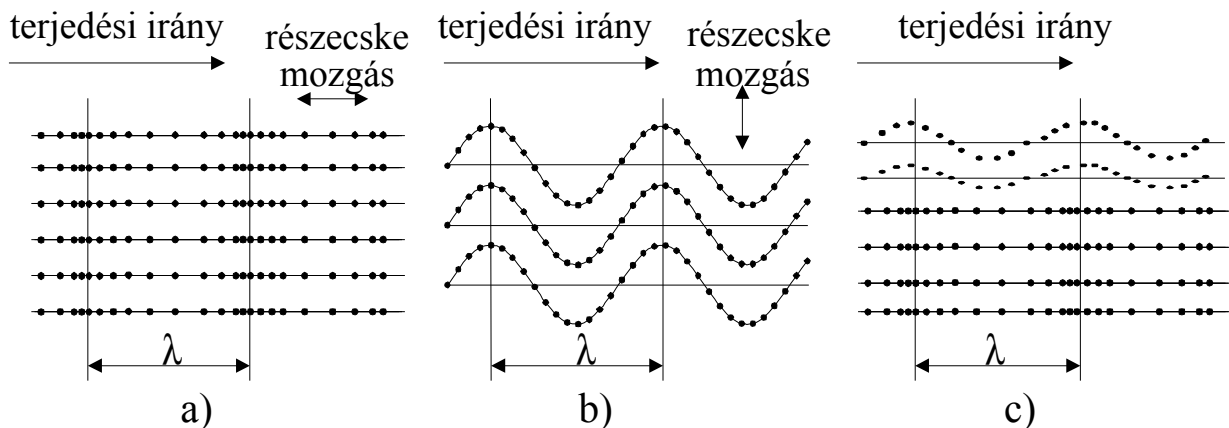
$$FB_6 \approx \frac{D}{8}. \quad (1.2)$$

A széttartást jellemző félkúpszög a

$$\gamma_6 = \arcsin\left(K \frac{c}{Df}\right) \quad (1.3)$$

összefüggéssel számolható, ahol K a hangnyaláb széttartását figyelembevevő tényező. Az 50 %-os hanghatárnál ennek értéke megközelítően $K = 0,5$.

A hangtérben a mechanikai hullámok, az anyag részecskéinek rezgéseiből jönnek létre. Az anyagrészecskék rezgése, itt különféleképpen terjedhet. Ezek közül a vizsgálatok szempontjából, a longitudinális, vagy nyomáshullám, a tranzverzális vagy nyíráshullám és a felületi, vagy *Rayleigh* hullám érdekesek. E hullámtípusokat a 1.4. ábra szemlélteti.



1.4. ábra

Különböző típusú ultrahang terjedések

a) longitudinális, b) tranzverzális, c) Rayleigh hullám

Longitudinális hullámnál a részecskék mozgása a terjedés irányába esik, tranzverzális hullámzásnál a részecskemozgás a terjedési irányra merőleges. Felületi hullámoknál a tranzverzális hullámzásra jellemző részecskemozgás csak a felületen jelentkezik. A felület alatti részeken a hullámzás egyre gyengülő.

A longitudinális hullám levegőben és vízközegben egyaránt terjed, a tranzverzális és a felületi hullám csak szilárd közegben. Acél anyagban a longitudinális hullám terjedési sebessége: $c_L = 5900$ m/s, a tranzverzálisé $c_T = 3200$ m/s. Levegőben a longitudinális hullám c_L

= 330 m/s sebességgel terjed (az L indexet a longitudinális hullám jeleként használjuk, T a tranzverzális hullámra utal).

Az adott anyagminőségnél a terjedési sebesség az alábbi összefüggésekkel határozható meg:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad ; \quad c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad , \quad (1.4)$$

ahol E az anyag rugalmassági modulusza [MPa],

ρ a sűrűség [kg/m³] és

μ az anyag Poisson tényezője.

A λ hullámhosszúság, az ultrahang c terjedési sebessége, az f frekvenciája és a hullám T periódusideje között az alábbi összefüggésekkel lehet átszámolni:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad ; \quad f = \frac{1}{T} \quad . \quad (1.5)$$

1.1.3. Ultrahangvizsgálati elvek

Az anyagvizsgálati célú ultrahang alkalmazás alapvetően 4 féle elvre, a rezonancia, a hangfénytani, az ultrahang visszhang, és a hangátbocsátás elveire épül.

1.1.3.1. Vizsgálat a rezonancia elv alapján

A rezonancia elvére épülő vizsgálatot vékony lemezek vastagságának meghatározására alkalmazzák. A d vastagságú lemezt ultrahanggal rezonanciaállapotba hozzák. A rezonancia frekvencia

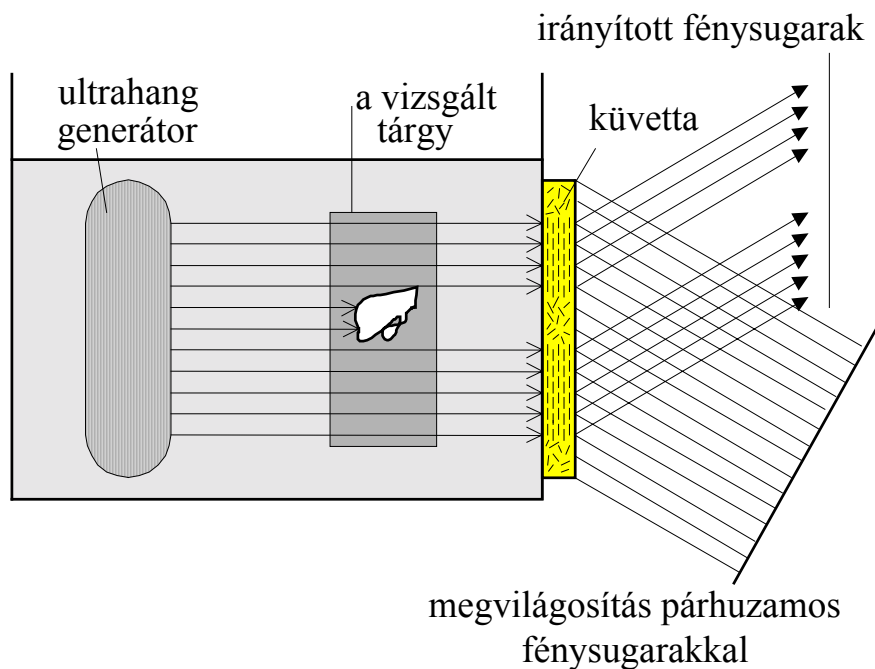
$$f_{rez} = \frac{c}{2d} \quad , \quad (1.6)$$

amelyből a vastagság meghatározható.

1.1.3.2. A hang-fényntani eljárás elve

A kezdeti ultrahangvizsgálati fejlesztések azt a célt tűzték ki, hogy alkalmazásával a belső hibákat a röntgenvizsgálatokhoz hasonlóan, láthatóvá tegyék. Ilyen vizsgálati elvet, és elrendezést, mutat a 1.5. ábra.

A vizsgált tárgyon belüli hibánál az ultrahang visszaverődik. A hibátlan helyeken továbbjutó ultrahang hullámok érzékeléséhez alkalmazzunk egy üvegfalú küvettát, amelyben folyadékban alumínium-reszeléket lebegtetünk. Ebben a küvettában a tovaterjedő ultrahang hullámok nyomására a reszelék beáll a hullámokra merőlegesen. Ha a küvettára fényt vetítünk, annak visszaverődésénél ez a beállítás érzékelhetővé válik, ezáltal a belső hiba alakja is látható lesz. A legújabb kutatások eredményeként, képerősítők alkalmazásával ezt a célt - nevezetesen, hogy a hibát láthatóvá tegyék - lényegesen jobb hibakimutatással valósítják meg napjainkban. Az ipari gyakorlatban, azonban általában a hangvisszaverődési és a hangátbocsátási elveket alkalmazzák.

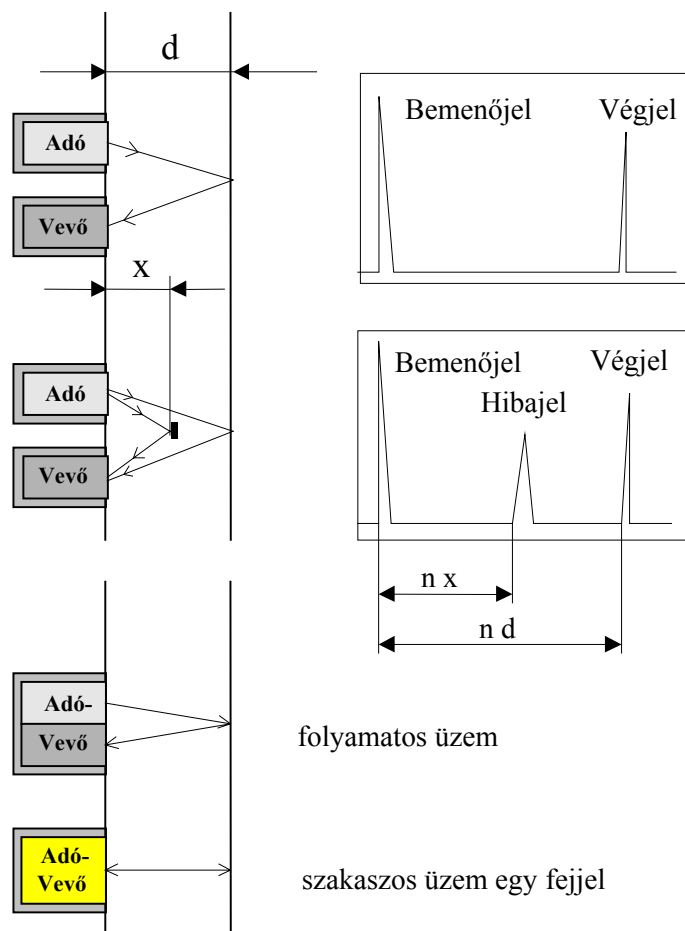
**1.5. ábra**

A hang-fénytani eljárás elve

1.1.3.3. Hangvisszaverődési elven alapuló eljárás

A 1.6. ábra szerinti elrendezésben az adóból a rezgésnyalábot a csatoló közegen keresztül a vizsgálati tárgyba vezetjük. A tárgy túlsó felületéről visszavert ultrahangot a vevővel érzékeljük. A visszaverődött mechanikai rezgés a vevőben ismét villamos rezgést alakít ki. A vizsgálatot oszcilloszkóp katód-sugárcsővén követjük. Azt az időpontot, amelyben a sugárzást elindítjuk, a katódcső elektron sugarának függőleges eltérítésével jelöljük, ez a képernyő bemenőjele. A visszavert sugárnyaláb vevőhöz érkezésénél az oda-vissza távolság után újabb függőleges eltérítést végzünk. Az oszcilloszkópon a vízszintes tengelyre így lényegében két függőleges jelet írunk. Ez a két jel, az úgynevezett bemenő-, és a végjel. A két jel közötti távolság változtatható, az anyag vastagságával kapcsolatba hozható. Ez az arányosítás az adott méretre hitelesítést jelenti.

A fejek alatti csatoló közegnek a legfontosabb szerepe az, hogy bevezesse az ultrahangot a tárgyba. Hiánya esetén az ultrahang már bevezetés előtt szétszóródna. Csatolóközegként durva felületek esetén gépszirt alkalmazunk, finomabb felületnél olajat, köszörült, sima felületeknél a víz alkalmazása legmegfelelőbb. Amennyiben az anyagban folytonossági hiba található, onnan az ultrahang egy része, visszaverődik. Ez hamarabb kerül a vevőhöz, mint a hátfalról jövő jel. A vevő ezt érzékeli és az oszcilloszkópra ennek megfelelően ad egy függőleges eltérítést. A képernyőn megjelenik a hibajel, amelynek a bemenőjeltől távolsága arányos a hiba mélységével.

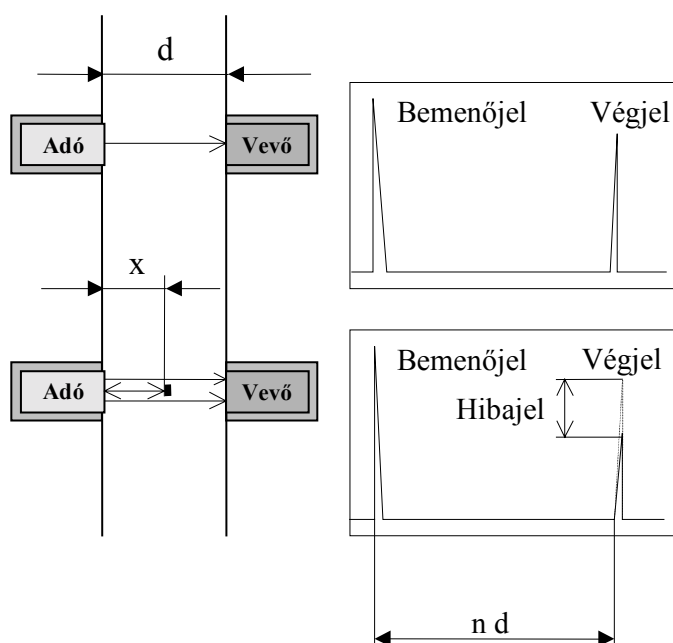
**1.6. ábra**

A visszaverődés elvére épülő vizsgálat

Az oszcilloszkóp függőleges eltérítése (a hiba és a végjelnél) arányos a visszaérkező hanghullámok nyomásával, közvetve tehát a visszaverő felületek nagyságával. A hibajel alakjából, nagyságából, következtetni lehet a belső hiba típusára, és nagyságára. Ezekre vonatkozóan a későbbiekben további részletezést is adunk. Az adó és a vevőfej, ugyanazon elven sugároz, illetve érzékeli a visszaverődést. Dolgozhatunk külön adóval, és vevővel, de ezek egy közös egységbe is foglalhatók, ha köztük megvalósítjuk a hangszigetelést. Korszerű készülékeknél, a vizsgálat megvalósítható egy fejjel is. Ilyen esetben a készülékben elhelyezett kipp-generátor valósítja meg azt, hogy a fej, adás után átálljon vételre. Ilyenkor szakaszos üzemben dolgozik a vizsgálóberendezés.

1.1.3.4. A hangátbocsátás elvére épülő vizsgálat

E vizsgálati elv lényegében a hangintenzitás gyengülésén, csökkenésén alapul. Ha az ultrahang sugárzás útjába, anyaghiba kerül (lásd 1.7. ábra), akkor a hibánál az ultrahang-sugárzás egy része nem jut tovább.



1.7. ábra
Hangátbocsátás elvén alapuló vizsgálat

E vizsgálatnál az adóval ellentétes oldalon elhelyezett vevő, a vizsgált tárgyon való áthaladás közben a hibahelynél csökkenő mértékű energiával arányos villamos jelet ad az oszcilloszkópra. A végjel magassága csökkenni fog. A hibára ebből a csökkenésből kell következtetnünk. A módszer lehetővé teszi a hibák alakjának, helyének, kiterjedésének megrajzolását. Hátránya azonban az, hogy szemben a visszhang módszerrel a hiba típusára és a hiba mélységére nem ad információt.

1.1.4. Az ultrahang visszaverődés törvényei

Az anyagon belüli hibák kimutathatóságának alapvető feltétele az, hogy a hibánál az ultrahang visszaverődjön. Ha a hiba egy belső anyagfolytonossági hiányosság pl. belső lunke, tekintettel arra, hogy ott a tömör anyagon belül levegő, vagy gáz van, hasonló az ultrahang akadálya, mint a tárgy túlsó felénél. Nem annyira egyértelmű a visszaverődés, ha ez a hiba valamely más anyaggal telített (pl. salakzárványok esetén), vagy abban az esetben ha a hiba egy kis rés-szélességű repedés. Az első esetben számolni kell azzal, hogy az ultrahang a tömör salakzárvány anyagába is átmegy, a repedésnél pedig azzal, hogy annak felületei összeérhetnek és ezáltal az ultrahangsugárzást továbbvezethetik. A határfelületi viselkedést tehát a belső hibák kimutathatóságában kulcskérdésként kell tekintenünk.

1.1.4.1. Ultrahang visszaverődés határfelületnél

A vizsgálati módszer elemzése előtt néhány alapfogalom egyértelmű definiálása, értelmezése célszerű. Az ultrahang nyomása a

$$p = \rho c 2\pi f A \quad (1.7)$$

összefüggéssel írható le, ahol

ρ az anyag sűrűsége, amelyben az ultrahang terjed,

c az adott anyagon belül az ultrahang terjedési sebessége,

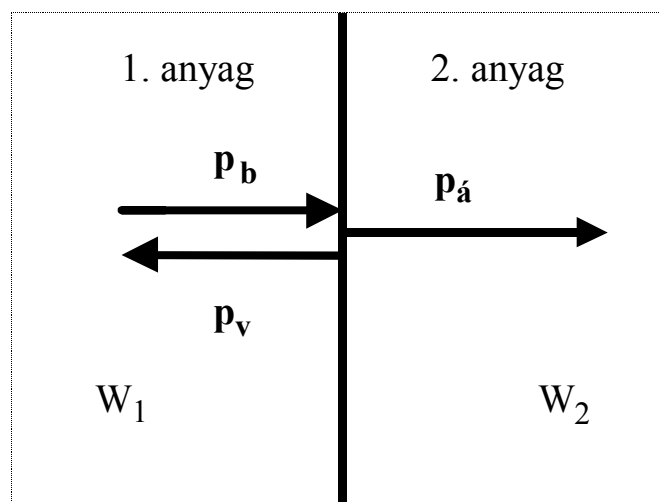
f a terjedő ultrahang frekvenciája és

A az ultrahang rezgésnél a részecskék kitérés amplitúdója.

Akusztikai keménység alatt az illető anyag sűrűségének és az anyagon belüli terjedési sebességének a szorzatát értjük

$$W = \rho c . \quad (1.8)$$

Az anyag határfelülete megzavarja a hullámok terjedését. Ha az ultrahang hullámok két különböző sűrűségű anyag határfelületéhez érkeznek, akkor ott a hullámok egy része visszaverődik, irányváltozásra kényszerül, elnyelődik és szóródik, más részük átmegy a másik közegbe és továbbterjed. Ha az anyagot például légüres tér határolja, a hanghullámok elenyésző része jut csak tovább. Azt, hogy a hullámmal a határfelületen mi fog itt történni, a két közeg akusztikai keménysége, a beesés szöge, a hullám fajtája és a felület minősége határozza meg. A belső hibák hibakimutathatósága szempontjából a visszaverődés mértéke a meghatározó. A 1.8. ábra egy ilyen határfelületi állapotot szemléltet.



1.8. ábra

Ultrahang a határfelületnél

Legyen a bemenő hangnyomás p_b . Jelöljük az átmenő hullámok nyomását p_a -val, a visszaverődő hangnyomást pedig p_v -vel. A visszaverődési tényezőt értelmezzük a visszavert és a bemenő hangnyomás hányadosaként az alábbi módon:

$$R = \frac{p_v}{p_b} 100 . \quad (1.9)$$

Az átmenő és a bemenő hangnyomás hányadosát átvezetési tényezőnek nevezzük:

$$D = \frac{p_a}{p_b} 100 . \quad (1.10)$$

A viszonyszámok az akusztikai keménységből az alábbi módon számolhatók:

$$R = \frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_2} 100 \text{ és} \quad (1.11)$$

$$D = \frac{2 \cdot W_2}{W_1 + W_2} 100, \quad (1.12)$$

ahol W_1 az 1-es jelű anyag akusztikai keménysége és
 W_2 a 2-es jelű anyag akusztikai keménysége.

A visszaverődési tényező számítására tekintsük a következő két példát.

1. példa: Acél (1), levegő (2) határfelületénél a sűrűség és a sebesség szorzatából a (1.8) összefüggéssel képzett akusztikai keménységértékek :

$$W_1 = 4,5 \cdot 10^7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \quad \text{és} \quad W_2 = 4,0 \cdot 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}.$$

A visszaverődési tényező jó közelítéssel 100 %.

$$R = \frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_2} \cdot 100 = \frac{4,0 \cdot 10^2 - 4,5 \cdot 10^7}{4,5 \cdot 10^7 + 4,0 \cdot 10^2} \cdot 100 \approx -100 \quad \% .$$

A negatív előjel arra utal, hogy a visszavert hullám ellenfázisban lesz a beesési hullámhoz képest

2. példa: Acél (1), víz (2) határfelületnél:

$$W_1 = 4,5 \cdot 10^7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \quad \text{és} \quad W_2 = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}.$$

A visszaverődési tényező 100 % -hoz közeli értéke itt is a kedvező visszaverődésre, ultrahangvizsgálat szempontjából kedvező hátfaljelre utal:

$$R = \frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_2} \cdot 100 = \frac{1,5 \cdot 10^6 - 4,5 \cdot 10^7}{4,5 \cdot 10^7 + 1,5 \cdot 10^6} \cdot 100 = -93,5 \quad \% \text{ és}$$

$$D = \frac{2W_2}{W_1 + W_2} \cdot 100 = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^6}{4,5 \cdot 10^7 + 1,5 \cdot 10^6} \cdot 100 = 6,5 \quad \% .$$

A negatív előjel itt is a visszaverődő hullámok ellenfázisára utal.

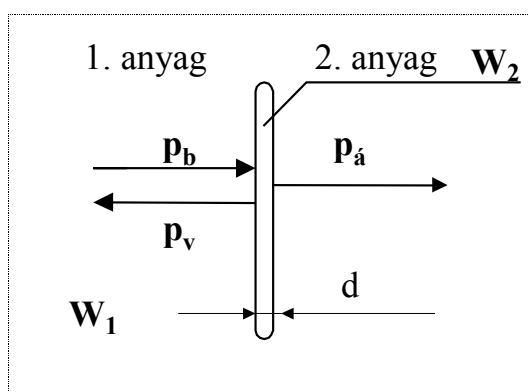
Ha a hanghullám vízből megy át az acélba, akkor a képletben az akusztikai keménység értékei helyet cserélnek. A számítás eredményeként a visszaverődési tényezőre $R = 93,5 \%$ -ot, az átvezetési tényezőre pedig $D = 193,5 \%$ -ot kapunk, ami azt jelenti, hogy a beeső és a visszaverődő hullám azonos fázisú lesz, az áthaladó hullám hangnyomása viszont közel kétszeresére nő. Ezt az ultrahangjelenséget is hasznosítjuk akkor, amikor az ultrahangos fej alá folyadék csatolóközeget helyezünk.

Az előbbi összefüggések alkalmazásával, az adott anyag sűrűségének és az anyagon belüli terjedési sebességének ismeretében, a visszaverődés mértéke egyszerűen számítható. Ultrahangos és fizika szakkönyvekben a sűrűség és terjedési sebesség értéke megtalálható. Az ultrahangos készülék erősítési lehetőségétől függ csupán az, hogy a visszaverődési tényező milyen szintjén válik lehetővé a megfelelő értékelés, a hibakimutatás.

1.1.4.2. Visszaverődés anyagon belüli repedésnél

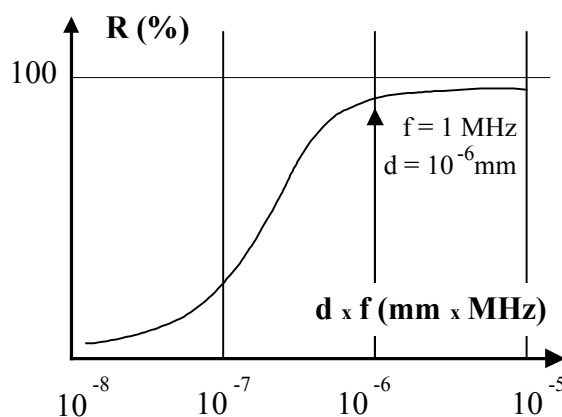
A határfelületi esetet a 1.9. ábra szemlélteti. Kísérleti tapasztalatok állnak rendelkezésre, hogy különböző anyagminőségeken belül, a kis rés-szélességű repedések milyen mértékben verik vissza az ultrahangot. A visszaverődés meghatározóan a d rés-szélességtől és az ultrahang frekvenciájától függ. A 1.10. ábra a visszaverődési tényező rés-szélességtől és frekvenciától függését szemlélteti acél és alumínium alapanyag esetén. Válasszunk az egyszerűség kedvéért 1 MHz vizsgálati frekvenciát. A diagramból kiolvashatjuk, hogy 10^{-6} mm rés-szélesség esetén már 90 % feletti a visszaverődési tényező.

Megállapítható, hogy az ultrahangos vizsgálattal a kis rés-szélességű hajszálrepedések is nagy biztonsággal kimutathatók.



1.9. ábra

Ultrahang visszaverődés repedésnél



1.10. ábra

Visszaverődési tényező repedésnél

1.1.5. Anyagminőségek vizsgálhatósága ultrahanggal

Ha a hanghullámok anyagon haladnak keresztül, gyengülnek. A hullámok amplitúdója egyre csökken és csökken ezáltal a hangnyomásuk is. A készülékünk kimutatási érzékenysége alá csökkenhet a visszavert hangnyomás. Ez a különböző anyagoknál behatárolja a vizsgálható legnagyobb méretet. A hanggyengülést elsősorban az elnyelődés, azaz a hangenergiának hőenergiává átalakulása, másrészt az anyagszerkezeti inhomogenitás miatt bekövetkező szóródás okozza, pl. szemcsehatárokon, vagy öntöttvasaknál a grafitlemezek mentén. A gépészmérnöki gyakorlatban fontosabb anyagok vizsgálhatósága, az alábbiak szerint jellemezhető:

Az acélok a legkedvezőbbben vizsgálható anyagok közé tartoznak. Több méter hosszú rudak, tengelyek is jól vizsgálhatók. Az ausztenites acéloknál kell csupán számolnunk nagyobb mértékű hanggyengüléssel.

Az öntöttvasak vizsgálhatóságát alapvetően a bennük beágyazódott grafit mennyisége és alakja befolyásolja. Lemezgrafitos öntöttvasnál a hangelnyelődés szempontjából kedvezőbb alacsony frekvencia ($f = 0,25$ MHz) alkalmazása esetén is fennállhat az, hogy csak 10-20 mm-es vastagságban vizsgálhatók át. A gömbgrafitos öntöttvasak méteres keresztmetszetének átsugárzása sem okoz gondot.

Könnnyű és színesfémek (alumínium, réz és ötvözetek) jól vizsgálhatók. Alakított, sajtolt állapotukban akár méteres méretekben is átsugározhatók. Öntött állapotukban, különösen ha durvaszemcsés a szövetszerkezetük, az öntöttvasakhoz hasonlóan, csak alacsony frekvenciával vizsgálhatók. Ebben az esetben is számolni kell a kisebb átsugározható mérettel.

Az égetett kerámiák és az üvegek jól vizsgálhatók.

A műanyagok közül a hőre keményedők általában jobban vizsgálhatók, mint a hőre lágyulók.

1.1.6. A hibanagyság meghatározása AVG módszerrel

Az ultrahang vizsgálattal feltárt hibák nagyságának meghatározása abban az esetben, ha a hibák nagyméretűek és a hangnyaláb szinte teljes keresztmetszetet lefedik, vagy azon is túl nyúlnak, egyszerű vizsgálati feladatot jelentenek. A hibahatárok letapogatásával a hiba kiterjedése megállapítható. Ilyen esetekben a hiba a visszaverődésben nagy "reflektor"-ként minősül. Kisebb kiterjedésű hibák nagyságára a visszavert sugár intenzitásából lehet következtetni. Az ilyen méretű hibák az ultrahangos vizsgálatban kis reflektorként tekinthetők.

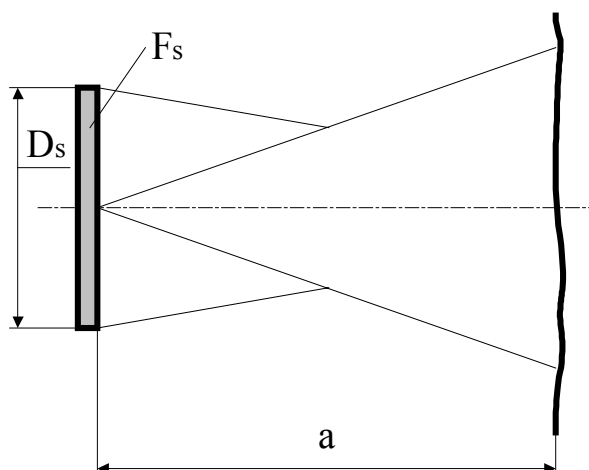
1.1.6.1. Az AVG diagram szerkesztése

A diagram elnevezése az alábbi német szavak kezdőbetűiből következik:

$A = Abstand$ (a hiba és a vizsgálófej közötti távolság relatív értéke),

$V = Verstärkung$ (erősítés dB-ben),

$G = Grösse$ (helyettesítő relatív hibaméret).

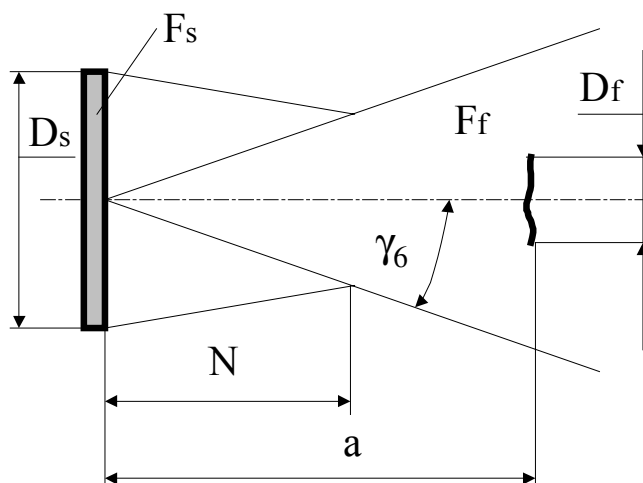
**1.11. ábra**

Visszaverődés nagy reflektorról

A nagy reflektorról visszavert sugárzás intenzitása (H_r) a sugárzó felületével (F_s) egyenes arányban áll, értéke a sugárzó és a reflektor közötti távolság (a), valamint az alkalmazott sugárzás hullámhosszájának (λ) növekedésével fordított arányban csökken (1.11. ábra)

$$H_r = \frac{F_s}{2a\lambda} \quad (1.13)$$

Kis reflektor esetén a visszavert sugárzás intenzitása (H_f) egyaránt függ a sugárzó (F_s) és a hiba visszaverő felületétől (F_f). A távolság (a) és a hullámhossz (λ) négyzetesen csökkeni értékét (1.12. ábra)

**1.12. ábra**

Ultraghangvisszaverődés kis reflektorról

$$H_f = \frac{F_s F_f}{a^2 \lambda^2} \quad (1.14)$$

Értelmezzük a relatív távolságot és a relatív hibaméretet az

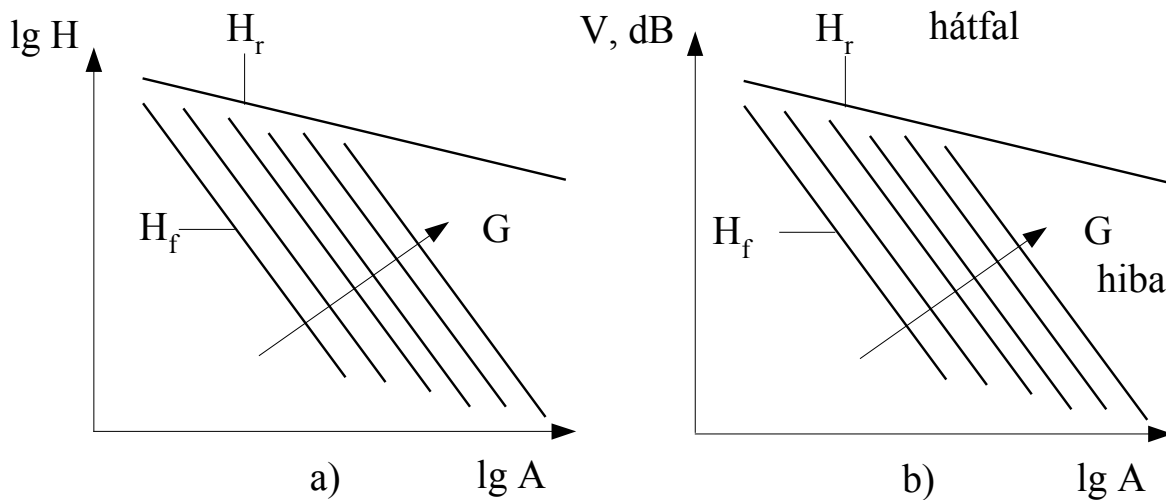
$$A = \frac{a}{N} \text{ és } G = \frac{D_f}{D_s} \quad (1.15)$$

formákban.

Ezek bevezetésével a visszavert sugárzások intenzitásai az alábbi összefüggésekkel jellemezhetők:

$$H_r = \frac{\pi}{2A}, \text{ illetve} \quad (1.16)$$

$$H_f = \frac{\pi^2 G^2}{A^2} \quad (1.17)$$



1.13. ábra

a) AHG diagram, b) AVG diagram

Kettős logaritmikus léptékű koordináta-rendszerben a nagy reflektor visszaverődésének intenzitása a relatív távolsággal lineáris kapcsolatot mutat. Ebben a koordináta-rendszerben a kis reflektor visszaverődésének intenzitása a G értékétől függő párhuzamos egyenesek szerint változik. Ezt nevezzük az AHG diagramnak (1.13. ábra a/ részlete).

Ultrahangos készülékeknél az adott erősítés beállításánál a visszaverődés intenzitását a visszavert jelek magassága reprezentálja. A nagyobb távolságban elhelyezkedő, kisebb méretű hiba jelmagassága kisebb, mint az azonos távolságban lévő nagy reflektoré, illetve azonos hibaméretnél a kisebb távolságban elhelyezkedő jel magassága a nagyobb értékű. Az ultrahangos vizsgálat kiértékelését segíti az, ha a kis hibák jelalakjának megfigyelésére is van lehetőségünk. Az ultrahangos készülékek erősítés változtatásával a visszavert jelek magasságai azonos (H_a) szintre hozhatók. Leggyakrabban az oszcilloszkóp képernyő 4/5 magasságát szoktuk viszonyítási alapként tekinteni.

Az ultrahangos készülékek erősítői teljesítményerősítők. Két teljesítményjellegű mennyiség (P_2 és P_1) összehasonlítására alkalmazzuk a bel (B), illetve a decibel (dB) mérőszámokat. Ezek a teljesítmények hányadosainak 10-es alapú logaritmusából az alábbi módon számíthatók:

$$\Delta P = \lg \frac{P_2}{P_1} \quad (B), \quad \text{illetve} \quad \Delta P = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \quad (dB). \quad (1.18)$$

A visszavert jelek hangnyomását, illetve ezekkel arányos visszaverődési intenzitásokat dB -ben hasonlítjuk össze. Mivel a teljesítmény a nyomás, illetve a visszaverődés intenzitásának négyzetével arányos, írható:

$$\Delta P = 10 \cdot \lg \frac{H_2^2}{H_1^2} = 20 \cdot \lg \frac{H_2}{H_1} \quad (dB). \quad (1.19)$$

Ultrahangos készülékeknél a H_a intenzitás jelmagasságának H értékre növeléséhez - a (1.19) összefüggés alapján - V erősítés szükséges. Értéke a

$$V = 20 \cdot \lg \frac{H}{H_a} \quad (dB) \quad (1.20)$$

kifejezéssel határozható meg. A (1.20) kifejezés bevezetésével az AHG diagram a 1.13. ábra szerint AVG diagrammá konvertálható. A (1.20) kifejezés alkalmazására nézzünk egy egyszerű példát. A hiba jelmagassága H_a . Ezt a jelmagasságot erősítéssel kétszeresére akarjuk növelni. Ehhez

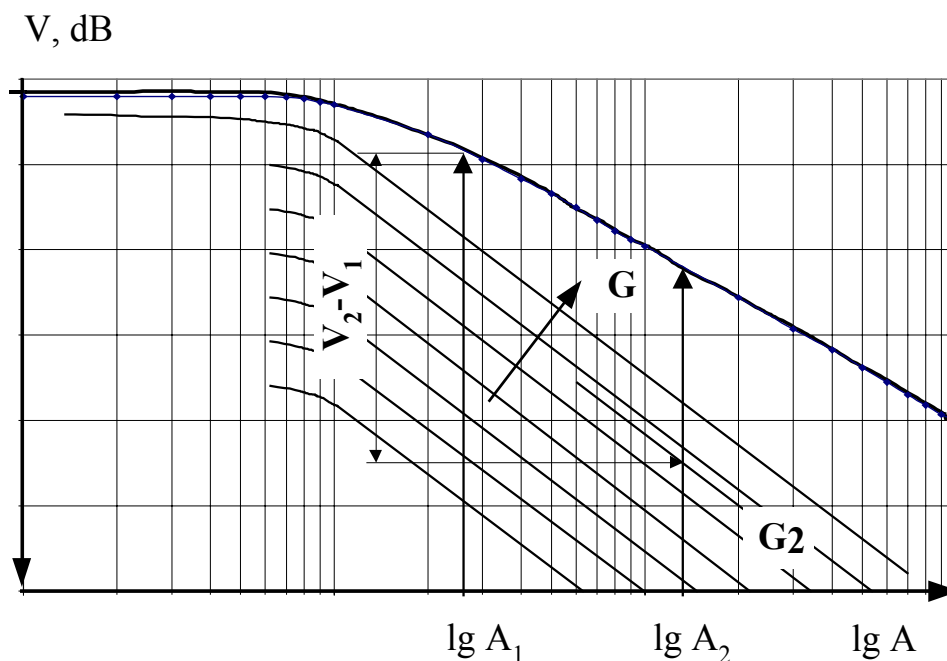
$$V = 20 \cdot \lg \frac{2H_a}{H_a} = 20 \cdot \lg 2 = 20 \cdot 0,30103 \approx 6 \quad (dB) \quad (1.21)$$

erősítés szükséges. Újabb és újabb 6 dB erősítéssel a jelmagasságok duplázhatók.

1.1.6.2. Az AVG diagramok alkalmazása

Az AVG diagramok alkalmazását a 1.14. ábra alapján ismertetjük. Első lépésként az ismert méretű etalonon elvégezzük a távolság hitelesítését. Az etalon nagy felületével nagy reflektornak minősül. Az etalon végjelét V_1 erősítéssel beállítjuk, például a képernyőmagasság $4/5$ -ére. A relatív távolság ebben az esetben A_1 . Ezt követően megkeressük a hibát. Ennek jelmagasságát is beállítjuk az előbbi képernyőmagasságra. Ehhez V_2 erősítés kell. A relatív távolság most A_2 . Végezetül a 1.14. ábra A_1 hátfaljelétől visszamérjük a $V_2 - V_1$ erősítéskülönbséget és ezt átvetítjük A_2 -re. Az egyenes seregből a relatív hibaméret G kijelölhető.

A feladat konkrét megoldásához ismernünk kell a vizsgálófej adatait, a vizsgálófej átmérőjét és frekvenciáját. Az ultrahangos fejek gyártói a konkrét fejhez általában szolgáltatják az AVG diagram aVd (távolság, erősítés, hibaméret) változatát is.

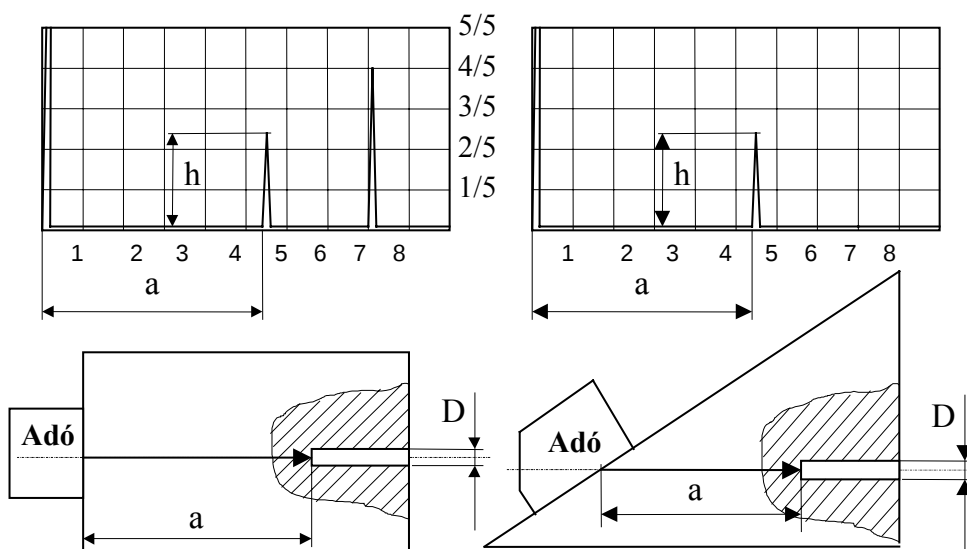


1.14. ábra

Példa az AVG diagram alkalmazására

1.1.6.3. A hibanagyság meghatározásának további módszerei

A hibanagyság meghatározásának további módszerei is ismeretesek. Ezek közül legfontosabbnak a mesterséges hibákkal történő összehasonlítás módszere tekinthető. A módszernél az ismeretlen méretű hibáról kapott visszhangjelet, egy meghatározott méretű műhiba visszhangjával hasonlítjuk össze. Az összehasonlító testek, a vizsgálati feladatokhoz illeszkednek, lehetnek lapos fenekű furatok, hornyok, bemetszések. Példákat mutat erre a 1.15. ábra.



1.15. ábra

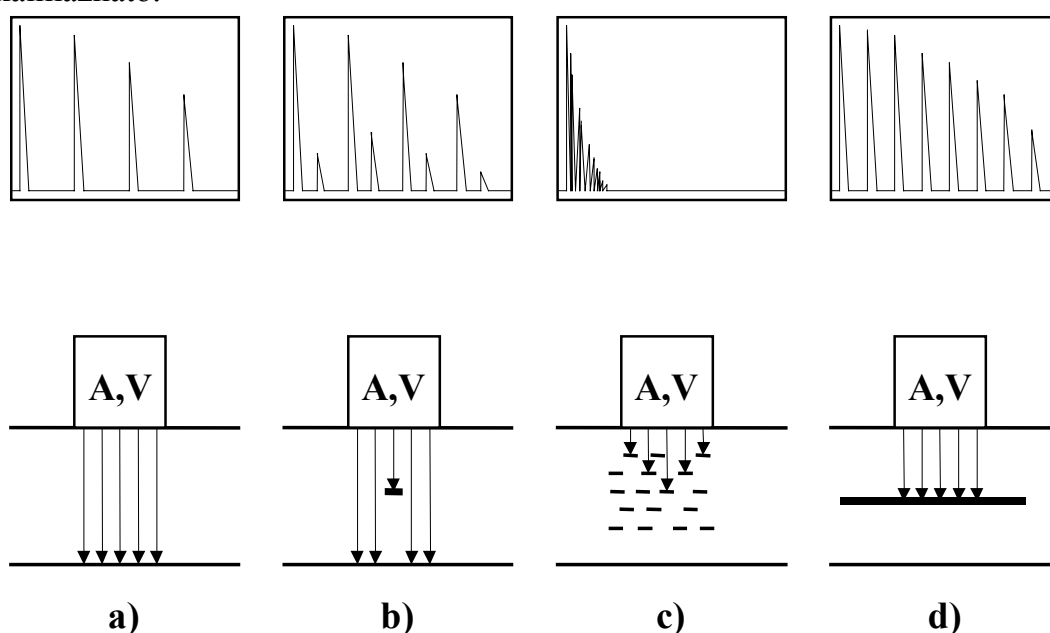
Hibanagyság meghatározása műhibákkal

1.1.7. Az ultrahangos vizsgálat gyakorlati alkalmazásai

Az ultrahangos vizsgálatot a gyakorlatban igen kiterjedten alkalmazzák. A következő pontokban néhány nagy gyakorlati jelentőségű vizsgálatot ismertetünk röviden.

1.1.7.1. Lemezanyagok vizsgálata

A lemezanyagok leggyakoribb hibái a zárványosság, illetve a rétegesség. Az elhengerelt zárvány (pl. salakzárvány) félig hangáteresztőnek minősül. A rétegesség az egyik legveszélyesebb acélgyártási hiba. Amennyiben a folyékony acél öntése utáni dermedéskor az öntőüstben (bugában) szívódási üreg keletkezik, a későbbi hengerlés során ez nem minden esetben heged össze; ebből származik ez a hiba. Az ultrahangos készüléken ezek hibajelei jól felismerhetők (1.16. ábra). A lemezek ellenőrzésére legmegbízhatóbban az ultrahang vizsgálat alkalmazható.



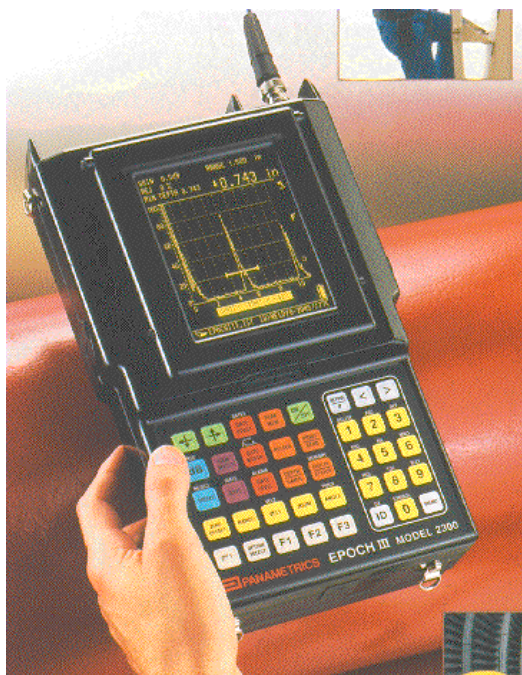
1.16. ábra

a) hibátlan lemez, b) egyedi hiba, c) zárványosság, d) rétegesség

1.1.7.2. Csövek, nyomástartó edények vizsgálata

A gyártási eredetű hibák hasonlóak, mint a lemezeknél. Az üzemeltetés során, újabb hibák megjelenésére is számíthatunk. Ilyenek például a kifáradási repedések, a felületi korróziós roncsolódások és a feszültségkorróziós repedések. Mint korábban láttuk, a felületszerű hibák, így a repedések ultrahang vizsgálatlaltal nagy biztonsággal kimutathatók.

Speciális feladat e termékeknél, a felületi korróziós károsodás ultrahangos falvastagság mérési technikával történő jellemzése. E célra digitális kijelzésű falvastagság-mérőket fejlesztettek ki. Ezeknél egy közös fejbe építik be az adót és a vevőt. Az adástól a vételig eltelt időt mérik, amely az adott anyagnál a vastagsági mérettel arányos. Az arányosítást azonos anyagú és méretű etalonnal, hitelesítéssel valósítjuk meg. A falvastagság-mérők 0,1 mm pontossággal, több pontos mérés esetén lehetővé teszik a belső felületek korrózióval roncsolt profiljának a kimérését, kirajzolását (1.17. ábra).

**1.17. ábra**

Ultraszagos falvastagságmérő készülék

1.1.7.3. Kovácsolt alkatrészek, rudak vizsgálata

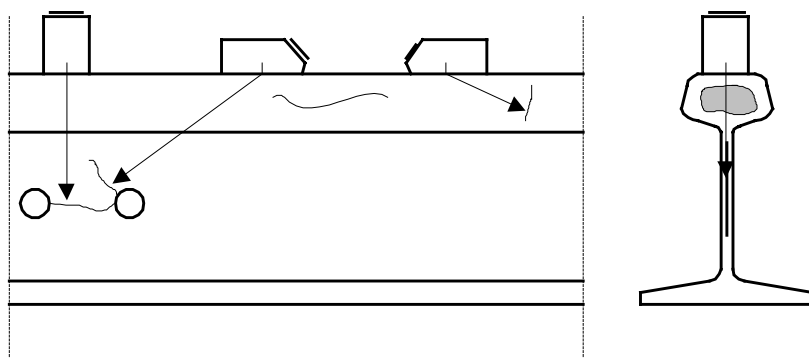
A nagy méretek miatt ezeknél is elsősorban az ultrahangos vizsgálatot célszerű alkalmazni. A felületi és a belső hibák, anyaghibák, folytonossági hiányok nagy biztonsággal kimutathatók (1.18. ábra). A vizsgálatot egyaránt alkalmazzák a gyártást követően termékminősítő vizsgálatként, vagy az üzemeltetés során az üzemeltetésből származó hibák felderítése céljából.

**1.18. ábra**

Kovácsolt termék vizsgálata

1.1.7.4. Vasúti sínek ellenőrzése

Az ultrahangos vizsgálat e területen rendkívül fontos ellenőrzési módszer. Alkalmazásá-



1.19. ábra

Vasúti sín ultrahangos ellenőrzése

val a sínekben kifejlődő fáradásos eredetű repedések időben feltárhatók. A vasútüzemben e célra vizsgáló műszerkocsikat alakítanak ki. A sínfejekre felhelyezett merőleges és szögfejekkel (víz csatoló-közeg alkalmazásával) az egész sínkeresztmetszet folyamatosan ellenőrizhető (1.19. ábra).

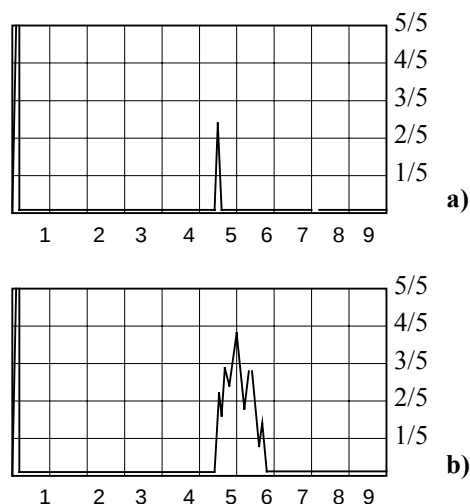
1.1.7.5. Hegesztési varratok minősítése

Acélszerkezeteink jelentős része hegesztett kivitelű. A hegesztési varratokban, anyagfolytonossági hibák elkerülhetetlenül keletkezhetnek már a gyártás során is, később pedig az üzemeltetés következményeként, pl. korróziós, vagy fáradásos eredetű repedések formájában. A hegesztési varratok ellenőrzésének és erre épülve ezek minősítésének klasszikus módszerei a radiológiai módszerek, (röntgen- és az izotópvizsgálatok). Az ultrahangvizsgálat ezen a területen egyrészt az olcsósága, másrészt a legveszélyesebb repedésszerű hibáknál bizonyítottan jobb hiba-kimutathatósága miatt egyre inkább előtérbe kerül.

Valamely vizsgálat hegesztési varratok minősítésére való alkalmassága alapvetően attól függ, hogy a módszer alkalmas-e a hibák típusának, helyének, nagyságának és a gyakoriságának a megállapítására.

A hegesztési varratok hibatípusait és ezek jelölési rendszerét szabvány rögzíti (MSZ EN 26520). Az alkalmazott hegesztési eljárástól függően e hibák széles választékot mutatnak. Lehetnek például repedések, gáz- és tömör-zárványok, összeolvadási és egyéb felületi hibák. A hibák egy része a felületen is látható, másrésztük azonban a varratokon belül helyezkednek el. Alakjukat illetően e hibák lehetnek térfogati jellegűek és felületszerű hibák. A felületi, vizuálisan is érzékelhető hibákat, szemrevételező vizsgálattal célszerű minősíteni. Az így fel nem fedezhető hibák kimutatására az ultrahangos vizsgálat minden hibatípusnál alkalmas.

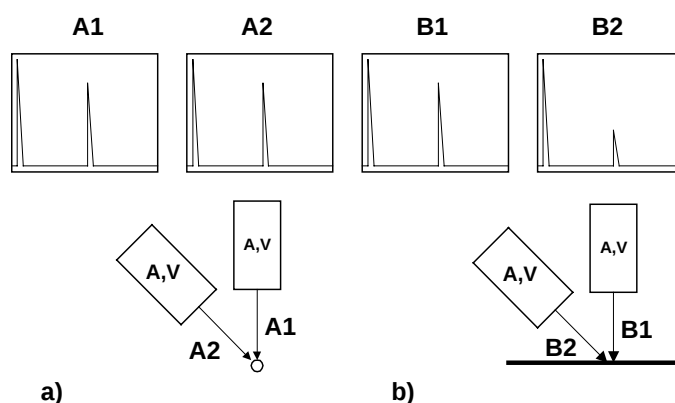
A hiba típusa a visszavert sugárzásból képzett hibajel alakjából, illetve a hiba helyéből állapítható meg. Nagy gyakorlatot, szakértelmet igényel ez. Előírások rögzítik a vizsgáló személy elvárt ultrahangos képzettségének szintjét (MSZ EN 473). Ilyen képzettség hiányában is belátható, hogy pl. egy gömbzárvány más jelalakot ad mint pl. a salakzárvány (1.20. ábra).

**1.20. ábra**

Hibakijelzés

a) gázzárványnál, b) salakzárványnál

A gömbzárvány túszerű, illetve a salakzárvány fenyőfaalakú hibajele a visszaverő felületek különbözőségéből adódik. A salakzárvány szakadozott, sokszögű felületei mikro-reflektorokként is felfoghatók. A felületi típusú pl. repedéses hibák hibajelei is túszerűek. De azonnal látható a különbség a jelalakban, ha a feltárt hibánál alkalmazunk még egy másik irányból is besugárzást (1.21. ábra). A gömbhiba visszaverő felülete iránytól független, felületi hibánál azonban a szögben érkező sugárzásnak ellenkező irányba verődése miatt le-

**1.21. ábra**

Hibakijelzés

a) gázzárványnál, b) repedésnél

csökken a sugár irányába eső komponense. A hibajel magassága ezáltal lecsökken. Természetesen e két hibatípusnál nagy különbség adódik a hibajel magasságában is. Amennyiben a hegesztési varratok vizsgálatára a visszhangmódszert alkalmazzuk a hiba helyét is meg tudjuk állapítani. A hibanagyság meghatározásának lehetőségét már megismertük. Gyakoriság alatt a hegesztési varratok hossza mentén való előfordulási gyakoriságot kell érteni.

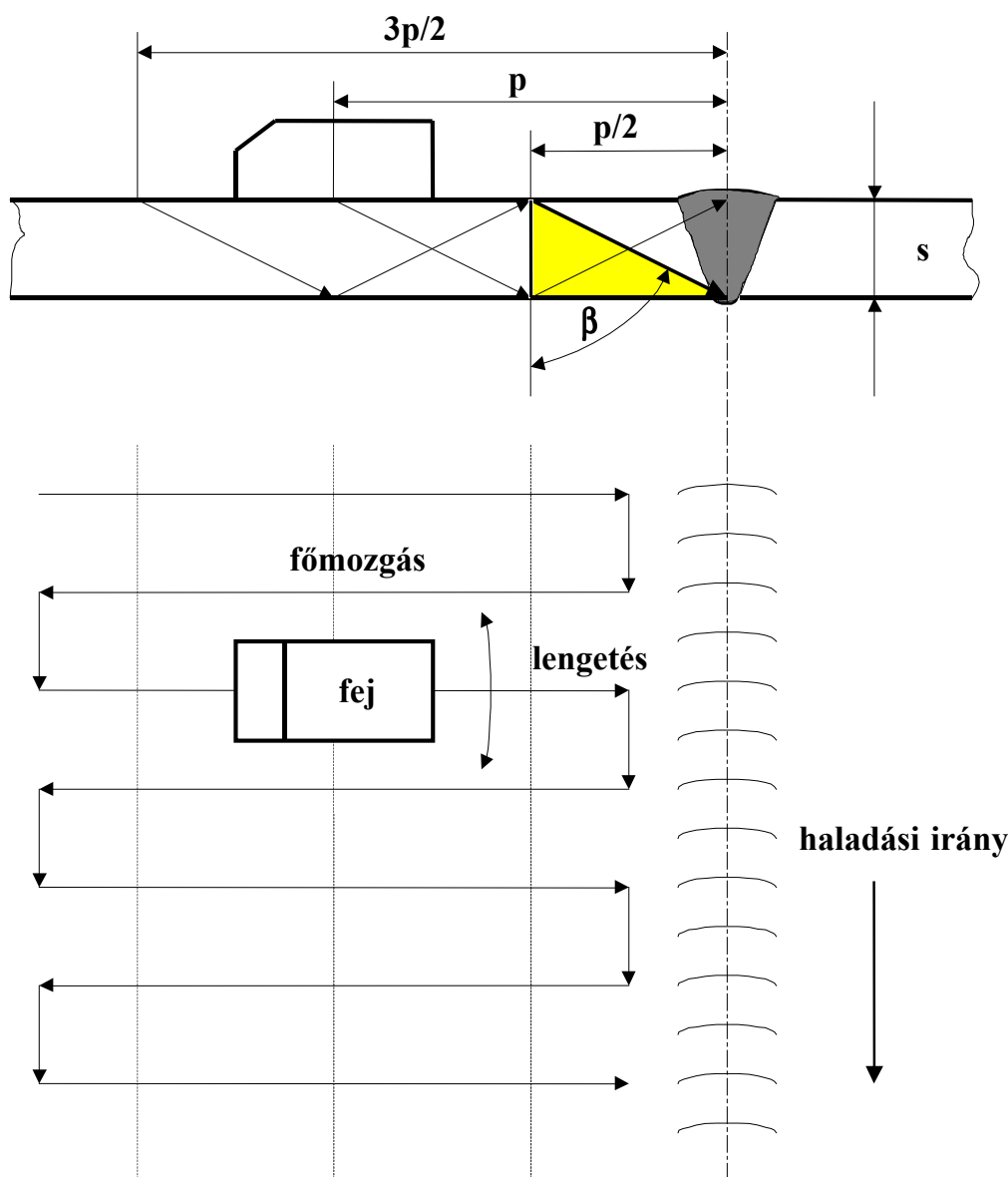
A hegesztési varratok vizsgálatára szögfejeket célszerű alkalmazni. Ebben az esetben a varratok felületét a jobb csatolás megvalósítása céljából nem kell megmunkálni. A hegeszté-

si varratba a sima lemezfelület felől sugárzunk be (1.22. ábra). Ezzel még kiküszöbölünk egy másik hibalehetőséget is, amely abból származhat, hogy a fejközeli közeltartományba eső hibáknál nem megfelelő a hibakimutathatóság. Minél vékonyabb a lemez, amelynek varratát vizsgálni kell, annál nagyobb szögű szögsugárzót (60, vagy 70 fokosat) alkalmazunk.

A 1.22. ábra felhasználásával tervezzük meg egy V varratos tompakötés vizsgálatát. Ha a varrat gyökoldalát akarjuk vizsgálni, helyezzük a β szögű szögfejet a varrattól $p/2$ távolságra. A derékszögű háromszögre írható:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{p/2}{s} \longrightarrow p/2 = s \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (1.22)$$

Amennyiben a koronaoldali hibát kívánjuk látni, sugározzunk a p távolságból.



1.22. ábra
Hegesztési varrat ultrahagos vizsgálatának vázlata

A lemez túloldaláról visszavert hangnyaláb most jut a koronaoldalra. A $p - p/2$ távolságok közötti besugárzásokkal az egész varratkeresztmetszet átvizsgálható. Ha valamely helyzetben hibajelzést észlelünk, az előzetesen távolságra már hitelesített képernyőn azonnal láthatjuk a hiba sugárzótól mért távolságát. A hosszmenti gyakoriságot értelemszerűen úgy állapíthatjuk meg, hogy a vizsgálatot folyamatosan végezzük a varrat mentén.

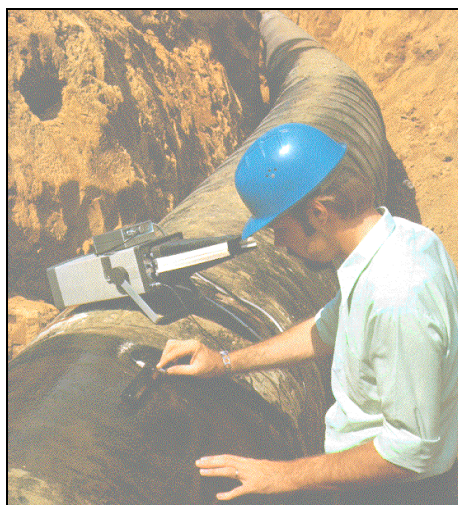
Hegesztési varratok vizsgálatára a 1.23. ábra és a 1.24. ábra mutat példákat. A 1.23. ábrán cső hegesztési varratának vizsgálata látható. A vizsgálatot a cső belső felületén végzik.



1.23. ábra

Cső hegesztési varratának vizsgálata
a belső felületen

A 1.24. ábra földalatti csővezeték varratának helyszíni ultrahagos vizsgálatát mutatja.



1.24. ábra

Földalatti csővezeték varratának helyszíni ultrahagos vizsgálata

1.2. RADIOLÓGIAI VIZSGÁLATOK

Szerkezetek belső anyagfolytonossági hibáinak kimutatására számításba vehető vizsgálati elvek közül a radiológiai elvek a legrégebbiek közé tartoznak. A radiológiai vizsgálatoknál a hibák kimutatására elektromágneses hullámokat alkalmazunk. Ezzel átsugározzák a vizsgálandó tárgyat és az áthaladásuk során bekövetkező változásokból következtetnek a belső hibák jelenlétére.

Az átvilágító sugárforrás típusától függően a radiológiai vizsgálatok az alábbi három fő csoportba sorolhatók:

röntgenvizsgálatok,
izotópos vizsgálatok és
betatronos vizsgálatok.

A röntgenvizsgálatoknál a röntgensugárzást, izotópos vizsgálatoknál a radio-izotópok radioaktivitását, betatronos vizsgálatoknál az elektrongyorsító berendezések által létrehozott elektromágneses sugárzásokat használjuk.

A különféle elektromágneses rezgések eltérő tulajdonságát a hullámhosszuk különbözősége okozza. Az említett sugárforrások hullámhosszúsága csökkenő sorrendben az alábbi intervallumba esik:

a röntgensugárzásnál	$\lambda = 10^{-8} - 10^{-10} \text{ m},$
az izotópoknál	$\lambda = 10^{-10} - 10^{-12} \text{ m és}$
a gyorsítóberendezéseknél	$\lambda = 10^{-12} - 10^{-16} \text{ m}.$

A vizsgálatok elterjedtsége különböző mértékű. A belső anyaghibák felderítésére leggyakrabban a röntgenvizsgálatot alkalmazzuk. Az alkalmazhatóságukban korlátot jelent az, hogy az átsugározható méret csupán 40 - 50 mm. Tagolt kivitelű, nagyobb (50 - 150 mm) méretű termékeknél, nehezebben hozzáférhető helyeken kedvezőbb hibakimutathatóság érhető el az izotóp vizsgálat alkalmazásával. A 200 mm-nél nagyobb vastagságú tárgyak elektromágneses átsugárzása csak a gyorsító berendezésekkel előállítható kemény sugárzásokkal valósítható meg.

Elektromágneses hullámokat az anyagvizsgálatban több területen is alkalmazunk:

a sugárzás elnyelődése elvét használjuk a hibafeltáró roncsolásmentes vizsgálatoknál,

a sugárzás által a vizsgált anyagban előidézett karakterisztikus, -az anyag vegyi összetételére jellemző- saját sugárkeltés felhasználásával anyagösszetétel elemzést végezhetünk,

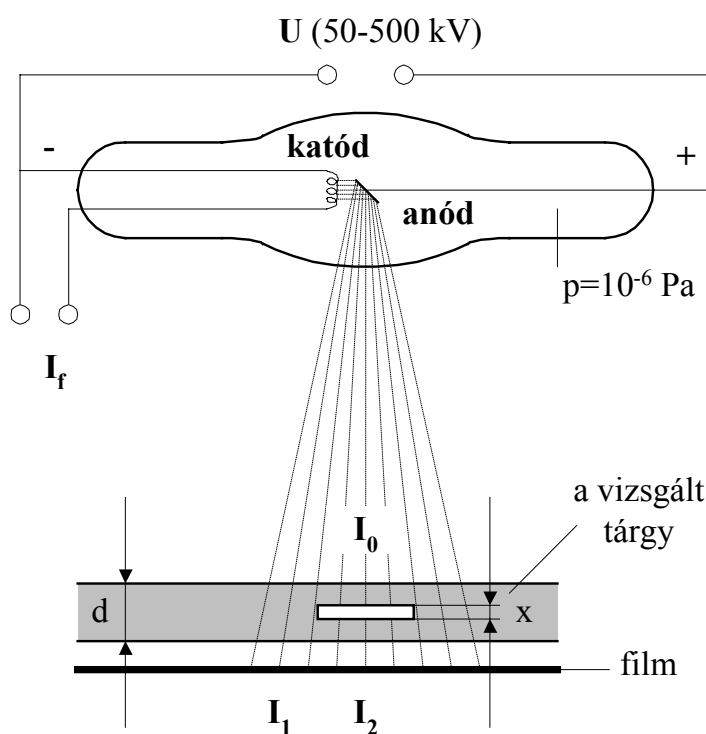
a sugárzások kristállysíkokon való elhajlásának elvét hasznosítjuk a finomszerkezeti radiológiai vizsgálatoknál.

1.2.1. Röntgenvizsgálat

A röntgensugárzás felfedezése Röntgen (1895) nevéhez kötődik. A vizsgálat belső anyaghibák kimutatása céljából történő első alkalmazásai azonban még mintegy 20 évet vártak magukra. Ezt követően rohamos mértékűvé vált a vizsgálat elterjedése; napjainkban például a hegesztési varratok vizsgálatánál ez a leggyakrabban alkalmazott vizsgálati módszer.

1.2.1.1. A röntgensugár előállítása

A röntgensugárzást az izzó-katódos elektroncsőben a 1.25. ábra szerinti módon állítjuk elő.



1.25. ábra

A röntgensugárzás előállítása

A légritkított terű csőben helyezkedik el a két elektród. Ezekre $U = 50 - 500 \text{ kV}$ nagyságú egyenfeszültséget kapcsolunk. A negatív pólusú elektródot katódnak, a pozitív pólusút anódnak nevezzük. A katódra kapcsolt kis feszültség I_f fűtőáramával a katódot izzó állapotba hozzuk. A termikus emisszió következtében az izzó katódból, mint energiaforrásból elektronok lépnek ki, amelyeket az anód és a katód közé kapcsolt nagyfeszültségű villamos térben felgyorsítunk. A nagy sebességű elektronok az anódra ütközve lefékeződnek, amelynek következtében mozgási energiájuk nagy része hővé alakul, egy kis része azonban elekt-

romágneses rezgés formájában kisugárzódik. Az anód kisugárzását nevezzük röntgen sugárzásnak. A röntgensőbe bevezetett villamos energia mintegy 97 %-a hővé alakul, s csupán 3 %-nyi a vizsgálatnál hasznosítható röntgensugárzási energia. A röntgensőveket ezért az alkalmazott csőfeszültségtől függő mértékben hűteni kell. Kis csőfeszültségnél elegendő a levegőhűtés alkalmazása, nagy csőfeszültségnél azonban a cső körül nagyobb hűtőhatású olajat, vagy vizet szükséges áramoltatni.

Az elektronok lefékeződése több lépésben következik be, aminek következtében különböző hullámhosszúságú sugarakból álló sugárnyaláb lép ki az anódból. Kísérleti mérések szerint e spektrum minimális hullámhosszúsága és a csőfeszültség között a

$$\lambda_{\min} = \frac{1,24 \cdot 10^{-6}}{U} \quad (1.23)$$

kapcsolat áll fenn, ahol a hullámhosszúság mértékegysége *méter*, a csőfeszültségé *Volt*. Kis csőfeszültségnél kis áthatolóképességű lágy sugárzás keletkezik, nagy csőfeszültségnél nagy áthatolóképességű kemény sugárzás.

A sugárzás intenzitása arányos (K tényezően keresztül) az anód Z rendszámával és az U csőfeszültség négyzetével. Kapcsolatukat az alábbi összefüggés írja le:

$$I = KZU^2. \quad (1.24)$$

1.2.1.2. A hibakimutatás elve

A röntgensugárzás az anyagon áthaladva az elnyelődés (abszorpció) és a szóródás miatt veszít az energiájából. Ez a gyengülés az

$$I = I_0 e^{-\mu \cdot d} \quad (1.25)$$

összefüggéssel jellemezhető, ahol

I_0 a tárgyba belépő sugárzás intenzitása,

d az anyag vastagsága és

μ a gyengülési együttható.

A gyengülési együttható az átsugárzott anyag ρ sűrűségétől, Z rendszámától és a sugárzás λ hullámhosszúságától az alábbi módon függ:

$$\mu = c\rho\lambda^3 Z^3. \quad (1.26)$$

A belső anyaghibákat a 1.25. ábra szerinti elrendezésben a vizsgálat tárgy ép tartományán áthaladó röntgensugárzás I_1 és a hibát tartalmazó részen áthaladó röntgensugárzás I_2 intenzitásának különbözőségéből lehet kimutatni. A d vastagságú tárgyon belül legyen egy anyagfolytonossági hiba a sugárzás irányába eső x mérettel. Jelöljük μ_1 -gyel az alapanyag, μ_2 -vel a hiba elnyelődési együtthatóját. Írható:

$$I_1 = I_0 e^{-\mu d}, \quad (1.27)$$

$$I_2 = I_0 e^{-\mu_1(d-x) - \mu_2 x}. \quad (1.28)$$

A hibát kitöltő gáznemű közegnél a gyengülési együttható lényegesen kisebb mint a szilárd anyagnál:

$$\mu_2 \ll \mu_1. \quad (1.29)$$

Ezt figyelembe véve a hibás és az ép anyagrészen áthaladó sugárzás intenzitásának viszonya:

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{\mu_1 x}. \quad (1.30)$$

A (1.26) és a (1.30) összefüggések alapján megállapítható, hogy adott anyagnál, adott belső hibaméretnél a hibakimutatás alapját képező intenzitás-viszonyszám meghatározóan csak az alkalmazott sugárzás hullámhosszúságától függ. Tehát a kisméretű hiba jó hibakimutathatósága érdekében nagy hullámhosszúságú lágy sugárzást célszerű alkalmazni.

Az intenzitás-különbség kimutatására három módszer is számításba vehető:

- a radio-fényképezés,
- a radiológiai átvilágítás és
- a sugárzás mérése.

Az alkalmazott módszertől függően a radiológiai vizsgálatot nevezhetjük radiográfiai, radioszkópiái és radiometriai eljárásnak is. Az ipari gyakorlatban ezek közül a legelterjedtebb a radio-fényképezés. A továbbiakban a hibafeltáró vizsgálat leírásainál ezért ezt fogjuk alkalmazni.

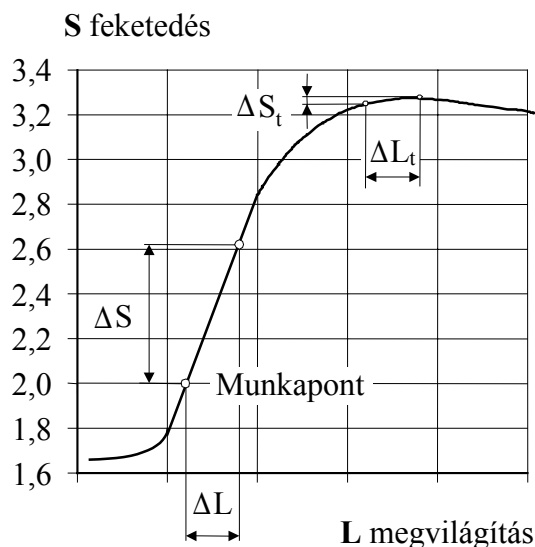
1.2.1.3. A röntgenvizsgálat paraméterei

Adott anyagminőségnél és anyagvastagságnál a megfelelő hibakimutatás céljából az alábbi vizsgálati paraméterek helyes kiválasztása és beállítása szükséges:

- a röntgenfilm minőségének kiválasztása,
- a katód fűtőáramának (I_f) beállítása,
- a gyorsító-feszültség (U) beállítása,
- a fókusz - tárgy távolság (f) megállapítása és
- a besugárzási expozíciós idő (t) meghatározása.

1.2.1.3.1. A röntgenfilm minősége

A röntgenfilmek gyártói különböző érzékenységű és méretű filmek nagy választékával állnak rendelkezésre, hasonlóan mint a fotózásnál. A filmek érzékenységét azok feketedési (más néven gradációs) görbéivel jellemzik (1.26. ábra). Annál érzékenyebb egy film, minél meredekebb a lineáris szakasz meredeksége (gradiense). A paraméterek felsorolásából is látható, hogy a radio-fényképezésnél a megfelelő negatív kép készítéséhez több paramétert kell helyesen beállítani, mint a fotózásnál.



1.26. ábra
Röntgenfilm gradációs görbéje

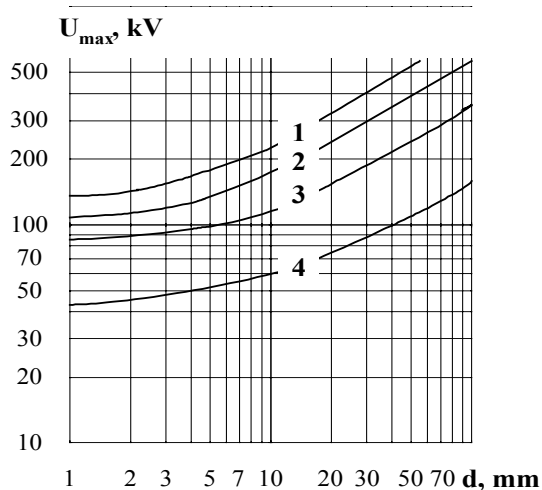
Többféleképpen lehet így jó képet készíteni, de többféleképpen el is lehet azt rontani, minek következtében nem érhető el a kívánt hibafelismerhetőség. A 1.26. ábra szerint, ha a film besugárzásához rosszul állítjuk be az L értékét -akár a kis intenzitású besugárzásnál, akár annak túlzott értékénél- az $I_2 - I_1$ különbség kis feketedés-különbséget okoz a filmen, következésképpen a hibát nem tudjuk kimutatni. Előbbi esetben alulexponált lesz a film, utóbbi esetben túlexponált. A paramétereket úgy kell beállítani, hogy a film alapfeketedését okozó I_1 intenzitásnál a besugárzás alapértéke a lineáris szakasz aljára, a munkapontba essen. A radiográfiai felvételeknél előírják az alapfeketedés mértékét, például a hegesztési varratok radiológiai felvételeinél elvárás az $S_a = 2$ biztosítása. Nagyobb anyagvastagságok esetén ez csak kiegészítő erősítő fóliák alkalmazásával érhető el. A leggyakrabban alkalmazott 20 - 200 μm vastagságú ólomfólia erősítőket a film elé és háta mögé helyezik. Az ólom anyag ilyen fóliavastagságnál szűrőként működik, javítja a filmre jutó sugárzás irányítottságát, kedvezőbbé teszi ezáltal a film besugárzását. Amennyiben az ólomlap vastagsága ennél nagyobb, az már gyengítő hatású lenne. Ilyen ólomlapokat használunk a vizsgálatnál abból a célból is, hogy visszaverődő sugárzás ne kerülhessen a filmre.

1.2.1.3.2. A katód fűtőárama

A katód I_f fűtőáramának növelése a besugárzás alapintenzitását növeli. E vizsgálati paraméter $I_f = 5$ mA -es alapértéket azonban csak kivételes esetben növeljük, mert az a katód túlfűtését okozza; ennek következtében rendkívüli mértékben csökken a cső élettartama is.

1.2.1.3.3. A csőfeszültség

Az előzőkből is kitűnt, hogy az x méretű hiba kimutatásához a lehető legkisebb gyorsító feszültséget célszerű alkalmazni. A feszültség csökkentésének azonban határt szab az, hogy csökkenti az I_0 intenzitást is, aminek következtében csökken az átvizsgálható anyagvastagság. Az alkalmazható csőfeszültség maximális értékét a vastagság és az anyagminőség függvényeként kell megválasztani (**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**).

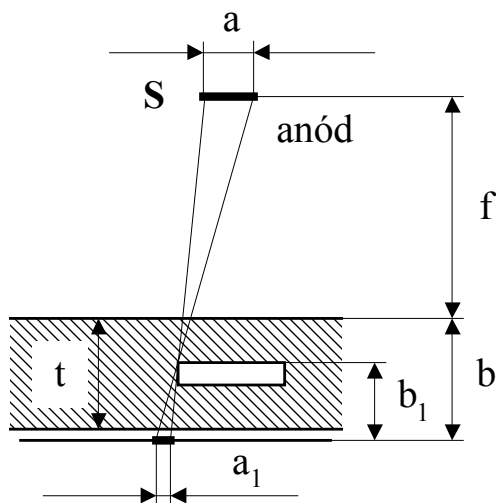
**1.27. ábra**

A csőfeszültség felső határa
 1-réz, nikkel; 2-acél; 3-titán;
 4-alumínium

1.2.1.3.4. A fókusz-tárgy távolság megválasztása

A röntgenberendezés sugárforrása (anódja) nem pontszerű. Így az anód két szélső pontjáról induló röntgensugárzás a hiba szélénél árnyékot okoz a filmen a 1.28. ábra szerint.

A geometriai arányokból következően:

**1.28. ábra**

A fókusz árnyékképe

$$a_1 = \frac{ab_1}{f + (b - b_1)}, \quad (1.31)$$

ahol a az anód szélessége,

f a fókusz-tárgy távolság,
 b a tárgy-film távolság és
 b_1 a hiba-film távolság.

Az árnyékkép kialakulásával a film feketedésében átmenet képződik a hibátlan hely és a hiba alatti részen, következésképpen nehezebbé válik a hiba felismerése; romlik a film kontrasztja. Kedvezőbb a helyzet, ha növeljük az f fókusz-tárgy távolságot. Az f távolságot ezért úgy kell megválasztani, hogy a távolságnak és a sugárforrás méretnek a viszonya ne legyen kisebb a következő értéknél:

$$\frac{f}{a} \geq 7,5b^{2/3}. \quad (1.32)$$

A fókusz-távolság növelésével a besugárzás erőssége hatványozottan csökken az alábbi összefüggés szerint:

$$I_{02} = I_{01} \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2. \quad (1.33)$$

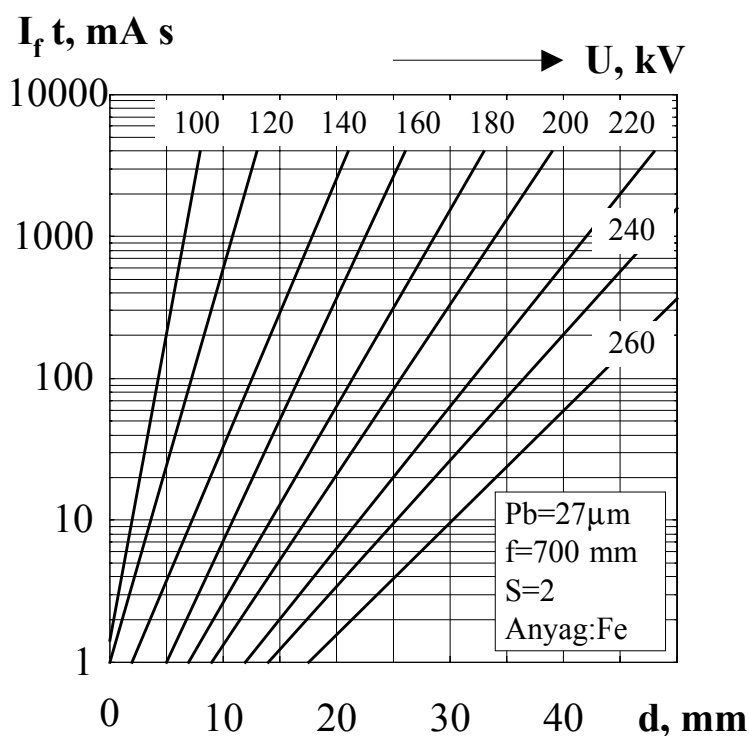
Az átsugározható tárgy szélességének megállapításánál, illetve a szükséges filmhosszúság meghatározásánál ismernünk kell a röntgenberendezések kisugárzási kúpszögét. Ha ez az adat nem áll rendelkezésre, jó közelítéssel alkalmazhatjuk ennek $\alpha = 50^\circ$ -os értékét.

1.2.1.3.5. Az expozíciós idő

A besugárzási expozíciós t idő általában a vizsgálati paraméterek megállapításánál a kiadódó érték. Ügyelni kell arra, hogy az expozíciós idő ne legyen nagyobb 300 - 400 s-nál, ugyanis az idő növekedésével a szórt sugárzás miatt romlik a film képélessége. A fókusz-tárgy távolság növeléséből következő sugár intenzitás csökkenést is az expozíciós idő növelésével lehet kompenzálni. Ezek között az átszámítás az alábbi összefüggéssel végezhető:

$$t_2 = t_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2. \quad (1.34)$$

Az 1-es és a 2-es index itt a két állapot jelzőjeként szerepel. A filmek gyártói a vizsgálati paraméterek komplex megválasztásához expozíciós diagramokat bocsátanak rendelkezésre. Ilyen diagramot mutat a 1.29. ábra.



1.29. ábra

Fe alapú anyagok expozíciós diagramja

1.2.2. Izotópos vizsgálatok.

Az elemek helyét a Mendelejev-féle periódusos rendszerben az atommagjukban lévő protonok száma, a Z rendszám jelöli ki. A magban lévő protonok és a neutronok (N) összegét tömegszámnak nevezzük:

$$A = Z + N. \quad (1.35)$$

Minden atommagot, amelynek azonos a rendszáma, azonos számú elektron vesz körül. Létezik azonban közel 40 olyan elem, amelyek a periódusos rendszerben ugyan azonos helyen helyezkednek el, de különbözőséget mutatnak a magban lévő neutronjaik számában. Ezeket az elemeket izotópoknak nevezzük. Az izotóp elnevezés a görög izosz (azonos) és a toposz (hely) szavak összevonásából adódik; azonos helyűek. A mag neutronjainak száma mesterséges úton is megváltoztatható. Napjainkban a mesterségesen előállított izotópok száma több mint 1000. Ezekre az elemekre az a jellemző, hogy sugárzás kibocsátásával elbomlanak. Ezt a jelenséget radioaktivitásnak nevezzük. Az izotópok által kibocsátott sugárzás a magban keletkezik, ezért szokás ezt a sugárzást magsugárzásnak is nevezni.

A sugárzás elektromágneses hullámok formájában terjed. A hullámhosszúságuk kisebb, mint a röntgensugárzásnál elérhető, ezáltal vastagabb 50 - 400 mm-es méretű szelvények át-sugárzására is alkalmasak.

Az anyagvizsgálati célú izotópok aktivitását általában neutron besugárzással mesterségesen megnövelik az izotópfajtától függően 1000-7500 GBq értékre. Az izotóp aktivítása 1 GBq (giga-becquerel) akkor, ha benne másodpercenként 10^9 magbomlás következik

be. Az ipari gyakorlatban leggyakrabban az $Ir\ 192$ és a $Co\ 60$ izotópokat alkalmazzák. Ezek maximális aktivitása 1000, illetve 3700 GBq .

A radioaktív sugárzás során az instabil mag részecskét bocsát ki a magból. Ezt részecske-sugárzásnak vagy α sugárzásnak nevezzük. Ezzel egyidejűleg elektron-kibocsátás és energia-kisugárzás is történik β és γ sugárzás formájában. Az α és a β sugárzás a közeg molekuláiba ütközve azokat ionizálják, ezáltal kinetikai energiájuk rohamos mértékben csökken. Szilárd anyagban az áthatolóképességük ezért kis mértékű (például az 5 mm -es vastagságú alumínium lemez ezeket teljesen elnyeli). Az izotópos vizsgálatnál is a γ sugárzás a meghatározó, amely lényegében kis hullámhosszúságú, nagy energiájú röntgensugárzásnak is tekinthető.

Az izotópok aktivitása az idő függvényében exponenciálisan csökken:

$$A = A_0 e^{-k \cdot t_b}, \quad (1.36)$$

ahol A az izotóp aktivitása,
 A_0 az izotóp feltöltött állapotbeli kezdeti aktivitása,
 k az izotóp bomlási tényezője és
 t_b a bomlási idő.

A bomlási jellemzőként általában a felezési idő t_f értékét vehetjük alapul, amely idő elteltevel az izotóp aktivitása felére csökken. A $Co\ 60$ izotóp felezési ideje $t_f = 5,25$ év, az $Ir\ 192$ izotópé $t_f = 74$ nap. A (1.36) összefüggés bomlási tényezője a felezési időből az alábbi módon számítható:

$$k = \frac{1}{t_f} \ln 2 = \frac{0,693}{t_f}. \quad (1.37)$$

Ennek a (1.36) összefüggésbe való visszahelyettesítésével a

$$A = A_0 e^{-0,693 \frac{t_b}{t_f}} \quad (1.38)$$

kifejezést kapjuk.

Az izotópos vizsgálat film, expozíciós idő, fókusz-tárgy távolság paramétereit a röntgen vizsgálatnál már megismert módon kell megválasztani. A besugárzás intenzitását alapvetően meghatározó csőfeszültség és fűtőáram helyett itt az izotóp aktivitása a kiinduló alap.

Az izotópok (vizsgálat időpontjában meglévő) aktivitásának meghatározására elemezzük a következő példát.

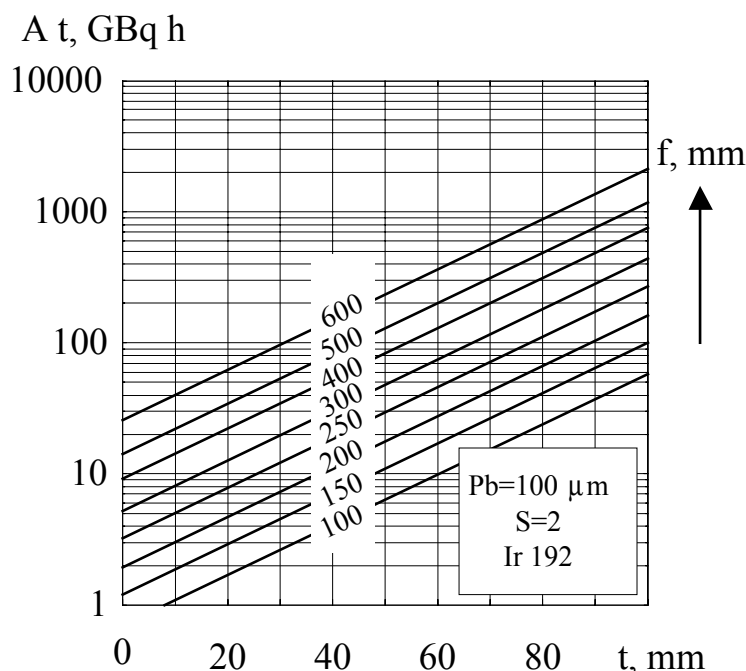
Feladat:

A vizsgálathoz *Ir 192* típusú izotóp áll rendelkezésünkre, melyet $t_b = 20$ nappal ezelőtt töltötték fel $A_0 = 700 \text{ GBq}$ intenzitására. Az izotóp felezési ideje $t_f = 74$ nap. Állapítsuk meg az izotóp jelenlegi aktivitását.

Megoldás:

$$A = A_0 e^{-0,693 \frac{t_b}{t_f}} = 700 e^{-0,693 \frac{20}{74}} = 580 \text{ GBq}. \quad (1.39)$$

A vizsgált paraméterek komplex megválasztását az izotópos vizsgálatnál is a filmek gyártói által szolgáltatott expozíciós diagramok alapján végezhetjük. Ilyen expozíciós diagramot szemléltet a 1.30. ábra.



1.30. ábra
Izotóp expozíciós diagramja

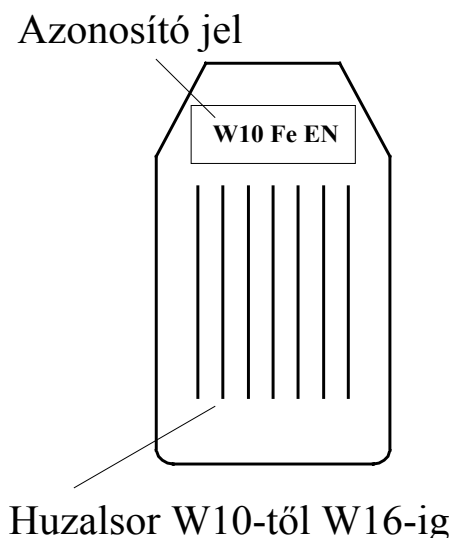
Az izotópos vizsgálat előnyei a röntgenvizsgálat összehasonlításban elsősorban a nagyobb vastagságok átvizsgálhatóságából, az általában kedvezőbb hozzáférhetőségből és a panoráma felvételek készítési lehetőségéből következnek.

Az izotópos vizsgálat kedvezően alkalmazható kisebb méretű öntvények átsugárzására, csővezetékek, tartályok, nyomástartó edények hegesztési varratainak egyidejűleg, egy besugárzással elvégezhető panoráma vizsgálatára.

Hátránya az izotópos vizsgálatoknak viszont az, hogy az állandóan sugárzó izotópnál a sugárzás elleni védelem nagyobb költségű. Az izotóp tárolásánál, szállításánál és a vizsgálat során szigorú óvó-rendszabályokat kell betartani. Továbbá hátrányként kell azt is tekinteni, hogy az azonos anyagvastagságnál készített izotópos felvételek kevésbé kontrasztosak, mint a röntgen felvételek.

1.2.3. A radiológiai vizsgálatok hibakimutathatósága

A vonatkozó szabványok a radiográfiai felvételek minőségét *A* és *B* osztályba sorolják. Általában elegendő az *A* minőségi osztály követelményeinek a teljesítése, a *B* minőségi osztály fokozott követelményeit csak akkor kell érvényesíteni, ha az *A* minőség által biztosítható hibafelismerhetőség a terméknel nem nyújt elegendő információt a megfelelés eldöntéséhez. A radiológiai vizsgálat során a beállított vizsgálati paramétereiktől függően változik a képminőség. A képminőséget ezért képminőség jelzővel (*IQI*) ellenőrizni kell.



1.31. ábra
Huzalsoros képminőségjelző

A képminőség jelző lehet huzalos és lépcsős-furatos kialakítású. Ezek közül leggyakrabban a huzalos képminőség-jelzőket alkalmazzák. A huzalsoros képminőség-jelzőkben műanyag tokban 19 különböző átmérőjű *Fe*, *Al*, *Cu* alapanyagú huzalsorból egymás mellett 7 db, egyre csökkenő átmérőjű huzal található (1.31. ábra). A huzalok átmérője a *W1* - *W19* *IQI* jelű sorozatban, mértani sort követve 3.2 mm-től 0,06 mm-ig csökkenő értékű. Ezt a tokot a vizsgálati tárgyra a filmmel ellentétes oldalon kell helyezni és vele együtt kell átsugározni. A felvételen még látható legkisebb átmérőjű huzal *IQI* jele alapján a szabványokban a vastagság függvényeként előírt értékkel összehasonlítva minősítjük a kép megfelelőségét.

A radiológiai vizsgálatoknál a hiba-felismerhetőség a

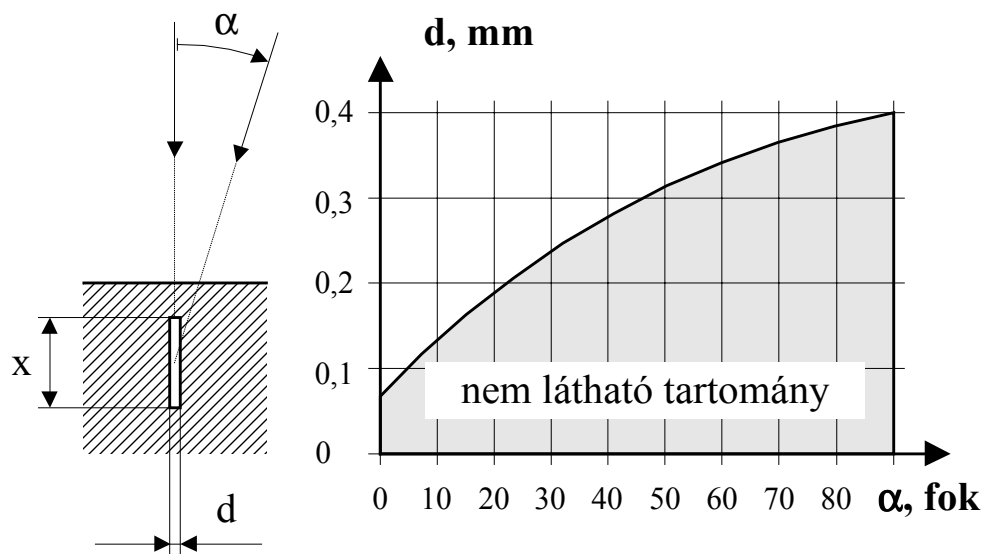
$$HF = \frac{x_{\min}}{t} \cdot 100 \quad \% \quad (1.40)$$

összefüggéssel számítható,

ahol $x_{\min}$ a sugárzás irányába eső kimutatható legkisebb hibaméret és t az átsugárzott vastagság.

A radiológiai vizsgálatoknál elvárható hiba-felismerhetőség 1-2 % értékű. A hiba felismerhetőséget a hiba alakja jelentősen befolyásolhatja. Erre különösen a repedések esetén kell tekintettel lenni. Repedéseknél ha a repedések rés-szélessége kicsi, akkor a hiba kimu-

tatása abban az esetben is gondot jelenthet, ha a sugárzás irányába eső méret nagyobb az $x_{\min}$ értékénél. Ezt szemlélteti a 1.32. ábra.



1.32. ábra
A repedések kimutathatósága

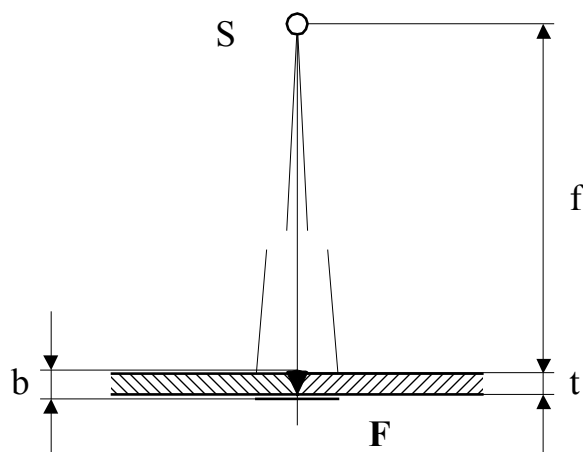
A besugárzási szög növekedésével a sugárzás irányába eső hibaméret az

$$x_1 = \frac{x}{\cos \alpha} \quad (1.41)$$

összefüggés szerint csökken, romlik ezáltal a hiba felismerhetősége is. Elsősorban a film felületi rétegének szemcsézettségével van kapcsolatban, hogy a felismerhetőség a repedés d rés-szélességének is függvénye. A hajszálrepedések rés-szélessége 0,01 mm-nél kisebb értékű is lehet. A 1.32. ábra szerint az ilyen repedések radiológiai vizsgálattal, még kedvező hiba elhelyezkedés esetén sem mutathatók ki.

1.2.4. Vizsgálati elrendezések

A radiológiai vizsgálatok a kis átsugározható vastagságok miatt elsősorban lemez és cső-szerű termékek ellenőrzésére alkalmasak. Ilyen termékeknél leggyakoribb hibaforrásként e termékek hegesztési varratai tekinthetők, következésképpen ezeket a vizsgálatokat az ipari gyakorlatban túlnyomórészt a hegesztési varratok vizsgálatára és minősítésére alkalmazzák. A bemutatásra kerülő vizsgálati elrendezések példáit is e területről választottuk.

**1.33. ábra**

Lemez tompavarratának vizsgálata

A 1.33. ábra sík lemezek hegesztési varratainak vizsgálati elrendezésére mutat példát. A sugárforrás a tárgy előtt, a film az ellenkező oldalon helyezkedik el. A vizsgálati elrendezések ábráin a jelöléseket az alábbi módon alkalmaztuk:

S sugárforrás,

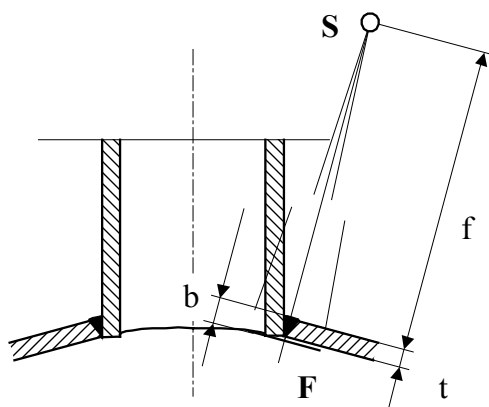
F film,

f sugárforrás - film távolság,

t az anyag névleges vastagsága,

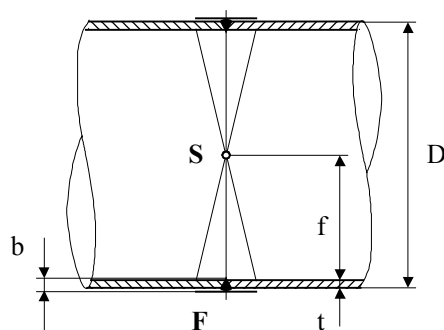
b a tárgy-film távolság.

A 1.34. ábra nyomástartó edények csőcsonkjainál a bekötő merőleges tompavarratok vizsgálatára mutat példát. A sugárforrás kívül helyezkedik el, a filmet a belső felületen rögzítjük.

**1.34. ábra**

Csőcsonk varratának vizsgálata

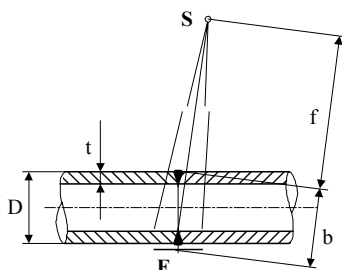
A 1.35. ábra csővezeték körvarratának vizsgálatát mutatja. A vizsgálati elrendezés példa az izotópok panoráma-felvétel készítésére is. A filmet kívül helyezzük fel a varrat egész hosszán. Az izotópot be kell juttatni a cső középvonalába. Egy besugárzással az egész körvarrat megvizsgálható.

**1.35. ábra**

Cső körvarratának panoráma felvétele

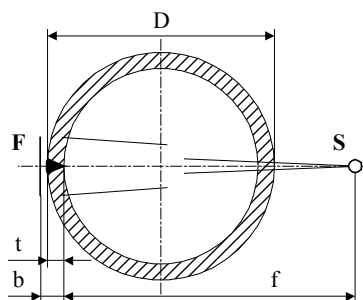
Az izotópos vizsgálatoknál az 5 - 6 mm-es gömbátmérőjű izotóp sugárzási helyre juttatásához speciális készülékeket alkalmazunk. Például bejuttatható ide a sugárzó hajlékony gégecsővön belüli bowdenes megoldással, vagy pneumatikus úton a lezárt végű csőbe kifúvással. Nagyátmérőjű csővezetéknekél használható önjáró szerkezet is a sugárzó helyre juttatáshoz.

Kis átmérőjű csőveknél leggyakrabban az ellipszis technikát alkalmazzák, a 1.36. ábra szerinti elrendezésben. A ferde besugárzásból következően a filmen a varrat képe is ellipszis alakú lesz. Elfogadható képminőség esetén a körvarrat egész hossza értékelhető lesz. A 1.37. ábra csővezeték hosszvarratának vizsgálatára mutat példát.

**1.36. ábra**

Körvarrat vizsgálata ellipszis-technikával

A 1.36. ábra és a 1.37. ábra szerinti elrendezések természetesen csak abban az esetben alkalmazhatók, ha a sugárforrás intenzitása lehetővé teszi a két csőfal átvilágítását

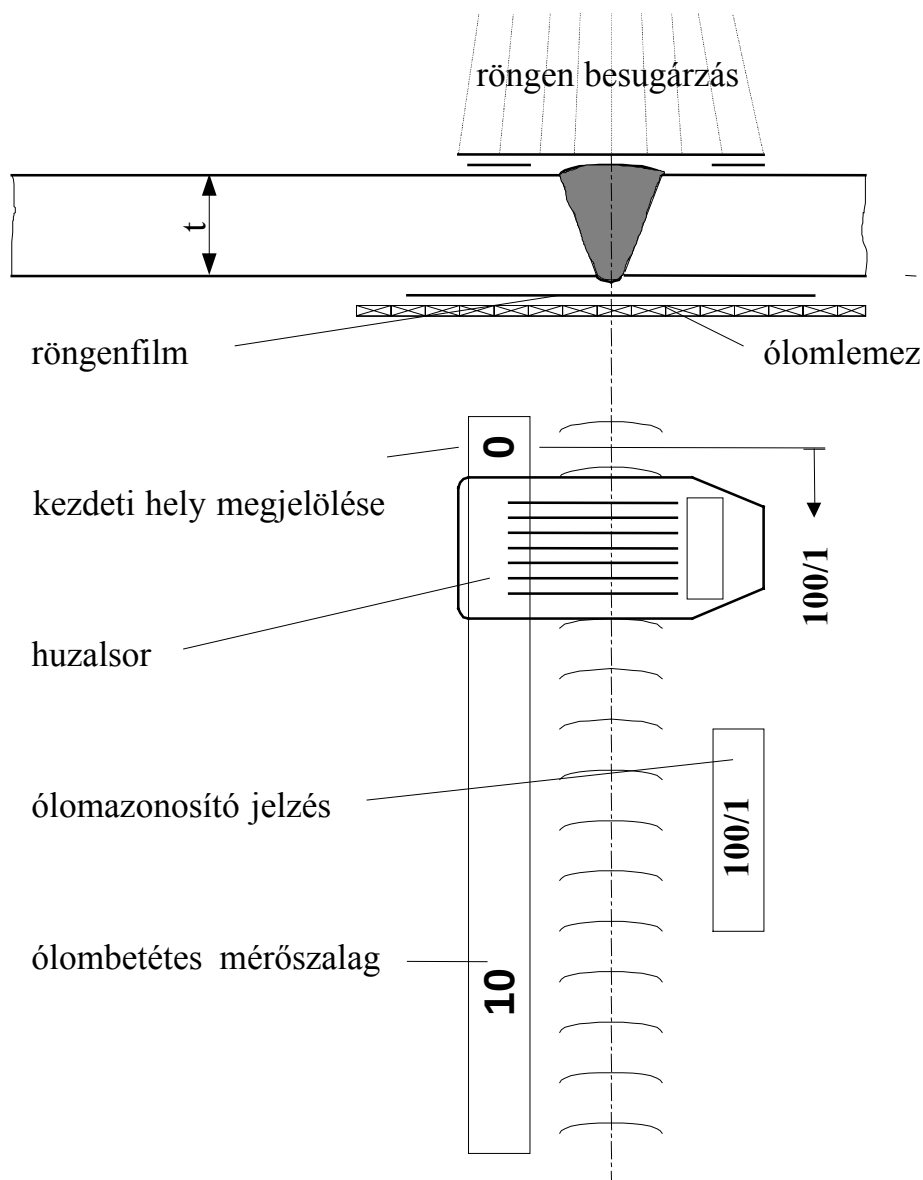
**1.37. ábra**

Cső hosszvarratának vizsgálata kettős-fal átvilágítással

1.2.5. Hegesztési varratok radiológiai minősítése

A vizsgálandó tárgy minden átsugárzott részére ólomszám jelzéseket kell felhelyezni a radiográfiai felvétel azonosítása céljából. Gondoskodni kell a vizsgált terület egyértelmű azonosíthatóságáról. A radiográfiai felvételek helyét a vizsgált tárgyon maradandóan meg kell jelölni. A radiológiai felvételen a hiba helyének megadását segítheti, ha a vizsgált tárgyra ólomszám-betétes mérőszalagot is felhelyezünk.

A 1.38. ábra tompavarratos kötés vizsgálati példáján mutatja be a vizsgálati elrendezést. A varrat sugárzás felőli oldalára fel kell helyezni az *IQI* képminőségjelző ellenőrző huzalsort is.



1.38. ábra

Hegesztési varrat radiológiai vizsgálata

A vizsgálatnál alkalmazott röntgen, vagy izotóp sugárzás súlyosan egészségkárosító lehet, ha az emberi test bármely részét is éri. A vizsgálatok során a sugárvédelmi és a biztonsági előírásokat szigorúan be kell tartani. A vizsgálatok feltételeit és a körülményeit szabványok írják elő.

Ezek közül a legfontosabbak:

az MSZ EN 444 és az MSZ EN 1435 a vizsgálattechnikai kérdésekben,

az MSZ EN 462 szabványsorozat a képminőségre vonatkozóan,

az MSZ EN 584 sorozat a filmek minőségi elvárásait illetően és

az MSZ EN 25580 az átvilágító egységek követelményeivel.

A hegesztési varratok belső folytonossági hiányait és alakeltéréseit a röntgen-filmen annak előhívása és fixálása után a feketedés-különbözőségekből ismerhetjük fel. Azok a folytonossági hiányok és egyéb rendellenességek (összefoglaló néven eltérések), amelyek a sugárzás irányában kisebb sugárelnyelődést idéznek elő, mint a környezetükben az alapanyag a negatív filmen feketébbnek fognak látszani. A varratok minősítésének alapját az így feltárt eltérések típusa, nagysága és a varratmenti gyakorisága képezi. A minősítési szinteket, a megfelelőség kritériumait általában a termékszabványok írják elő. Ennek hiányában MSZ EN 25817 általános előírásait tekinthetjük a minősítés kritériumaként. A hivatkozott szabvány a radiológiai felvételen kimutatott anyagfolytonossági hiányokat és a varratalakzat rendellenességeit eltéréseknek nevezi. Csak azokat az eltéréseket nevezi hibának, amelyek az elfogadhatósági szinten kívül esnek. Az anyagvizsgálatban meghonosodott a leírásunkban alkalmazott értelmezés is. Ezek szerint vannak megengedhető és nem megengedhető varrat-hibák.

1.2.6. A hegesztési varratok hibáinak jelölése

Az MSZ EN 26520 szabvány a hegesztési varratok hibatípusait hat főcsoportba sorolja. Ezeket három számjegyű, 0-ra végződő kóddal jelölik.

A főcsoportok :

100 repedések,

200 üregek,

300 szilárd zárványok,

400 kötési rendellenességek,

500 alaki eltérések és

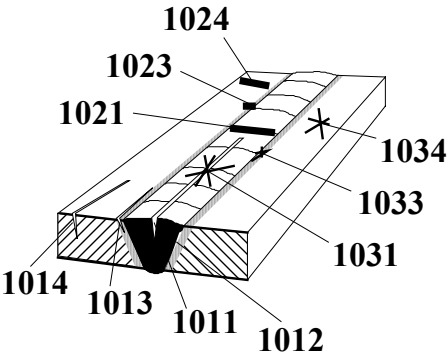
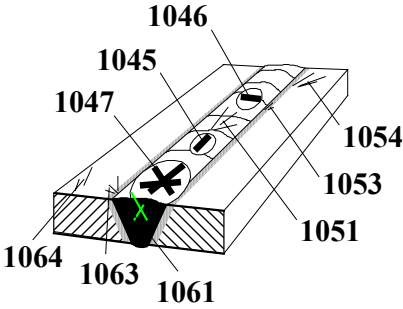
600 egyéb hegesztési rendellenességek.

A főcsoportokon belül három és négyjegyű számokkal jelölik a további hibákat. A kód utal a hegesztési eltérés irányára, alakjára és elhelyezkedésére.

1.2.6.1. Repedések - 100 jelű főcsoport

A repedés rendszerint a felületre is kilépő zezzugos vonalú anyaghiány. Rendszerint abból származik, hogy lehülés közben a zsugorodási feszültségek túllépik a szilárduló ömledék szilárdságát, illetve alakváltozó-képességét. A radiológiai vizsgálatok a repedéseket megbízhatóan nem tudják kimutatni. Ennek magyarázata az, hogyha a sugárzás nem esik egybe a repedés síkjával, akkor a sugárzás irányába eső hibaméret az anyagvastagsághoz képest igen kicsi méretre is lecsökkenhet. Fokozza a nehézséget az is, hogy a repedések általában görbült felületűek. A repedések a legveszélyesebb hibák közé tartoznak (1.1. táblázat).

1.1. táblázat***Repedések – 100-jelű főcsoport***

101 Hosszirányú repedés 1001 mikrorepedés. 1011 a heganyagban, 1012 a beolvadási övezetben, 1013 a hőhatás övezetben, 1014 az alapanyagban.	
102 Keresztirányú repedés 1021 a heganyagban, 1023 a hőhatásövezetben, 1024 az alapanyagban.	103 Sugaras repedés 1031 a heganyagban, 1033 a hőhatásövezetben, 1034 az alapanyagban.
104 Kráterrepedés 1045 hosszirányú, 1046 keresztirányú, 1047 sugaras.	
105 Repedéshalmaz 1051 a heganyagban, 1053 a hőhatásövezetben, 1054 az alapanyagban.	106 Elágazó repedés 1061 a heganyagban, 1063 a hőhatásövezetben, 1064 az alapanyagban.

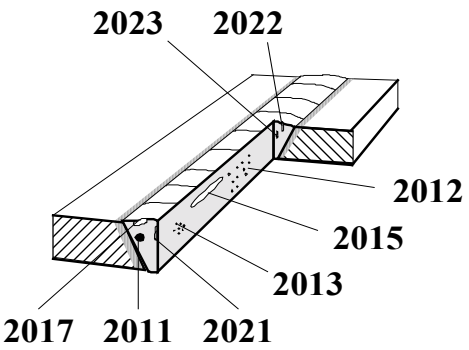
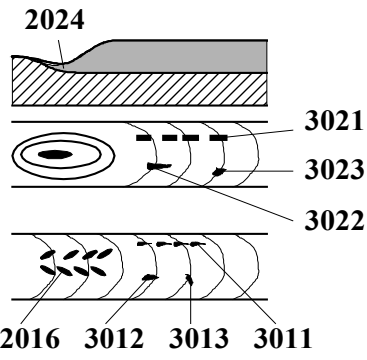
1.2.6.2. Üregek - 200 jelű főcsoport

Ezek leggyakrabban gázzárványok, amelyek a varrat belsejében helyezkednek el, gömb alakúak, vagy elnyújtott tölcészerű üregek. A gázzárványokat a dermedéskor felszabaduló gázok okozzák és abban az esetben jelennek meg a hegesztési varratban, ha a lehülők, dermedő ömledékből nem tudnak a felszínre jutni. Megjelennek akkor is, ha túl gyors a lehülés, ha nagy az elektróda, vagy alapanyag gáztartalma, ha sérült az elektróda bevonata, ha nedves a lemez, vagy az elektróda bevonata. Gyakori hibatípus ez a hegesztési varrat kezdetén és végén a végkráterben. A térfogat jellegű hibánál bármilyen irányból éri a sugárzás mindig elég nagy méretet jelentenek a sugárzás irányában, így biztonsággal kimutathatók. Ezek a hibák

a kevésbé veszélyes hibák közé sorolhatók. Veszélyesek abban az esetben, ha túl nagy a méretük és nagy az előfordulási gyakoriságuk, ugyanis az üregek közötti anyagrészek könnyen felszakadhatnak (1.2. táblázat).

1.2. táblázat

Üregek – 200-jelű főcsoport

201 Gázzárvány 2011 gömb alakú gázzárvány, 2012 egyenletes gázporozitás, 2013 gázzárványhalmaz, 2014 soros gázzárvány, 2015 tömlő alakú gázzárvány, 2016 hernyóalakú gázzárvány, 2017 felületi pórus.	
202 Fogyási üreg 2021 dendritközi fogyási üreg, 2022 mikroszkopikus üreg, 2023 dentritközi mikroüreg, 2024 kráter.	

1.2.6.3. Szilárd zárványok - 300 jelű főcsoport

Ezek szabálytalan alakú, sokszor éles sarkokkal határolt foltok, vagy csíkok formájában elhelyezkedő üregek, amelyeket nemfémes anyag tölt ki. A felszabaduló gáz a vas, vagy a benne lévő szennyezőkkel nemfémes vegyületet alkot (pl. Fe_2O_3 , FeO , MnO , SiO_2 , stb.) és gyorsabban dermedve nem tudnak az ömledékből kiszabadulni. Sokszor okoz salakzárványt az, hogy többretegű hegesztésnél a két réteg lerakása között nem megfelelő a salak letisztítása. Fokozzák a salak zárványok keletkezésének valószínűségét a rozsdás lemezszélek is. A radiológiai felvételeken a salakzárványok szabálytalan alakú foltok, vagy elnyúlt csíkok formájában jelennek meg. Minthogy a salakzárványok nem alakíthatók ritkán jelentkeznek ellapult formában ennek megfelelően sugárzás irányában nagy a méretük, ami miatt jól ki-mutathatók. A gázzárványoktól veszélyesebbek, de kevésbé veszélyesek mint a felületszerű hibák. A hibák jelölési rendszerét a 1.3. táblázat mutatja be.

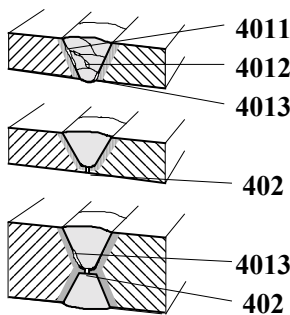
1.3. táblázat Szilárd zárványok – 300-jelű főcsoport

301 Salakzárvány 3011 soros, 3012 különálló, 3013 egyéb salakzárvány.	302 Folyasztószer zárvány 3021 soros, 3022 különálló, 3023 egyéb alakú zárványok.
303 Oxidzárvány 3031 oxidhártya.	304 Fémzárvány 3041 volfrám, 3042 réz, 3043 egyéb fém.

1.2.6.4. Kötési hibák - 400 jelű főcsoport

A kötési hibák az ömledék és a hegesztésre előkészített lemezek hiányos összeolvasztásából erednek. Sokszor hegesztés közben a lemezszélek érintkezésig összehúzódnak, ilyenkor az anyaghiány éles vékony bemetszést eredményez. A kötési hibák oka, az alapanyag nem kellő gonddal végzett megömlesztése. Majdnem biztosan összeolvadási hibához vezet az is, ha a lemezszélek teljesen összeérnek, vagy túl nagy a hézag közöttük, esetleg eltolódás van az összehegesztendő lemezek között. Csöveknél gyakori hibaok a csővégek átmérőjének különbözősége, a csövek ovalitása és az éleltolódás. A kötési hibák a felvételen a környezettől élesen elhatárolható egyenes vonalú csíkok formájában jelentkeznek. E hibák éles bemetszést jelentenek, tehát feszültséggyűjtő helyként viselkednek. A repedésekhez hasonlóan ezek is a veszélyes hibák közé tartoznak. A hibák előfordulási helyeit és a jelölésüket a 1.4. táblázat mutatja be.

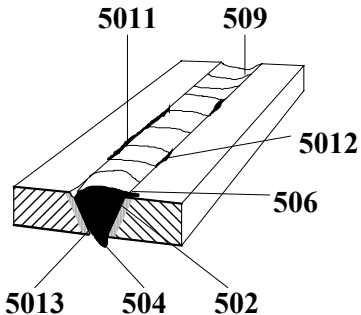
1.4. táblázat Kötési hibák – 400-jelű főcsoport

401 Összeolvadási hiba 4011 a varrat oldalán, 4012 a varratsorok között, 4013 a gyökben. 402 Átolvadási hiba	
--	--

1.2.6.5. Alakhibák - 500 jelű főcsoport

Ezek a hibák általában a varrat-előkészítéssel, a hegesztő gyakorlatlanságával és a hegesztés-technológiai paraméterek be nem tartásával hozhatók kapcsolatba. A varrat kezdő helyei és a befejezések a hibák előfordulásának fokozott veszélyét hordozzák. A hibák előfordulási helyeit és a számkódos jelölésüket a 1.5. táblázat mutatja be.

1.5. táblázat**Alakhibák – 500-jelű főcsoport**

501 Szélkiolvadás 5011 folyamatos szélkiolvadás, 5012 szakaszos szélkiolvadás, 5013 gyökoldali szélkiolvadás.	
502 Túlzott varratdudor 503 Túlzott varratdomborúság 504 Gyökátfolyás 5041 helyi gyökátfolyás.	505 A koronaátmenet szöghibája 506 Hideg ráfolyás 507 Éleltolódás 508 Szögeltérés
509 Túlzott megömlés 5091 koronaoldali eltolódás, 5092 koronaoldali homorúság, 5093 sarokvarrat-terülés, 5094 átlapolt kötés élleolvadás 510 Átlyukadás 511 Vastagsághiány	512 Sarokvarrat szimmetria-eltérés 513 Egyenetlen varratszélesség 514 Egyenetlen varratfelület 515 Gyökoldali behúzódás 516 Gyökporozitás 517 Újrakezdési hiba

1.2.6.6. Egyéb hibák - 600 jelű főcsoport

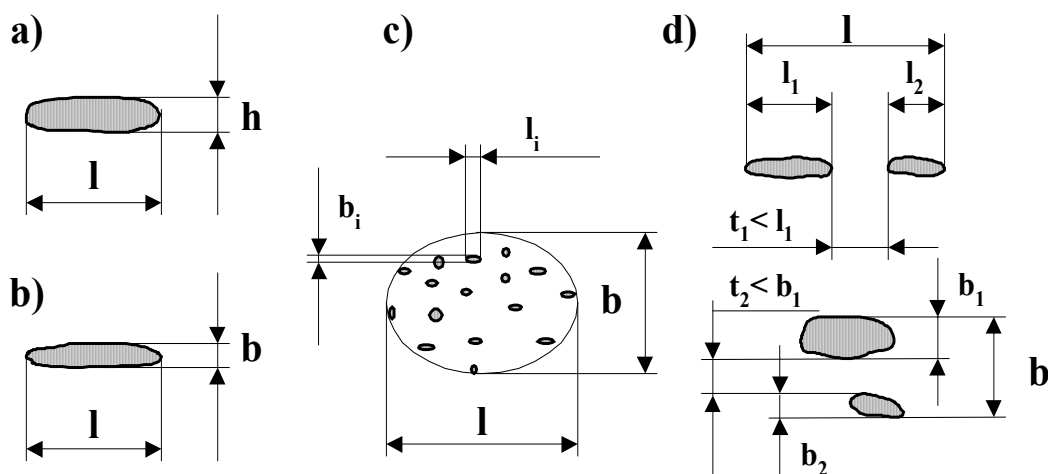
Ebbe a kategóriába tartozó hibák általában a gondatlan munkavégzésből származnak (1.6. táblázat).

1.6. táblázat**Egyéb hibák – 500-jelű főcsoport**

601 Ívgyújtási nyom 602 Fröcskölés 6021 volfrámfröcskölés. 603 Leszakítási nyom	604 Kösörülési nyom 605 Vésési nyom 606 Alákösörülés
--	--

1.2.7. A varrathibák mérete és gyakorisága

A varrathibák veszélyességük alapján négy csoportba sorolhatók. A következő pontokban értelmezzük a csoportba tartozó hibák jellemző méreteit, megadjuk a gyakoriságjelző mérőszámuk számításának módját és ismertetjük a hibák jelölésének formáit. A különböző hibatípusukat a 1.39. ábra szemlélteti. Közelállónak kell tekinteni a hibákat akkor, ha a közöttük lévő távolság kisebb, mint a nagyobbik hiba mérete. A közelálló hibák jellemző hibaméretként a 1.39. ábra d) részlete szerinti befoglaló méretet kell megadni.



1.39. ábra
A varrathibák jellemző méretei

1.2.7.1. Síkszerű hibák

E csoportba tartozó hibák kódszámai: 100, 401, 402, 5011 és 5012.

A hiba jelölése: *kód* – *lxh*, vagy *kód* – *l*, (1.42)

ahol *l* a hiba hossza mm-ben és

h a hiba mélysége mm-ben a 1.39. ábra a) részlete szerint.

Példa: az 5011 - 30x0,5 hibajel 30 mm hosszúságú, 0,5 mm mélységű, éles bemetszésű szélkiolvadást jelöl.

1.2.7.2. Gömbszerű térfogatjellegű hiba

Ide sorolhatók az alábbi hibák: 2011, 2012, 2014, 2017, 3011, 3012, 3013, 3021, 3022, 3023 és 304.

A hiba jelölése: *kód* – *l*; *S_v*, vagy *kód* – *l*, (1.43)

ahol *l* a hiba hossza mm-ben a 1.39. ábra b) részlete szerint és

S_v a hiba előfordulási gyakoriságát jelző relatív hibaterület %-ban.

$$S_v = \frac{\sum_{i=1}^k l_i \cdot b_i}{2 \cdot t \cdot B} \cdot 100, \quad (1.44)$$

ahol l_i és b_i a viszonyítási alapul szolgáló területen belüli hibák méretei,
 t a hegesztési varrat magassága és
 B a varrat szélessége.

Példa: a 2011 - 2;3 hibajel 2 mm jellemző méretű, 3 % relatív hibaterületű, gömbalakú gázzárványra utal.

1.2.7.3. Nyújtott térfogatjellegű hibák

Ide sorolhatók az alábbi hibák: 2014, 2015, 2016, 2021, 2024, 301, 5013, 5014, 504, 511 és 515.

A hiba jelölése: *kód* – *lxb*, vagy *kód* – *lhx*, (1.45)

ahol l a hiba hossza,
 b a hiba szélessége és
 h a hiba mélysége.

Példa: az 5013 - 25x1 hibajel a 25 mm hosszúságú, 1 mm mélységű gyökoldali szél-kiolvadásra utal.

1.2.7.4. Gázzárványhalmaz

E csoportba a 2013 kódszámú hiba tartozik.

A hiba jelölése: *kód* – *l;S_v*, vagy *kód* – *l*, (1.46)

ahol l a gázzárványt határoló ellipszis hossza (1.39. ábra c) részlet) és
 S_v a hiba előfordulási gyakoriságát jelző relatív hibaterület %-ban.

A relatív hibaterület az alábbiak szerint számítható:

$$S_v = \frac{\sum_{i=1}^k l_i \cdot b_i}{l \cdot b}, \quad (1.47)$$

ahol b a gázzárványt határoló ellipszis szélessége mm-ben,
 l_i és b_i a gázzárványhalmaz egyes elemeinek méretei.

Példa: a 2013 - 8;10 hibajel a 8 mm-es hosszúságú ellipszissel határolható gázzárványhalmazra utal, amelynek relatív hibaterülete 10 %.

1.3. TOVÁBBI RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Az ipari technológiák fejlődése, a minőségi igények növekedése, az új korszerű méretezési eljárások bevezetése, a szerkezetek terhelhetőségével szemben támasztott fokozott igények szükségessé teszik a minőségi és a biztonsági követelmények állandó szigorítását is. Ezzel párhuzamosan egyre fontosabbá válnak az anyagvizsgálatok minősítő és ellenőrző funkciói. Növekvő igény mutatkozik az anyagvizsgálati módszerek szélesebb körű alkalmazására az alapanyagokat beszállítók ellenőrzése céljából, a gyártási folyamatok szabályozásához szükséges információkat nyújtó vizsgálatoknál, a gyártmány minősítő vizsgálatainál és az üzemelő szerkezetek diagnosztikai ellenőrzéseinél.

A roncsolásmentes vizsgálatok legnagyobb előnye az, hogy a termék, vagy szerkezet károsítása nélkül is eleget tud tenni ezeknek az elvárásoknak. Nélkülözhetetlen módszerek ezek a 100 %-os vizsgálati terjedelmű minősítő vizsgálatoknál és az üzemközi diagnosztikai ellenőrzések során. A hiba feltárását szolgáló roncsolásmentes vizsgálatok kiválasztásánál elsődleges szempontként az eljárás hibakimutathatóságát és a hibakimutatás reprodukálhatóságát kell tekinteni.

A hibakimutatást szolgáló roncsolásmentes vizsgálati módszerek közül az ipari gyakorlatban a radiológiai és az ultrahangos módszerek a legelterjedtebbek. A kitüntetett szerepük miatt ezekkel külön-külön fejezetben, részletesen foglalkozunk. A jegyzet terjedelmi korlátjai nem teszik lehetővé a roncsolásmentes vizsgálatok további módszereinek a két kiemelt vizsgálatához hasonló mélységű elemzését. A vizsgálati elvek, módszerek, alkalmazási célok és alkalmazási területek ismertetésével csupán a vizsgálatok alapismereteit tudjuk bemutatni. A további részleteket illetően irodalmi forrásokra utalunk.

E fejezetben a vizuális vizsgálatok szemrevételező, optikai és endoszkópos lehetőségeit, a felületi állapot ellenőrzésének penetráló-folyadékos módszereit, a mágneses és az örvényáramos vizsgálati elveket, továbbá az akusztikus emisszió hibafeltárást szolgáló vizsgálatait mutatjuk be.

1.3.1. Vizuális vizsgálatok

A vizuális megfigyeléssel felfedezhető felületi makro-hibák típusai meghatározó módon függenek a gyártmánytól, annak anyagától és a gyártás technológiájától, valamint a gyártmány üzemeltetési körülményeitől. Termékszabványok és az üzemeltetés szerkezet-

vizsgálati szabványai írják elő az elvégzendő vizsgálatok módját, és terjedelmét, ezen belül a vizuális vizsgálatokkal ellenőrzendő hibák típusait, ezek előfordulása esetén azok elfogadhatósági szintjét. A következőkben a hengerelt lemezek, rudak és idomacélok, valamint a hegesztett szerkezetek leggyakoribb felületi hibáinak bemutatásával példákat kívánunk bemutatni a vizuális vizsgálatok sokrétű alkalmazhatóságára is.

1.3.1.1. Acélszerkezetek felületi hibái

A hengerelt termékeknél általában a hengerek kopása, deformációja, a hengerelt anyag inhomogenitása, a rosszul megválasztott alak- és méret-paraméterek, továbbá az alakítás-technológia be nem tartása okozza a hibát. A hegesztett szerkezetek gyártási eredetű hibái az alap- és hozaganyag nem megfelelő minőségével, a rosszul választott kötésmóddal és a technológiai paraméterek rossz megválasztásával hozhatók kapcsolatba. A hegesztett kötések szakszerű vizuális vizsgálatához az anyag- és a hegesztési technológiai ismeretek komplex alkalmazása elengedhetetlenül szükséges.

A lemezek, rudak, idomacélok leggyakoribb hibái a szelvényhibák (pl. hiányos, túltöltött, eltolódott, ék alakú, lencsés, vagy ferde szelvényeknél), a hullámosság, a teknősség, az ívelttség, a kardosság, a görbeség, az elcsavarodás, a torzult vég, a rakodási mechanikai sérülések, a szakadások, leszakadások, az égett felület, a márványosság, a pikkely, a repedések, a gödrösség, a dudorok, a ráhengerlések, revék, behengerlések, a hengerlési karc, a hidegberágódások és a rozsdá.

A hegesztett szerkezetek leggyakoribb felületi hibái alatt a varratszélesség eltéréseket, a varratok alakhibáit, a varrat kiolvadásait, a gyökoldali szélkiolvadásokat, a túlzott varratdudort, a gyökátfolyásokat, a korona-átmenet szöghibáit, a hideg ráfolyásokat, az éleltolódásokat, a kötés szögeltéréseit, a túlzott megömléseket, az átllyukadásokat, a vastagsághiányt, a szimmetria eltéréseket, az egyenetlen varratszélességet, egyenetlen varratfelületet, a homorú varratgyököt, a gyökporozításokat, az újrakezdési hibákat, a felületi pórusokat, krátereket, a gyökoldali összeolvadási hibákat, az átolvadási hibákat és a repedéseket tarjuk számon.

1.3.1.2. Vizuális vizsgálat szemrevételezéssel

A vizuális vizsgálat a gyártott szerkezeti elem, szerkezet megfelelőségének a megítélésénél éppúgy elengedhetetlen és fontos módszer, mint az üzemeltetés utáni állapotfelmérésénél, illetve az esetleges meghibásodások elemzésénél. A vizuális vizsgálatok számos információt nyújtanak a vizsgált tárgy felületének épségéről, vagy esetleges sérüléseiről, amelyek származhatnak a helytelen gyártástechnológiából, de lehetnek szállítási, vagy tárolási eredetűek, illetve az üzemeltetés következményei. A szemrevételezéssel feltárható hibák nagysága az emberi szem felbontóképességétől függ. Általános szabály, hogy tartós megfigyelés során az átlagos emberi szem 0,1 mm-nél nagyobb méretű hibák felismerésére képes.

A felületek megfigyelése számos gyártási eredetű (hegesztési, kovácsolási, hőkezelési stb.) hiba, időben, még a nagyobb kár bekövetkezése előtti felismerését teszi lehetővé. Az üzemelés közben végzett vizsgálatok ezeken túlmenően feltárhatják az üzemeltetésből származó kopási, eróziós, korróziós és alakváltozási károsodásokat, a kezdődő repedéseket. Az

üzemelő szerkezetek állapot-felmérő szemrevételező vizsgálatai jelenthetik az alapot a további, legcélravezetőbb roncsolásmentes vizsgálati eljárási módok kijelölésében, azok vizsgálati terjedelmének meghatározásában is. A vizuális vizsgálatok fontosságának bizonyítására álljon itt a következő statisztika. Káresetek elemzéséből megállapították, hogy amennyiben a károsodás előtt az adott szerkezetnél szemrevételezést tartottak volna, az esetek 60 %-ában a hiba e módszerrel is felismerhető lett volna; ezáltal további súlyos károsodásokat, baleseteket lehetett volna így elkerülni.

A vizuális megfigyelésekhez a vizsgálati tárgy felületét elő kell készíteni. Általános alapelv az, hogy csak a várható hibák felismeréséhez minimálisan szükséges előkészítéseket kell alkalmazni. A túlzott mértékű beavatkozások befolyásolhatják a hibák, repedések felismerését, a felület elkenésével eltűnhetnek a kisebb hibák és a gyártmány szempontjából a hibák okaira utaló számos információ.

1.3.2. Optikai és endoszkópos módszerek

Amennyiben a vizsgált tárgy kisebb részleteinek megfigyelésére a szemünk felbontóképessége már nem elegendő, igénybe vehetjük az optikai nagyítás lehetőségét is. A 2-10-szeres nagyítású egyszerű optikai nagyítókát lupéknak nevezzük. A hiba azonosításánál általában elvárás, hogy a felületek kiemelkedő, bemélyedő részleteiről térbeli képet kapjunk, ilyenkor a biokuláris nagyítókát célszerű alkalmazni. A binokuláris nagyítók, a hibák térbeli alakját tökéletesen visszaadják és további előnyük, hogy egyidejűleg mindkét szemünkkel látjuk a hibát.

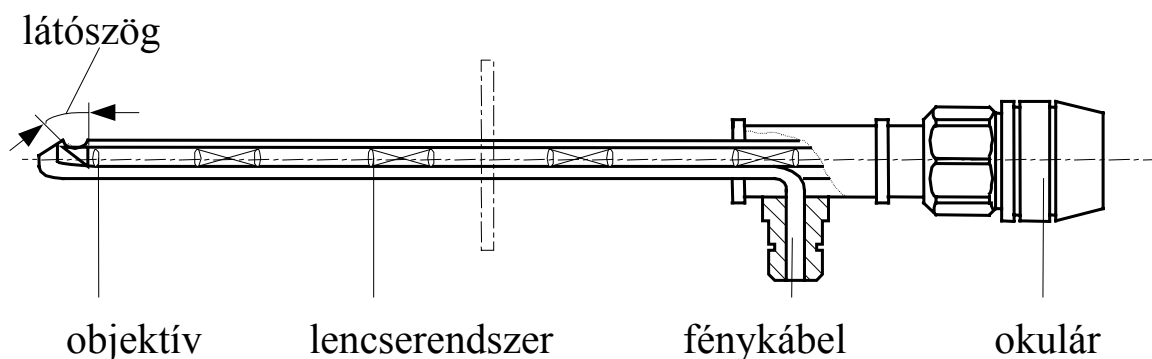
A nagyobb nagyításokhoz, mikroszkópokat kell használni. Ezekkel 50-1000-szeres nagyítás is megvalósítható. Az optikai elvekre épülő fénymikroszkópok számos típusát helyszíni roncsolásmentes vizsgálatok céljaira fejlesztették ki; ezek közül elsősorban a visszavert fényben vizsgáló fémmikroszkópokat alkalmazzák a legszélesebb körben. Több változatuk is használatos a hibafeltáró vizsgálatoknál, úgymint a sztereo-, polarizációs-, fluoreszcencia- és a fáziskontraszt mikroszkópok. A speciális változatok a hibaanalizálást könnyítik meg számunkra.

A mikroszkópokat a roncsolásmentes vizsgálatban lényegében a felületi hibák azonosítására alkalmazzák. Ezeket általában hordozható kivitelben készítik. A vizsgáló készletben a felület előkészítéséhez szükséges kézi szerszámok éppúgy megtalálhatók, mint a dokumentálás segédeszközei (pl. mikroszkópra szerelhető fényképezőgépek, speciális nyomtatók, stb. formájában).

Gyakori anyagvizsgálati feladat, üreges testek, csővezetékek, tárolótartályok, nyomástartó-edények üregeinek vizsgálata. Ha a méretek nem teszik lehetővé a közvetlen hozzáférést, tükröket, szögtükröket, endoszkópokat, videoszóópokat, televíziós kamerákat kell segédeszközként alkalmazni.

Az endoszkópok egyaránt készülhetnek merev és hajlékony szárral. Merev szár kialakításnál a tárgyról visszaverődő fényt prizma fogja fel, és továbbítja az objektív lencse felé (1.40. ábra). Az okulárhoz a fénysugarat lencserendszerek közvetítik. Üvegszál-optikák alkalmazásával a vizsgálószár hajlékonnyá tehető, a kvarcüvegszálakból álló szár többméter hosszúságban is gyártható. Az üvegszálakban a bevezetett és a visszavert fény szinte veszteség nélkül vesz részt a képalkotásban. Szokásos elnevezés ezeknél a hajlékony üregvizsgáló-

lónál, a fiberszkóp elnevezés is. A műszer markolatán található az okulár élességállítója, valamint a vizsgálószár mozgását vezérlő karok. Ezekkel a vizsgálószár végét két egymásra merőleges irányba lehet mozgatni. Az endoszkópoknál is adott a dokumentálási lehetőség, fényképezőgép, vagy videokazetta segítségével.



1.40. ábra
Merevszárú endoszkóp

Az endoszkópoknál a vizsgálószár hosszúsága 5 m alatti. Ennél hosszabb üregek, például vékony csövek távolabbi pontjainak vizsgálatára az endoszkópok ezért nem alkalmasak.



1.41. ábra
XL Pro videoszkóp (Forrás: Testor CD Infotár)

Ilyenkor a videoszkópok, vagy chip-kamerák alkalmazhatók. Ezek a készülékek akár 30 méterig is használhatók. Bennük az üvegszál-nyaláb csak a megvilágító fény továbbítására szolgál, a képinformációt a video-kamera továbbítja. A külső monitor képét lehet nagyítani,

elfordítani és természetesen rögzíteni is. Ilyen módon e vizsgálati módszer kedvező lehetőséget nyújt a későbbi továbbfelelmzésekhez is.

A 1.41. ábrán *Everest* gyártmányú, hordozható, videoszkóp fényképe látható, amely a legkorszerűbb integrált file kezelő rendszerrel, közvetlen számítógépes képkezelési lehetőségekkel is rendelkezik.

1.3.3. Festékdifúziós vizsgálatok

A festékdifúziós vizsgálatok, vagy más néven a penetrációs vizsgálatok is a legrégebben alkalmazott roncsolásmentes vizsgálatok közé tartoznak. Durva felületi repedéseket ki lehetett mutatni úgy is, hogy a felületet először beolajozták, majd szárazra törölésük után kréta-porral megszórták. A repedéseknél a kiszivárgó olaj, a kréta-porot megnedvesítette, sárgára színezte. A fejlesztések eredményeként, más behatoló és jelző folyadékokkal a felületi repedések kimutatásának megbízhatóbb módszereit fejlesztették ki. A módszer előnye elsősorban az, hogy a nem mágnesezhető anyagokra is használható, olcsó, és bárhol, így a helyszíni vizsgálatoknál is egyszerűen alkalmazható.

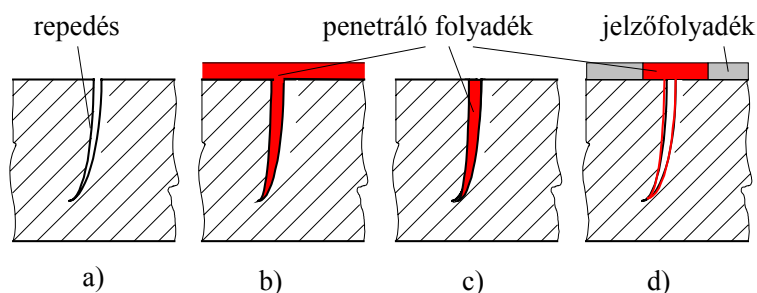
1.3.3.1. A penetrálóvizsgálat elve

A vizsgálat fizikai alapja a folyadékok kapilláris hatása, a hajszálcsővesség jelensége. A felületre felvitt folyadék a kapilláris hatás alapján a felület anyagfolytonossági hibáiba (pl. repedésekbe) be tud hatolni. Ha eltávolítjuk a felületről a folyadékot, a résből a folyadék a felszínre szivárog, amely megfelelő „előhívó” jelzőfolyadék alkalmazásával jól megfigyelhetővé válik. A „nedvesítő” tulajdonságú folyadékokba merített kapilláris csőben (hajszálcsőben) a folyadékszint megemelkedik. Az emelkedés mértéke:

$$h = \frac{2 \cdot \gamma}{\rho \cdot r \cdot g}, \quad (1.48)$$

ahol γ a folyadék felületi feszültsége,
 ρ a folyadék sűrűsége,
 r a kapilláris cső sugara és
 g a nehézségi gyorsulás.

A penetrációs vizsgálatokhoz használt jelzőfolyadékok, jelzésérzékenysége nagyrészt a kapilláris aktivitásuktól és a viszkozitásuktól függ. Jelzőfolyadékként vagy színezett, vagy



1.42. ábra

A penetrálóvizsgálat fázisai a) tisztítás, b) penetrálás, c) letörlés, d) előhívás

fluoreszkáló folyadékot alkalmaznak.

A színezett jelzőfolyadék két részből áll; a folyékony oldóanyagból és a hozzákevert festék anyagából. Oldóanyagként ezeknél általában tetralint, vagy xilolt alkalmaznak, színezőként leggyakrabban szudánvörös festéket. A fluoreszkáló folyadék általában ásványolaj származék, amelybe ultraibolya sugárzásban fluoreszkáló port kevernek. A penetráló folyadékos vizsgálatok jelzésérzékenységét fokozhatjuk azzal is, ha az indikációhoz nagy szívóhatású kontraszt anyagot alkalmazunk, amely a behatolt folyadékot a felületre hozza, ezáltal a kiszivárgást gyorsítja (1.42. ábra).

1.3.3.2. A penetráló-folyadékos vizsgálat fázisai

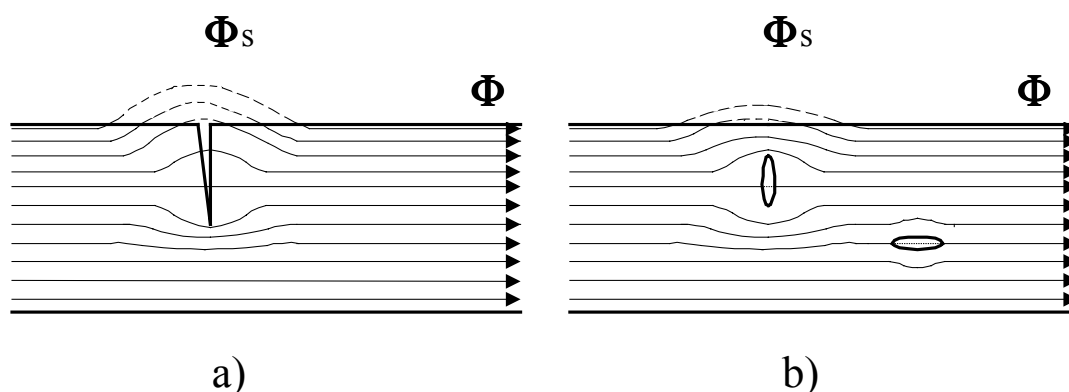
A penetráló-folyadékos vizsgálat az alábbi fázisokat tartalmazza.

- A felült tisztítása, zsírtalanítása.
- A jelzőfolyadék felületre vitele, megfelelő időt biztosítva ahhoz, hogy a felületi anyagfolytonossági hibába beszívódhasson (általában 1000-2000 s).
- A felületről a folyadék eltávolítás gyorsan párologó oldószerrel. Vigyázni kell arra, hogy ez ne oldja ki a beszívódott jelzőfolyadékot.
- Előhívóval a beszívódott folyadék felületre hozatala. Az előhívó általában fehér színű. A színezett jelzőfolyadék ezt a hibáknál megfesti, fluoreszkáló folyadékoknál pedig átnedvesíti.
- Színezett folyadék alkalmazása esetén az értékelés szabad szemmel azonnal elvégezhető, ha fluoreszkáló anyagot alkalmazunk, akkor a hiba környékét ultraibolya sugárzással kell megvilágítani. A vizsgálati fázisokat a 1.42. ábra szemlélteti.

A folyadékbehatolós eljárás kiválóan alkalmas felületi repedések, porozitások, gyűrődések, hegesztési kötéshibák kimutatására. Alkalmazhatósága nem kötődik a vizsgálati anyag minőségéhez, acél, színes- és könnyűfémek, üvegek, kerámiák egyaránt jól vizsgálhatók e módszerrel. A feltétel csupán az, hogy a folytonossági hiba a felületre kiérjen, és ott nyitott legyen.

1.3.4. A roncsolásmentes vizsgálat mágneses módszerei

A felületi, felület közeli anyagfolytonossági hibák kimutatására ferromágneses anyagoknál a legelterjedtebb módszer a mágnesporos vizsgálat. A vizsgálat elvi alapját az képezi, hogy a ferromágneses anyagokon átmenő mágneses fluxust (a permeabilitás hirtelen változása miatt) az útjukba eső anyagfolytonossági hibák eltérítik. Ha ez a hiba a felületen, vagy annak közelében helyezkedik el, a mágneses fluxus a levegőben záródik. Ha finom ferromágneses részecskéket tartalmazó szuszpenziót juttatunk a felületre, a mágneses mező a nagy mágneses ellenállású levegő helyett e részecskéken keresztül záródik. A hiba kimutatásának alapvető feltétele az, hogy a folytonossági hiba legyen merőleges a bevezetett mágneses mezőre. A vizsgált tárgy felületére felvitt mágnesport, a mágneses erővonalak összegyűjtik, ezáltal a hiba láthatóvá válik. A vizsgálat elvét a 1.43. ábra szemlélteti.

**1.43. ábra**

A mágneses vizsgálatnál a levegőbe kitérő Φ_s szórt fluxusok
a) felületi repedés, b) felületközeli belső hiba

1.3.4.1. A ferromágneses anyagok sajátosságai

Ha egy rudat helyezünk az árammal átjárt tekercs belsejébe, a rúdon belül a mágneses erővonalak száma megváltozik az üres belsejű tekercs állapotához képest. Azt a számot, amely meghatározza az erővonalak számában bekövetkező változást, permeabilitásnak nevezzük, és μ -vel jelöljük. A permeabilitás a légüres tér μ_0 permeabilitásával az alábbi kapcsolatban áll:

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (1.49)$$

ahol μ_r a relatív permeabilitás.

A relatív permeabilitás alapján az anyagokat három fő csoportba sorolhatjuk.

diamágneses anyagok: $\mu_r < 1$,

paramágneses anyagok: $\mu_r = 1-2$ és

ferromágneses anyagok: $\mu_r \gg 1$.

A mágneses vizsgálat csak ferromágneses anyagokon alkalmazható. Ilyenek például a vasalapú ötvözetek (az acélok és az öntöttvasak), a nikkel, a króm, a kobalt és a mangán. Hátránya a vizsgálatnak, hogy a diamágneses anyagok (pl. a réz és az üveg), valamint a paramágneses anyagok (pl. az alumínium, a platina és az ausztenites acélok) e módszerrel nem vizsgálhatók. A vizsgálat során a vizsgált szerkezetben mágneses erővonalakat kell előidézni. Ez megvalósítható úgy is, hogy a mágneses erővonalakat először elektromágnesben állítjuk elő (lágy vasmagú tekercsben) és azt vezetjük be a tárgyba, de a mágneses erővonalak közvetlenül a tárgyban is kialakíthatók, ha abba áramot vezetünk.

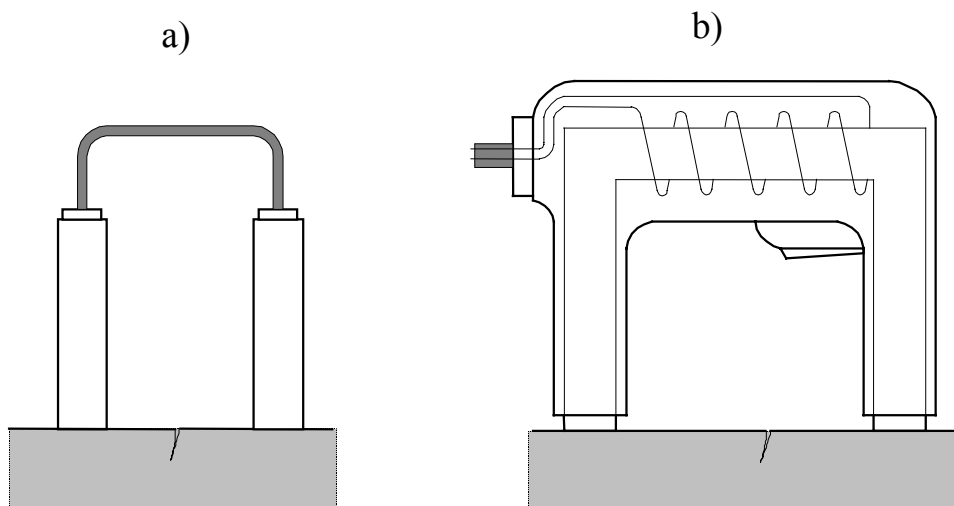
1.3.4.2. A mágneses vizsgálat módszerei

Az alkalmazott megoldástól függően, a vizsgálatok két fő csoportját, a sarokmágnesezési és az árambevezetési módszereket különíthetjük el.

1.3.4.2.1. Vizsgálat sarokmágnesezéssel

A sarokmágnesezési eljárásnál alkalmazhatunk állandó mágnesset, vagy elektromágnesset, az árambevezetésnél számításba vehető az egyen- és a váltóáram alkalmazása egyaránt. A következőkben néhány példa kapcsán vizsgáljuk meg e módszerek alkalmazhatóságát.

Lemezeknek és azok hegesztési varratainak ellenőrzésére járommágneseket alkalmazunk.



1.44. ábra

Vizsgálat sarokmágnesezéssel a) állandó mágnessel, b) járommágnessel

Az állandó mágnesszek alkalmazásának legfontosabb előnye az, hogy ezeknél nincs szükség külön áramforrásra, egyszerűek, a nehezen hozzáférhető helyeken is használhatók. Használatuk robbanásveszélyes tartályokban is megengedhető, mert a vizsgálat során nincs szikraadás.

A 1.44. ábra a) részlete szerinti megoldásnál a két mágnessrudat hajlékony acélkábel köti össze. A b) ábrarészlet szerinti elektromágnesszeknél használhatunk egyen és váltóáramú táplálást is. Az U alakú járom kialakítása lehet merev, vagy állítható. Az utóbbi megoldás tagolt felületű daraboknál lehet előnyös.

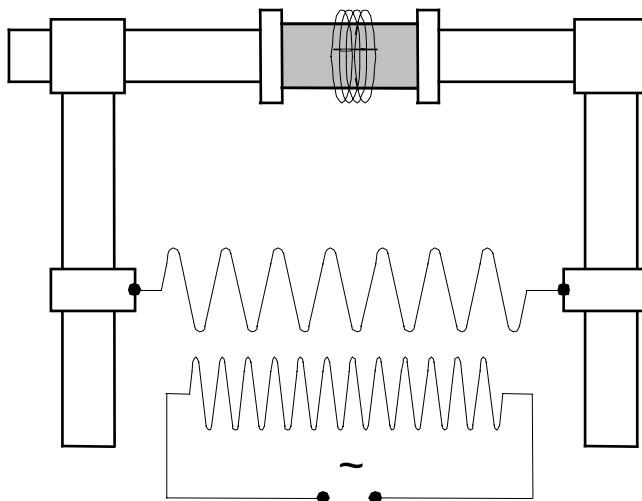
A váltakozó árammal táplált kézi mágnesszek előnye, hogy ezeknél a szkin hatás következtében csak a vizsgálati darab felszíni rétege mágneseződik és ezáltal nincs különbség a vékonyabb és a vastagabb tárgyak vizsgálhatóságában, amely az állandó és az egyenáramú mágnesszeknél egyébként hátrány. Ezeknél az erővonal sűrűsége a vastagság növekedésével ugyanis csökken.

A mágnesszes vizsgálat a hegesztéseknél elsősorban a sarokvarratok vizsgálatánál terjedt el. Itt geometriai okok miatt a radiológiai és az ultrahangos módszerek alkalmazása körülményes, vagy meg sem valósítható. A sarokmágnesezési módszernek telepített változata is ismeretes. Ezeknél a vizsgáló berendezéseknél nagyteljesítményű transzformátorok szolgáltatják az elektromágnes áramellátást. A berendezések a vizsgálati munkadarab rögzítésére szolgáló befogófejekkel rendelkeznek. A helyhez kötött berendezések lehetnek általános ki-

vitelűek is (tetszőleges méretű és alakú tárgyak vizsgálatára), de leggyakrabban célgépek, amelyek a konkrét termék automatizált ellenőrzését hivatottak megvalósítani.

1.3.4.2.2. Árambevezetéses módszerek

A mágneses tér előállítása történhet közvetlenül a vizsgálati darabba bevezetett árammal, vagy segédvezetőn keresztül. Közvetlen árambevezetéssel végzett mágneses repedésvizsgálatra mutat példát a 1.45. ábra.



1.45. ábra

Mágneses vizsgálat árambevezetéses módszerrel

A módszer elsősorban a hosszirányú repedések kimutatására alkalmas. A mágneses mező gerjesztésének ilyen módszerei egyaránt alkalmazhatók a hordozható és a telepített berendezéseknél. A 1.46. ábrán telepített mágneses vizsgáló berendezés fényképe látható.



1.46. ábra

Telepített mágneses vizsgáló berendezés (Forrás: Testor CD Infotár)

1.3.4.2.3. Vizsgálóporok és szuszpenziók

A felületi hibák kimutatására egyaránt használhatunk száraz porokat és szuszpenziós oldatokat. A leghasználatosabb vizsgálóporok az Fe_2O_3 és az Fe_3O_4 vasoxidféleségek. A jó hibakimutathatóság érdekében ezek alkalmazása esetén előzetesen a felületet gyorsan száradó fehér festékbevonattal kell ellátni. A fehér alapon a vörösbarna, illetve a fekete ferromágneses por a hibánál jól érzékelhető. Szokás ezt a megoldást fekete - fehér eljárásnak is nevezni. Előnyük, hogy a szabadban végzett vizsgálatoknál a fényviszonyok nem zavarják a vizsgálatot.

Floureszkáló ferromágneses por alkalmazása esetén *UV* lámpás megvilágítással válik láthatóvá a hibajelzés. A módszer csak sötét környezetben alkalmazható. Az *UV* lámpa a látható félynél kisebb hullámhosszúságú *UV-A* sugárzást bocsát ki. Annak érdekében, hogy a felületen a ferromágneses reszelékek, porok könnyen beálljanak a hiba irányába célszerű ezeket is hordozó folyadékban felhordani a felületre. Hordozó folyadékként az ásványi olaj és a víz egyaránt alkalmas.

1.3.5. Örvényáramos vizsgálatok

Az örvényáramos vizsgálatok első irodalmi közleményei az 1940-es években jelentek meg, elsősorban orosz, angol és német szerzőktől. A vizsgálati módszer azóta, elsősorban a német *Friedrich Förster* és munkatársai fejlesztő tevékenységének eredményeként olyan mértékben fejlődött, hogy manapság már a módszer vizsgálati berendezései a helyszíni vizsgálatokhoz is alkalmazhatók; hordozható változataik is számítógépi kiértékeléssel rendelkeznek.

Elektromos vezető anyagokban, az időben változó mágneses tér indukció útján áramot gerjeszt. Ezt az áramot nevezzük örvényáramnak. A vizsgált anyagban kialakított örvényáramot, az anyag tulajdonságok helyi változásai, az áram útjába eső anyagfolytonossági hibák befolyásolják. Az időben és a térben megváltozó örvényáram mágneses terének méréséből következtetni lehet az anyagok tulajdonságaira és belső anyaghibáira.

1.3.5.1. Az örvényáramos vizsgálatok anyagvizsgálati alkalmazási lehetőségei

Az örvényáramos technika anyagvizsgálati alkalmazási lehetőségei sokrétűek. A módszer alkalmazható az anyagminőségek vegyi összetételbeli kvalitatív (minőségi) elemzésére, adott anyagminőség szövetszerkezetbeli, keménységbeli különbözőségeinek megállapítására, a vizsgált tárgy mágneses tulajdonságainak (permeabilitás) és villamos tulajdonságainak (például fajlagos vezetés) mérésére. A vizsgálati elv, a felületi rétegek vastagságának megállapításánál, és a geometriai méretek gyártási folyamatba beépített automatikus ellenőrzésénél, és az anyagon belüli anyagfolytonossági hibák vizsgálatánál egyaránt alkalmazásra kerül. A továbbiakban elsősorban csak a belső hibák felderítését célzó vizsgálati elvekkel kívánunk részletesebben foglalkozni, a többinél csupán a fizikai alapelveket ismertetjük.

Az anyagok vegyi összetételbeli különválasztásának az alapja, hogy két egymással összehasonlítható anyagnál különbségek lehetnek az örvényáram mágneses terét jellemző

permeabilitásukban, telítési mágnesezésükben, a mágneses hiszterézis-görbéi alakjában és a fajlagos vezetésben. A vizsgálati cél ilyen alkalmazásoknál annak ellenőrzése, hogy a gyártmányosorozat azonos minőségű-e. Ha keveredés van az anyagminőségekben, akkor annak ötvözet szerint szétválogatása a feladat, illetve az adott anyag ötvöző-elemeinek szennyezőinek kvalitatív meghatározása.

A szövetszerkezet klasszikus vizsgálatai a mikroszkópos vizsgálatok, a keménységmérésnél pedig a szűrő-keménységmérési eljárások. A fémek mágneses elektromos tulajdonságai, valamint szövetszerkezetük és keménységük között, számos esetben azonban olyan szoros kapcsolat állhat fenn, amelyre építve az örvényáramos vizsgálat közvetve alkalmazható a szövetszerkezet és a keménység meghatározására. Ilyen esetben az örvényáramos módszer, akár megbízhatóbb információt is nyújthat az anyagok tulajdonságairól, mint az egy ponton elvégzett szövet, illetve keménységi vizsgálatok.

Örvényáramos vizsgálatnál váltakozó mágneses tér hat az anyagra. Ha ezzel egyidejűleg az anyagra időben állandó mágneses térrel is hatunk, ennek következményeként a permeabilitás csökkenni fog. A csökkenés mértékéből a vizsgálati tárgy permeabilitása, fajlagos vezetőképessége mérhető, számítható. E módszerek előnye az, hogy érintésnélküli módszerek. Az örvényáramos vizsgálat során a geometriai méretek ellenőrzésekor a vizsgált tárgyban gerjesztett örvényáram mágneses terének azon változásait mérik, amelyek csak a méretváltozással vannak kapcsolatban. Elsősorban huzalok, rudak, csövek és egyszerű profilú szalagok méretellenőrzésére használhatók.

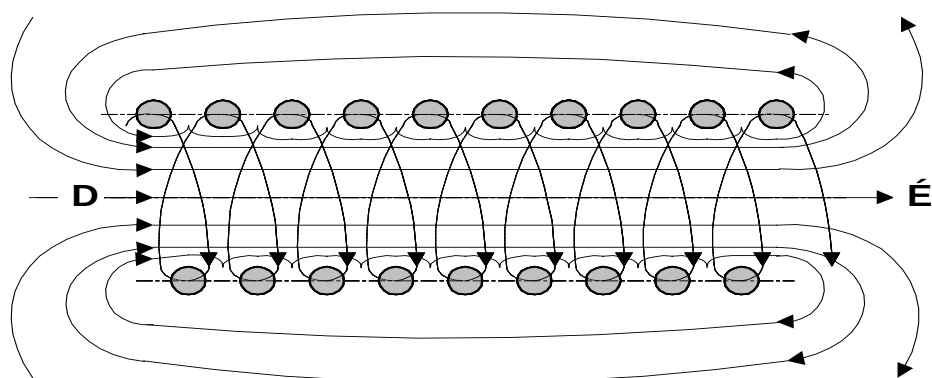
Elektromosan vezető anyagokat gyakran felületvédelemmel látnak el, máskor a felületükön kialakított réteggel az esztétikai megjelenés kedvezőbbé tételét kívánják elérni. A felületre felvitt festék-, műanyag-, és szigetelőrétegek, a fém alumínium, réz, stb. rétegek μm nagyságrendbe eső vastagságúak. Ha a réteg és az alapanyag fajlagos vezetése egymástól jelentősen eltérő, az örvényáramos módszerrel a réteg vastagsága meghatározható. Újabban ezt a módszert egyre gyakrabban alkalmazzák, pl. a személygépkocsik eredetvizsgálatánál a festékréteg eredetiségének az ellenőrzésére is.

1.3.5.2. Az anyagfolytonossági hibák kimutatása

A következő pontokban a legfontosabb fizikai alapelvek áttekintése után néhány gyakorlati példa bemutatásával illusztráljuk a vizsgálat sokrétűségét.

1.3.5.2.1. Örvényáramos vizsgálati elvek

Valamely tekercsbe vezetett áram a tekercs belsejében mágneses teret hoz létre (1.47. ábra).



1.47. ábra
Árammal átjárt tekercs mágneses tere

Az árammal átjárt tekercs mágneses térerőssége az alábbi összefüggéssel számítható:

$$H = \frac{I \cdot N}{l}, \quad (1.50)$$

ahol I az áramerősség, N a tekercs meneteinek száma és l a tekercs hossza.

Ez a térerősség a tekercs belsejében mágneses indukciót okoz:

$$B_0 = \mu_0 H. \quad (1.51)$$

Itt μ_0 a levegő permeabilitását jelenti. A tekercsben a mágneses erővonalak sűrűsége megváltozik, ha abba, egy rudat helyezünk. Az anyag mágnesezhetőségének mértékét az alábbi összefüggéssel írhatjuk le:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H, \quad (1.52)$$

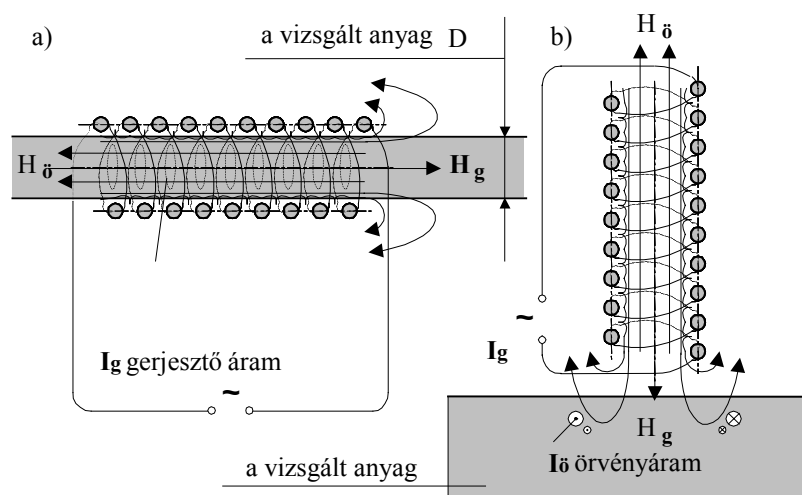
ahol μ_r a tekercsbe helyezett anyag mágneses permeabilitása.

A külső váltakozó feszültségre kapcsolt tekercs mágneses fluxusa

$$\Phi = B \cdot A \quad (1.53)$$

összefüggéssel számítható, azaz a fluxus-sűrűség és a mágneses fluxus által átjárt terület szorzataként.

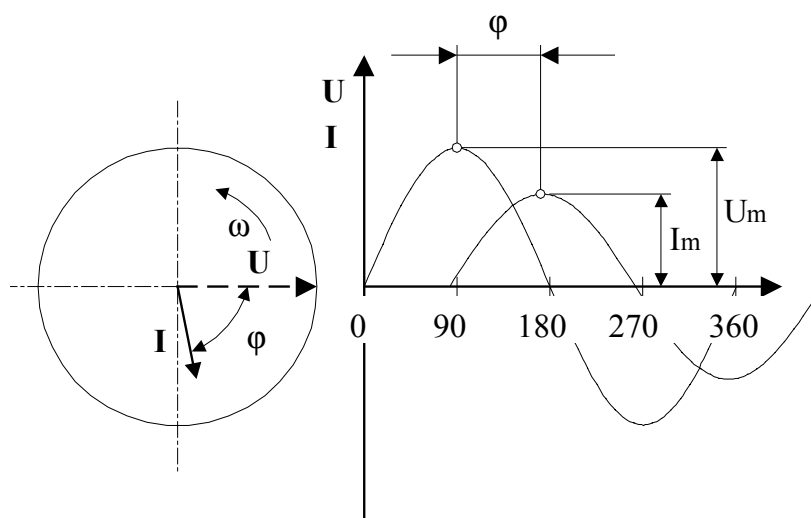
Helyezzük a tekercsbe a vizsgálati tárgyat a 1.48. ábra szerinti módon. A rúd alakú terméket a tekercs belsejébe, a síkszerű termékeket a tekercs alá helyezzük. A tekercs alá helyezett anyagban a tekercs váltakozó árama váltakozó mágneses teret hoz létre. Ennek mágneses térerősségét a H_g jelzi. E primer gerjesztő mágneses tér a vezető anyagban a mágneses fluxus időbeni változásával arányos feszültséget indukál. E feszültség hatására a tekercsbe helyezett rúd felületén kerületirányban, illetve a tekercs alatti tárgynál a tárgy felületén a tekercs középvonalára merőleges síkban körkörösén haladó irányban áram indukálódik. Ezt az áramot nevezzük örvényáramnak.



1.48. ábra

Az örvényáram keletkezése

Az örvényáram maga is gerjeszt mágneses teret (H_δ), amely a H_g külső mágneses térrel ellentétes irányú. A két mágneses tér összegződik. Az így kialakuló eredő váltakozó mágneses tér indukció révén visszahatással van az azt előidéző tekercs feszültségére és áramára. Amennyiben a tekercsen belül, illetve az alatta elhelyezett vizsgálati anyag felületén anyagfolytonossági hiba van, az megváltoztatja az örvényáramlást így az eredő mágneses teret is. A tekercsben így kialakuló feszültség változásából, illetve a feszültség és az áram fázisának eltolódásaiból következtetni lehet a hiba jelenlétére (1.49. ábra).



1.49. ábra

A feszültség és az áram fáziseltolódása a mérőtekercsben

A tekercs váltakozó feszültsége:

$$U = U_m \sin(\omega t). \quad (1.54)$$

A tekercsben folyó áram az ehhez képest fáziseltolódásban van, amely az

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.55)$$

összefüggéssel jellemezhető.

1.3.5.2.2. Vizsgálati elrendezések

A vizsgált tárgy anyagfolytonossági hibái miatt az örvényáramokban bekövetkező változást mérni lehet a gerjesztőtekercsben is, de a változás mérésére általában külön mérőtekercset alkalmaznak. A gerjesztő és a mérőtekercs tárgyhoz viszonyított elhelyezésétől függően a vizsgálatok három főcsoportba sorolhatók:

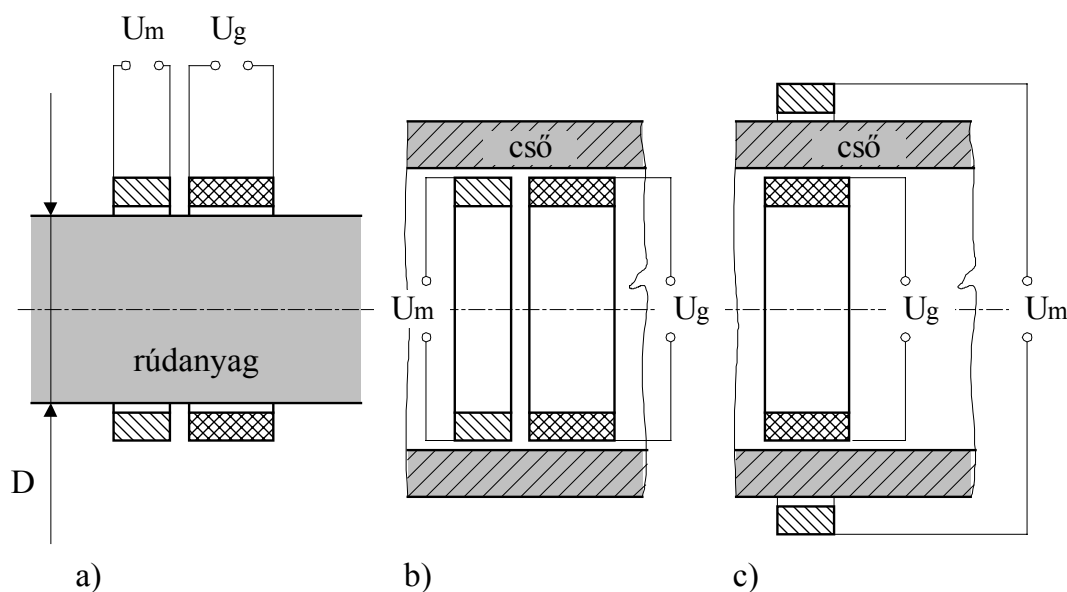
az átmenőtekercses,

a tapintótekercses és

a villástekercses vizsgálatok

csoportjaiba. Az átmenő tekercsek alkalmazására a 1.50. ábra mutat példát.

A 1.50. ábra a) részlete szerinti megoldásnál a vizsgálati tárgy áthalad a tekercseken. Csövek vizsgálatánál általában a vizsgáló tekercseket juttatják át a csövön (b). Vékony csövek vizsgálatánál a transzmissziós eljárást szokás alkalmazni (c), így a külső és belső felületük egyszerre vizsgálhatók. A cső egyik oldalán helyezkedik el a gerjesztő tekercs, a másik felületénél a mérőtekercs. Ilyenkor az egyik tekercs a csövön belül, a másik kívül helyezkedik el.

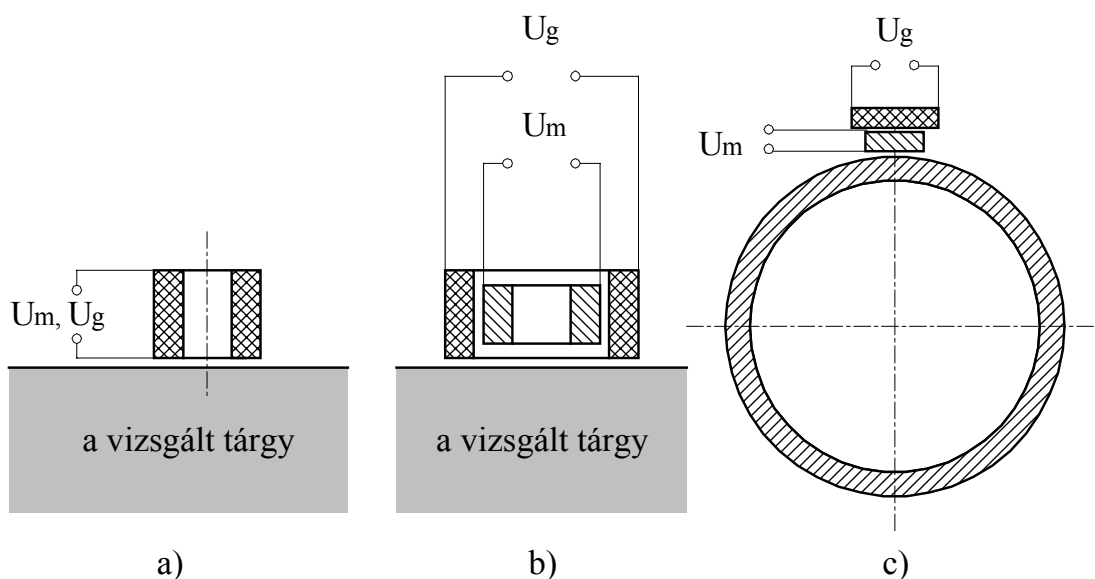


1.50. ábra

Vizsgálat átmenőtekercsekkel

a) rudak vizsgálata, b) és c) csövek vizsgálata

Ha a vizsgálati tárgy nagyméretű, tehát az átmenő-tekercsbe nem helyezhető be, akkor a tapintótekercses megoldás a jobb. Erre mutat példát a 1.51. ábra.

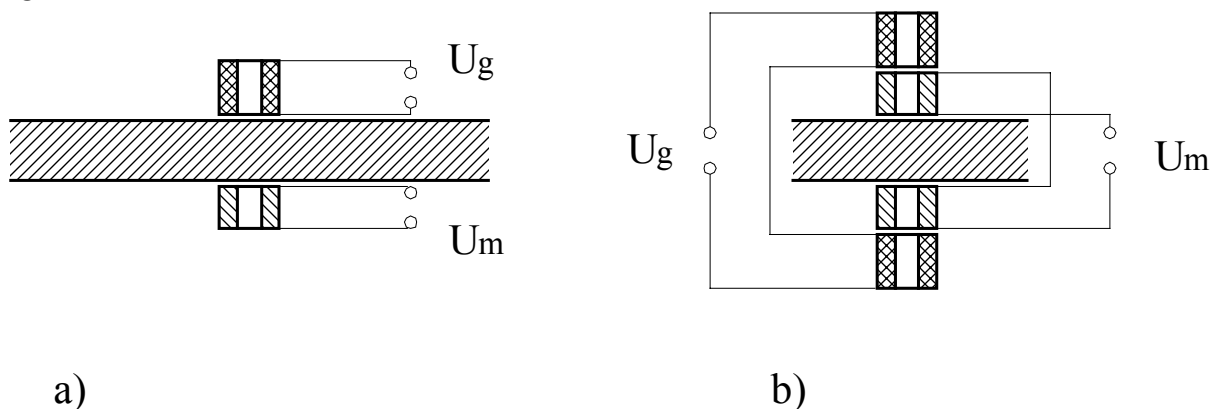


1.51. ábra

Vizsgálat tapintótekercsekkel

a) lemezvizsgálat egy tekercssel, b) két tekercssel, c) csővizsgálat

Elsősorban fémfóliák, vékony fémlamezok érintésmentes vizsgálatára a villástekercses megoldást alkalmazzák a 1.52. ábra szerinti elrendezésben.

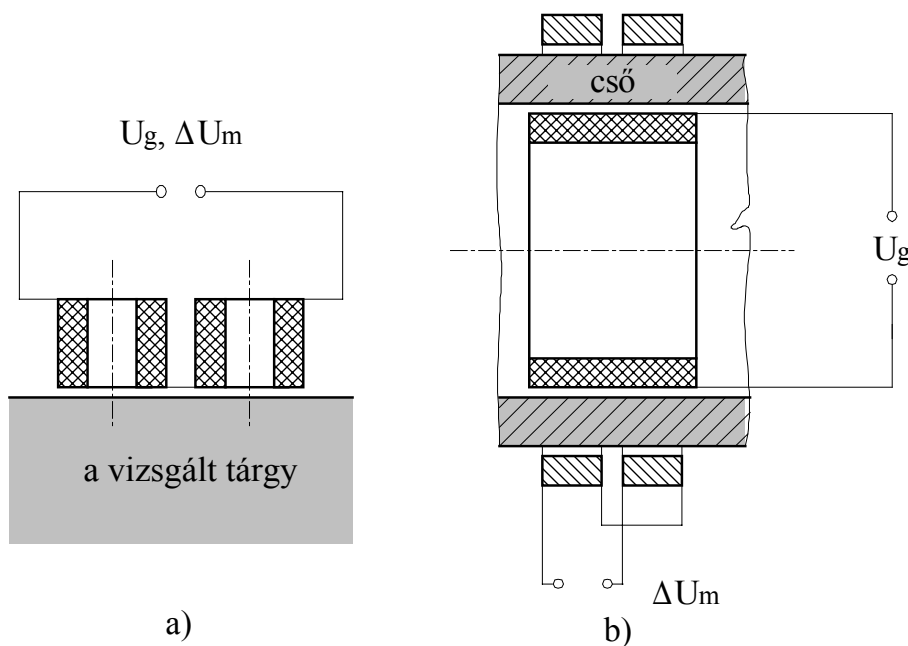


1.52. ábra

Vizsgálat villás tekercsekkel a) abszolút, b) differenciál kapcsolással

A vizsgálati tárgy a két tekercs között halad. Az ábra szerinti elrendezés transzmissziós eljárást mutat. Attól függően, hogy a gerjesztés a mérőtekercs elektromos kapcsolat vonatkozásában különválasztott, vagy sem, a vizsgálati elrendezés lehet abszolút (a), vagy differenciál kapcsolású (b). Az előző példák a különálló tekercsek alkalmazását illusztrálták; ezeknél a kapcsolás az abszolút rendszernek megfelelő. A differenciál megoldásoknál, a mérőtekercsben jel nincs akkor, ha az érzékelt tartományon belül azonosak a feltételek. A mérőtekercsben csak akkor adódik kijelzés, ha hiba kerül a vizsgálófejek tekercse környezetébe.

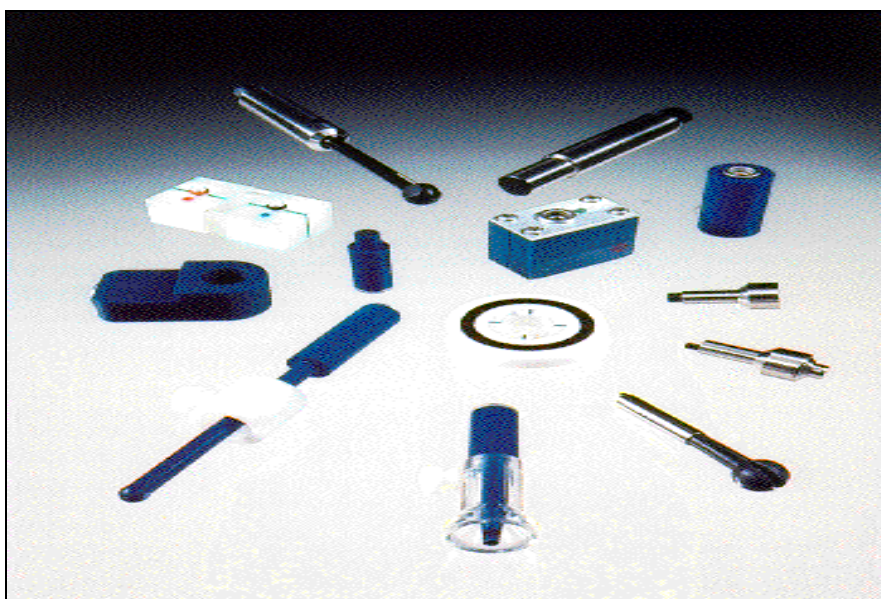
A differenciál kapcsolásra további példákat mutat a 1.53. ábra.



1.53. ábra

A tekercsek differenciál kapcsolásai: a) lemezvizsgálat; b) csővizsgálat

A differenciál rendszeren belül is van a vizsgálatnak két különböző módja, önkiegyenlítő és külső kiegyenlítő (összehasonlító) megoldás formájában. Önkiegyenlítőnek nevezzük az eljárást, abban az esetben, ha a szorosan egymás mellé helyezett tekercsek vizsgálati tartományát hasonlítjuk össze. Önkiegyenlítő eljárásnál a szorosan egymás mellé helyezett tekercsek vizsgálati tartományát hasonlítjuk össze. A külső kiegyenlítésnél a vizsgálati tárgy egy másik tárggyal kerül összehasonlításra. Az anyaghibák kimutatására általában az önkiegyenlítő megoldást alkalmazzák.



1.54. ábra

Az örvényáramos vizsgálatok mérőfejei

Az örvényáramú vizsgálatokban az elektronika és a számítógépes technika fejlesztése úrrásszerű fejlődést eredményezett. A fejlesztési irányok alapvetően a minél jobb felbontó képesség, a jobb hibakimutathatóság elérését és a vizsgálatok reprodukálhatóságának, megbízhatóságának a javítását, a vizsgálófejek miniaturizálását szolgálják. Fontos fejlesztési cél továbbá a hordozható műszereknél a műszerek súlyának csökkentése. A 1.54. ábra ilyen miniaturizált vizsgálófej kialakításokra mutat példát.

1.3.6. Az akusztikus emissziós vizsgálatok

Akusztikus emisszió alatt a szilárd testekben tárolt energia felszabadulásakor keletkező rugalmas hullámokat, mechanikai rezgéseket értjük. Ha vékony jégrétegre lépünk, hallhatjuk a terhelésből adódó repedések hangját. A terhelt jég rugalmas energiája szabadul fel ilyenkor, a repedések, törések hatására. Hasonló játszódik le gépészeti szerkezeteinkben is a terhelés hatására, ha az a belső hibák környezetében képlékeny alakváltozást okoz, repedést, vagy repedés előrehaladást vált ki. Ezt általában nem halljuk, mert a hullám frekvenciája a hallható tartományon kívül esik és általában ezeknek a mechanikai rezgéseknek, hangoknak kisebb az intenzitása is, mint amelyet a fülünk érzékelhetne. De ez az emisszió az ultrahang vizsgálatnál már megismert piezoelektromos elv alapján villamos jellé alakítható és erősíthető.

A jelek elemzéséből a szerkezeten belüli hibákra vonatkozóan értékes információkat szerezhetünk. Az akusztikus, emisszió figyelése a 10^{-2} - 10^0 Hz frekvenciás földrengéshullámoknál, e feletti frekvenciáknál a földtani vizsgálatokban, 10^4 Hz felett pedig a szivárgások ellenőrzésénél nyújt hasznos információkat. A fémek akusztikus emisszióinak frekvenciája az $f = 10^5$ - 10^6 Hz tartományba esik.

1.3.6.1. Az akusztikus emisszió forrásai

Az akusztikus emisszió szilárd mikro-forrásaiként, az alábbiak tekinthetők:

- a krisztallitok deformációi,
- a szemcsehatár mozgások,
- a diszlokációk keletkezése és mozgása,
- a fázis átalakulások és kiválások, továbbá
- a mikrorepedések és a mikrotörések.

A belső hibák feltárását szolgáló akusztikus emissziós vizsgálatoknál is találkozunk a mikrojelenségekkel, ugyanis ezek meghatározói a makroszkópikus méretekben kifejlődő változásoknak, de általában a vizsgálatoknál csak a makroforrások hanghatásait figyeljük. A makroszkópikus források alatt:

- a hibák melletti képlékeny zóna növekedését,
- a repedések keletkezését és terjedését,
- a fáradásos repedésterjedéseket,
- a korrózió előrehaladását,
- a feszültségkorróziós repedésterjedést és

a hibák okozta törést értjük.

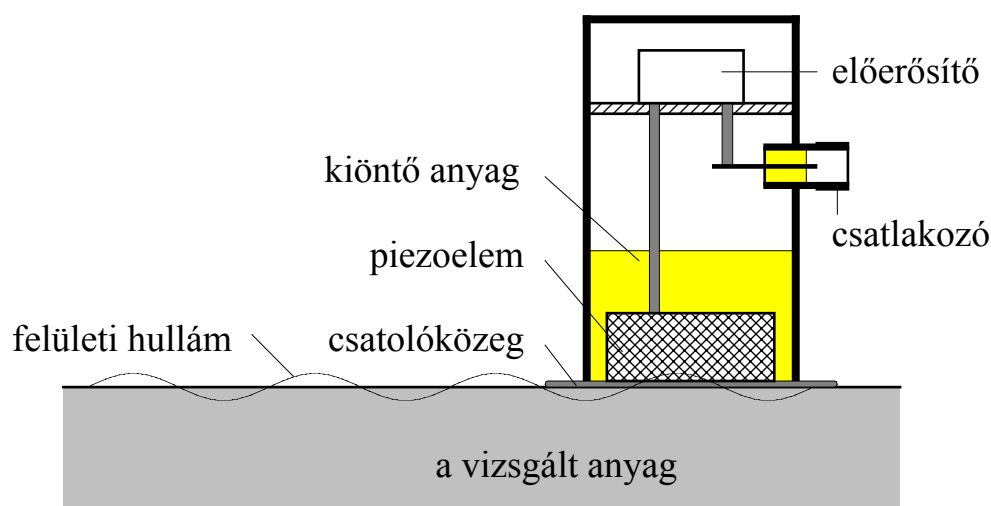
Van néhány jelenség, amelyek megfigyelése nem tartozik a hibát feltáró akusztikus emissziós roncsolásmentes vizsgálatok tárgykörébe. Ugyanakkor e hangjelenségekkel roncsolásmentes hibafeltáró vizsgálatoknál is találkozunk, (ugyanis ezek frekvenciája is az akusztikus vizsgálati frekvencia-tartományon belül esik) számolnunk kell jelenlétükkel és a zavaró hatásukkal. Ilyenek lehetnek például a súrlódások, dörzsölések, szivárgások felszabadult tárgyak felütődései és az áramlások hangjelei.

A különféle anyagminőségek akusztikus emissziójának aktivitása különböző, következésképpen különbözik ezeknél a jelek érzékelhetősége és a hibák kimutathatósága is. Általánosságban mondható, hogy a hangaktivitás kedvező az alábbi esetekben:

- a nagy szilárdságú anyagoknál,
- a nagy feszültségkoncentrációknál,
- kis hőmérsékleteken,
- inhomogén, anizotróp anyagoknál,
- a vastagfalú szerkezeteknél és a
- durvaszemcsés, pl. öntött anyagoknál.

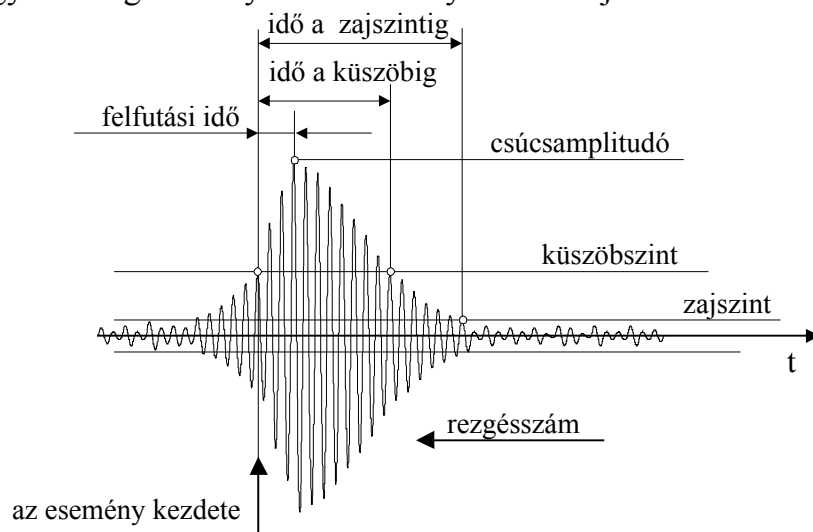
1.3.6.2. Az akusztikus jelek formái

Az akusztikus emissziós vizsgálat és az ultrahang vizsgálat sok vonatkozásban mutat hasonlóságot. Alapvető különbség abban van, hogy míg az ultrahang vizsgálatnál gerjesztett ultrahangot viszünk az anyagba és azt vizsgáljuk, hogyan verődik vissza a hibától, az akusztikus vizsgálatnál nem kell ilyen hangot bevezetni. Ez esetben a hibáknál leggyakrabban fizikai behatással (pl. terheléssel) idézzük elő az akusztikus emissziós forrás aktívvá válását. A forrás hangkibocsátása lehet folyamatos, vagy kitöréses (burst) típusú. Az akusztikus forrástól a hang az anyagon belül longitudinális, vagy transzverzális módon terjed, a felületen pedig e két hullámforma kombinációjaként felületi hullámok formájában. A hibafeltáró akusztikus emissziós módszer alkalmazásának a célja a hiba típusának és a helyének a meghatározása. A jelek érzékeléséhez itt is piezoelektromos detektorokat alkalmazunk. A detektorokat csatoló közegen keresztül rögzítjük az anyag felületére (pl. mágneses befogókkal, vagy egyéb mechanikus módon). A detektorok által vett jelek mechanikai rezgés jelek, amelyek a detektorokban villamos jellé alakítódnak át. A detektortól e villamos jel előerősítő közbeiktatásával jut a jelfeldolgozás műszereibe. Az érzékelő felépítését szemlélteti a 1.55. ábra.



1.55. ábra
Akusztikus jelérzékelő (detektor)

A hiba típusának meghatározásában meghatározó jelentősége van a jelazonosításnak. A 1.56. ábra egy egyedi hangesemény időbeni lefolyását mutatja be.



1.56. ábra
A hangesemény időbeli lefolyása

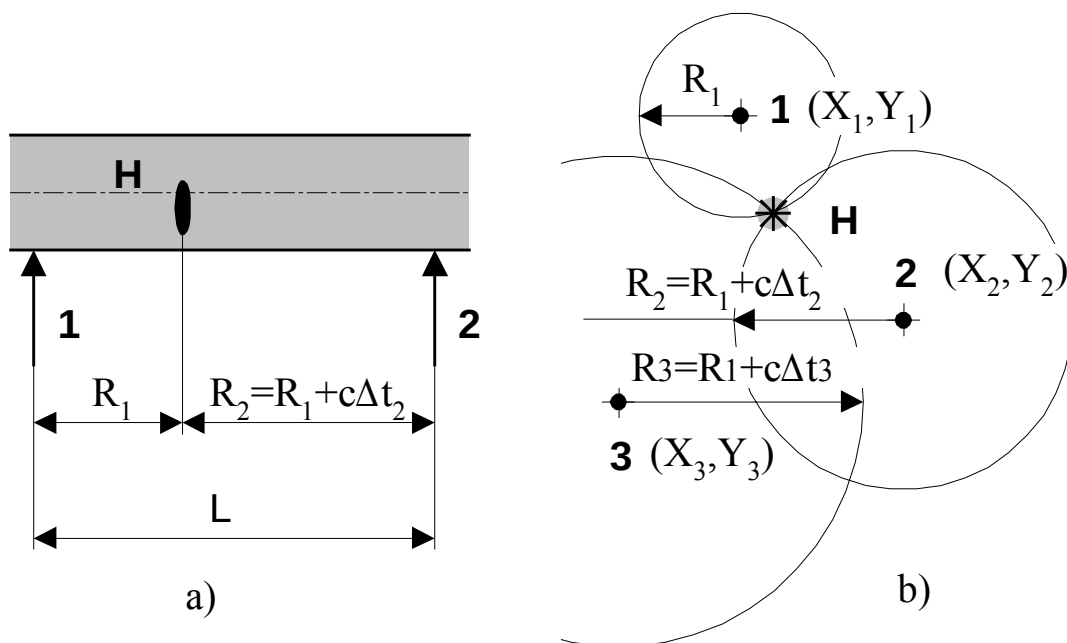
Az akusztikus emisszióban a felfutási idő után általában jelentős hosszúságú és jellemző frekvenciájú oszcilláló rezgéscsomag következik. A lényeges információt e hangképben a küszöb feletti aktivitások hordozzák. A jelfeldolgozásban kulskérdés a küszöbszint helyes megváltoztatása. Elterjedt módszer szerint a küszöbértéket az egyenirányított zaj-jelek átlagos szintjén jelölik ki.

1.3.6.3. A hibák típusának és helyének meghatározása

A hibák típusára a hangesemény lefutásából, az esemény energiájából, a hangesemény burkoló görbéje alatti területből, a hangesemény valamely jellemzőjének adott időszakon belüli előfordulásának számából és az akusztikus aktivitásból lehet következtetni. A hiba

helyét e vizsgálatnál a szerkezeten egyidejűleg alkalmazott érzékelők jelzéseiből lehet meghatározni. Az "első megszólaló" detektorhoz képest mérjük azokat az idő eltolódásokat, amelyekkel a további (ismert koordinátájú helyeken felhelyezett) detektorok is érzékelik ugyanazt a hangeseményt. A hanghullám adott anyagon belüli terjedési sebességéből és az elrendezés geometriájából az akusztikus forráshely (hibahely) koordinátái meghatározhatók.

A 1.57. ábra a lineáris lokalizációra mutat példát. Az ábra szerint az első érzékelés az 1. jelű detektornál történt. A hibától távolabbi 2-es és 3-as jelű detektoroknál a hangesemény megjelenése Δt_2 és Δt_3 idő múlva várható. A hiba tehát a detektoroktól R_1 , R_2 és R_3 távolságokban található. E távolságokban lévő pontok mértani helye az a) ábrarészlet szerinti rúdnál annak középvonalában, a b) ábrarészlet szerinti sík felületen az R_1 , R_2 és R_3 sugarú körökön található. Az (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) és (X_3, Y_3) középpontú körök egyenleteiből a három ismeretlen (R_1, R_2, R_3) matematikailag meghatározható, tehát a forráshely azonosítható. A lokalizálást a jelfeldolgozás során a korszerű műszerek számítógépi úton végzik. A számítógép az értékelés eredményét monitoron térképszerűen is megjeleníti.



1.57. ábra

A hiba helyének meghatározása

1.3.6.4. Az akusztikus emissziós vizsgálatok előnyei

A vizsgálat más típusú roncsolásmentes módszerekkel összehasonlításban számos előnnyel rendelkezik. A vizsgálatok megtervezésénél, az adott vizsgálati feladatra leginkább alkalmas módszer kiválasztásánál, ezek ismerete igen fontos. Az alábbiakban az akusztikus emissziós vizsgálat néhány jellegzetességét összegezzük.

Az akusztikus emisszió forrásai azok az anyaghibák, amelyek az alkalmazott terhelésnél aktívvá válnak. Ide sorolhatók azok az anyaghibák, amelyeknek környezetében a terhelés hatására változások (pl. képlékeny alakváltozás, vagy repedés) következik be. Az adott ter-

helésre érzéketlen hibáktól nem kapunk jeleket. A módszerrel tehát meg lehet különböztetni az adott igénybevételi szint aktív és passzív hibáit, azaz információt kapunk a hibák veszélyességéről.

A módszer a mérés során a szerkezet egészét vizsgálja. A szerkezetben fellelhető veszélyes hibák mindegyike egyidejűleg felderítésre kerül. Tehát a módszer integrált vizsgálati módszer, amely a hibakijelzésnél különbséget tud tenni az azonos típusú hibák között is abban a vonatkozásban, hogy ezek közül melyek a terhelhetőség szempontjából leginkább kritikusak. A vizsgálat fel tudja deríteni a más roncsolásmentes vizsgálatoknál "hozzáférhetetlen" hibákat is.

A vizsgálat előnye továbbá, hogy alkalmas az üzemelő szerkezetek vizsgálatára, tehát a módszer állapotfelügyeletre is alkalmas. Ennek különösen nagy a jelentősége az atomerőműi és a veszélyes üzemeltetésű berendezések folyamatos ellenőrzésénél, az üzemeltetésből származó hibák időbeli felismerésénél.

Az akusztikus emissziós vizsgálat gyors szűrővizsgálatként is alkalmazható abból a célból, hogy kijelöljük azokat a hibákat, amelyek a legveszélyesebbek. A további részletes vizsgálatokat csak az így feltárt hibáknál szükséges elvégezni.

1.3.6.5. A vizsgálat fontosabb alkalmazásai

Az elektrotechnikai alkatrészek tömeggyártásában kerámia lapkák repedésmentességének, integrált áramkörök hegesztésének és felületi rétegek tapadásainak ellenőrzésére a módszert gyártásközi minőség ellenőrzésként alkalmazhatjuk.

Nagy értékű szerszámgépeknél a szerszámtörést folyamatosan monitorozó akusztikus érzékelőkkel figyelik. Ez az állapotfelügyelet jellegzetes alkalmazási területe. A képzett villamos jellel védelmi működtetést lehet vezérelni.

Az akusztikus emissziós módszer egyre inkább elterjedőben van tartályok, nyomástartó edények és kazándobok hidraulikus nyomáspróbáinál. A nyomáspróbáknál a terhelést az üzemi szint felett alkalmazzák, általában az üzemi nyomás 25 % -kal növelt értékén. Amennyiben a gyártást követően végezzük a nyomáspróbát, alkalmazásával számos gyártási eredetű hibát tárhatunk föl, időben intézkedhetünk ezek megszüntetésére. Ebben az esetben a vizsgálat minősítő-vizsgálatnak is tekinthető. Az üzemközi időszakos ellenőrzések az üzemeltetésből származó hibák (pl. korrózió, feszültségkorróziós repedés, fáradási eredetű repedés stb.) időben történő felismerését is lehetővé teszik. A diagnosztikai módszerrel nagyobb károsodások előzhetők így meg. A nukleáris ipar fokozott biztonsági követelményei a módszer alkalmazását állapotfelügyelet céljából írják elő.

1.4. ANYAGVIZSGÁLATI MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA A MŰSZAKI DIAGNOSZTIKÁBAN

A diagnosztika az orvostudományban már régóta ismert és alkalmazott fogalom, amely a betegségek felismerésének tudományterületét foglalja magába. Az emberi test állapotának megállapítását (diagnosztizálását) szolgálja a kórisme, a betegség beazonosítása (a diagnózis felállítása) céljából.

1.4.1. A műszaki diagnosztika fogalma

A *diagnosztika* kifejezés a görög "*diagnoszisz*" szóból származik; jelentése felismerés, meghatározás. A műszaki értelmezésben a diagnosztika tágabb értelmezést kap, a gépek berendezések szerkezetek állapotának jellemzésén túl a várható viselkedésük előrejelzését is jelenti. A diagnosztikai tevékenység három fő területet foglal magába:

- a múltbeli állapot, az előzmények elemzését (genézis),
- a jelenlegi állapot meghatározását és
- a rendszer jövőjére irányuló előrejelzéseket (prognózisokat).

A nagy értékű műszaki létesítményeket, gépeket berendezéseket szerkezeteket általában 10-40 évre tervezik az adott időszakban érvényben levő szabványok, műszaki irányelvek alapján. Ezekben az előírásokban mindig az adott időszak ismeretszintje, technológiai színvonalra tükröződik vissza. A technika fejlődésével együtt a vizsgálati technikák is rohamosan fejlődtek, amelyek alkalmazásával a műszaki létesítmények maradék élettartama nagyobb megbízhatósággal becsülhető, ennek ismertetében pedig ezek biztonságos üzemeltethetőségének feltételei kisebb kockázatvállalással jelölhetők ki. Mindezek eredményeként jelentősen bővültek az élettartam növelés lehetőségei is.

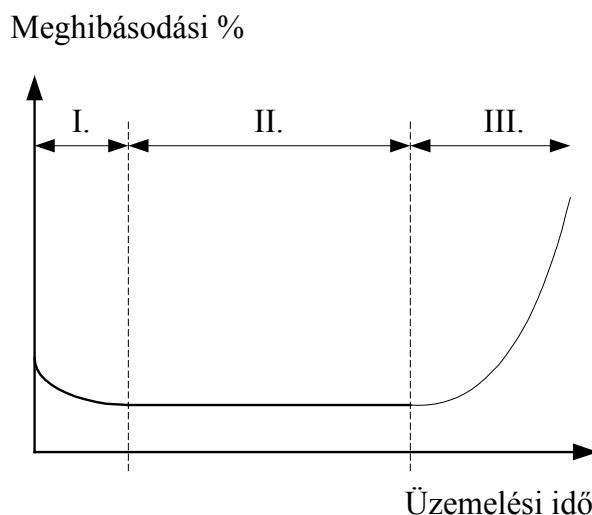
Az anyagvizsgálati módszerek diagnosztikai célú alkalmazásai egyre nagyobb szerepet kapnak. Az új szemlélet szerint tehát a diagnosztikai vizsgálatokat nem csupán a meghibásodások, a hiba eredetének keresése céljából érdemes alkalmazni, hanem az élettartam növelést szolgáló tervszerű karbantartásoknál az információ szerzése érdekében is.

1.4.2. Műszaki diagnosztika az üzemfenntartásban

Az *üzemfenntartás* alatt azon műszaki, gazdasági és szervezési intézkedések összességét értjük, amelyek egy rendszer állapotának megőrzésére, vagy visszaalakítására, illetve a

hibaokok felderítésére irányulnak. Az üzemfenntartás alapvető célja a gépek berendezések, szerkezetek értékének a megőrzése, a váratlan üzemzavarok, termeléskiesések elkerülése, az üzemeltetési biztonság növelése, a környezetvédelmi előírások teljesítése és a minőség javítása. A tervszerű megelőző üzemfenntartásoknál előre meghatározott időszakonként kis-, közép- és nagyjavításokat végeznek. A javítások közötti időszak diagnosztikai vizsgálatai a javítások előre tervezését segítik. Az általában leállásokkal járó megbontásoknál a diagnosztikai ellenőrzések a tovább-üzemeltethetőség feltételeinek meghatározását célozzák.

A legkorszerűbb üzemfenntartási stratégiák a gépek berendezések szerkezetek állandó, vagy szondázásos megfigyelését, illetve állapot-felügyeletét igényelik. A diagnosztikai vizsgálatok eredményeinek az előírt állapottal való összevetése szolgáltatja az alapot az üzemeltethetőség feltételeire vonatkozóan. Ehhez az üzemfenntartási stratégiához a műszaki diagnosztika elsősorban az állapot-felügyeleti tevékenységgel járul hozzá. A diagnosztikai vizsgálatoknál kulcskérdés a vizsgálati időszakok ciklus idejének a helyes megválasztása. Ha túl hosszú ez az idő fennáll a meghibásodás veszélye, túl rövid ciklus idők esetén felesleges és indokolatlan költségek merülnek fel.



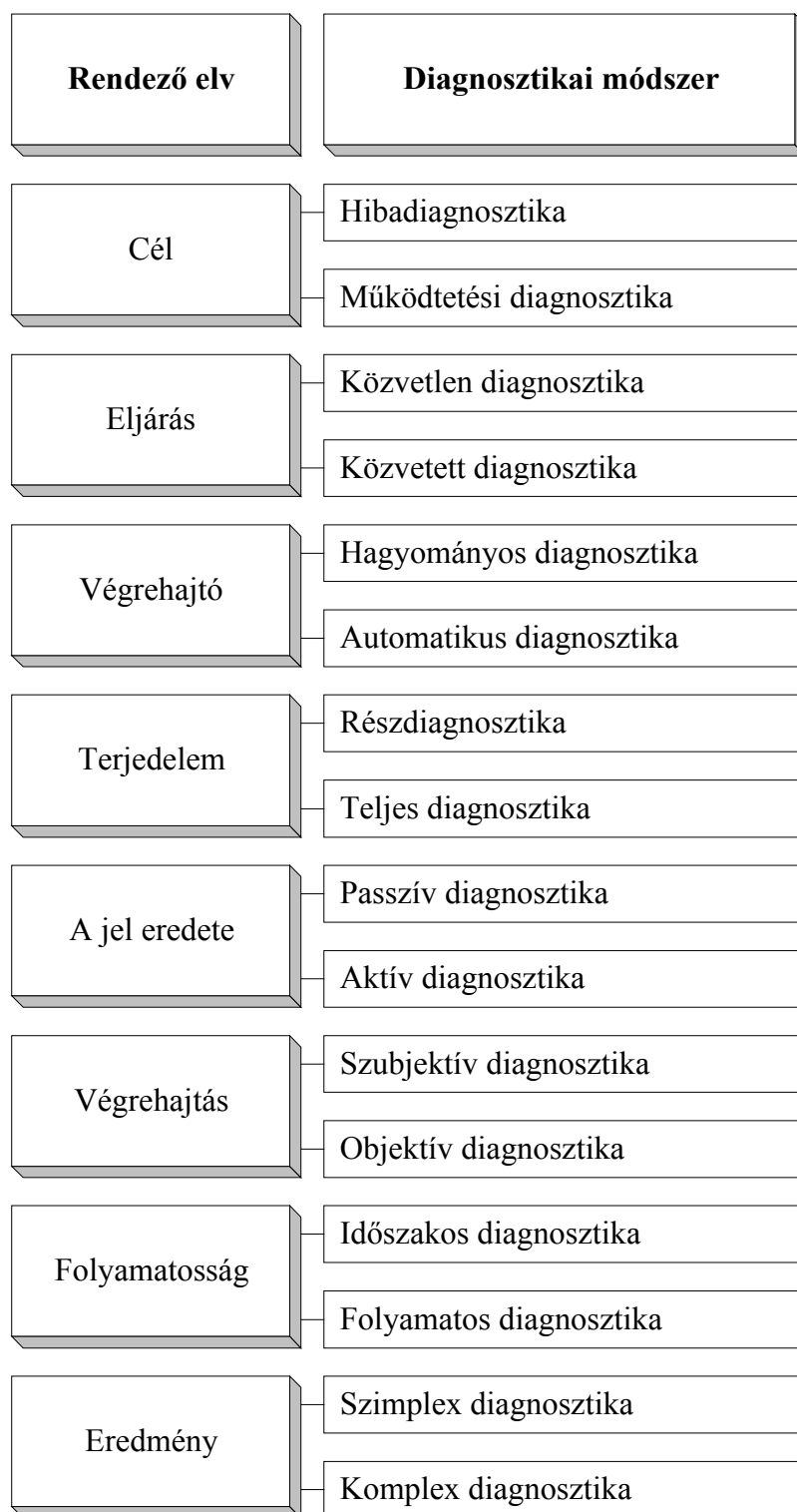
1.58. ábra

A meghibásodás kádgörbéje

Gépek, berendezések, szerkezetek meghibásodásainak valószínűsége az élettartamuk során a 1.58. ábra szerinti "kádgörbe" alakot mutatja. A görbének három jellegzetes szakasza van. Az I. szakasz a korai, az üzembeállítást követő meghibásodások szakasza. A kezdeti nagyobb meghibásodási százalék a gyártási eredetű hibák következménye. Később ezeknek a hibáknak a megszüntetése után csökkenés tapasztalható a meghibásodásokban. Ezt a II. szakasz szerinti normál üzemi állapot jellemzi. Az I. és a II. szakasz időbeni aránya általában 1:100, illetve 1:1000 közötti értékű. A diagnosztikai ellenőrzések ciklusidejét az I. szakaszban kisebb értékűre kell választani. A III. szakaszban a meghibásodások valószínűsége rohamosan nő. A diagnosztikai vizsgálatok ciklusidejét akkor tervezzük jól, ha e szakasz eleje biztonsággal felismerhető. E szakaszban az első meghibásodások általában csekély rendellenességek pl. eltérő zajban, rezgésben, teljesítménycsökkenésben, vagy kezdődő repedések formájában jelentkeznek. A javítások legmegfelelőbb időpontjaként a II. szakasz végét célszerű kijelölni.

1.4.3. A diagnosztikai módszerek csoportosítása

A diagnosztikai módszerek csoportosítására a gyakorlatban többféle rendező elv is használatos. A leggyakrabban alkalmazott rendezőelvek összefoglalását a 1.59. ábra szemlélteti.



1.59. ábra
A diagnosztikai módszerek csoportosítása

A 1.59. ábrához kapcsolódóan, a következőkben röviden értelmezzük a különböző diagnosztikai fogalmakat és módszereket.

A diagnosztika klasszikus alkalmazásai azt a célt szolgálták, hogy az adott gépnél, berendezésnél, szerkezetnél megállapítsuk, hogy az üzemeltetés a teljes élettartam mely szakaszához ért el, milyen mértékű volt eddig az időpontig az elhasználódás és a károsodás mértéke. A kopási-, kifáradási-, öregedési-, vagy a korróziós-állapot feltérképezésével, a vizsgált jellemzők referencia értékeinek figyelembevételével valószínűsítik a meghibásodások jövőbeni alakulását. Az ilyen típusú, klasszikus módszerek általánosan elterjedt neve *hibadiagnosztika*. A diagnosztikai vizsgálatok fejlettebb változatainál a megvalósítandó cél a hibák megelőzése. Az üzemeltetés paramétereinek folyamatos ellenőrzésével a rendellenes működést kell megakadályozni. Ezek az ellenőrzések az *üzemeltetési diagnosztika* körébe tartoznak.

Közvetlen diagnosztikai eljárásról beszélünk abban az esetben, ha a mért diagnosztikai-információhordozó önmagában is alkalmas az üzemi állapot jellemzésére. A *közvetett diagnosztikai* módszereknél több üzemi paraméter komplex elemzéséből következtetünk az üzemi állapot megfelelőségére. Közvetlenül általában csak a fizikai alapmennyiségek például hosszúság, tömeg, vagy hőmérséklet mérhetők. Közvetlenül vizsgálható például a felületi korróziós gödrösödés mértéke (mélységméréssel), azonban egy forgó gép kiegyensúlyozatlansága csak közvetett úton, például rezgésméréssel, vagy optikai módszerekkel állapítható meg. Közvetett módszerekkel lehet következtetni a belső anyagszerkezeti változásokra is.

A hagyományos diagnosztika *szubjektív diagnosztika*. A mérést és annak kiértékelését ilyenkor az ember végzi. Ez magában hordozza ugyan a szubjektív tévedés lehetőségét, azonban támaszkodik a szakember sokszor más úton még nem pótolható ismereteire, tapasztalataira is. Az *automatikus diagnosztikában* az érzékelőkön szerzett információkat számítógép segítségével értékeljük ki. E technika képes megkülönböztetni az ideális és a hiba állapotot, így a veszélyhelyzetre a szubjektív tévedést kizárva hívja fel a figyelmet (nagy értékű, például atomerőművi berendezések folyamatos monitorozása során).

A *részdiagnosztika* a vizsgált objektum működés szempontjából meghatározó szerepű részegységeinek figyelésére irányul, a *teljes diagnosztika* az objektum minden lényeges egységének folyamatos állapotfelügyeletét ellátja.

A *passzív diagnosztika* azon információ jeleket méri, amelyek a vizsgált objektumban keletkeznek. Az objektum által kibocsátott jelek tájékoztatnak bennünket a lejátszódó folyamatokról. *Aktív diagnosztikáról* beszélünk viszont akkor, ha a megfigyelt és analizált jel nem a vizsgált objektumból, hanem például valamilyen külső energiaforrásból származik. Passzív diagnosztikai módszer például a szemrevételezés, a rendellenes zaj figyelése, a rezgésmérés, a hőmérsékletmérés, az akusztikus emisszió figyelése, a nyomásmérés, a térfogatáram mérése és a lekopott részecskék vizsgálata. Az aktív módszerek közé tartoznak például a radiológiai, az endoszkópos, a mágneses, az ultrahangos vizsgálatok.

A diagnosztikai vizsgálatok során *szubjektív és objektív vizsgálati módszereket* egyaránt alkalmazunk. A szubjektív vizsgálati módszerek az ember természetes érzékszerveire (hallás, látás, szaglás, tapintás és ízlelés) építenek a hiba okának feltárása során. Érzékszerveink "méréstartományának bővítésére" gyakran alkalmazunk segédeszközöket is például mikrofonokat, nagyítókát, felületi érdességi etalonokat a hiba könnyebb felismerése, pontosabb

meghatározása érdekében. Objektív vizsgálati módszerről beszélünk viszont akkor, ha a vizsgált objektum állapotát mérőeszközzel, műszerrel állapítjuk meg.

A diagnosztikai információszerzés időbeli alkalmazása szerint *időszakos és folyamatos diagnosztikát* különböztetünk meg. Időszaki ellenőrzéseknél a mért jellemző trendje alapján jelezhetjük előre a meghibásodás várható időpontját. A folyamatos diagnosztikában a működés figyelését és az állapotellenőrzést beépített érzékelőkkel folyamatosan végzik, lehetőséget teremtve ezáltal a folyamatba való beavatkozásra is (a folyamatos állapotellenőrzést a *monitorozás* fogalommal jelöljük). Ha a diagnosztikában a figyelt jellemző önmagában is alkalmas az állapot jellemzésére, *szimplex diagnosztikáról* beszélünk. Gyakoribbak azok az esetek, amelyeknél a vizsgált objektum jellemzése csak több mért információhordozó jel komplex elemzéséből valósítható meg, ilyenkor *komplex diagnosztikáról* van szó.

Az anyagvizsgálati módszerek diagnosztikai célú alkalmazásait a 1.7. táblázat foglalja össze. A csoportosítás rendező elveként az alkalmazott vizsgálati módszert tekintettük.

1.7. táblázat Anyagvizsgálati módszerek diagnosztikai célú alkalmazásai

Módszerek	Vizsgálatok
Térfogati ellenőrzések	Radiográfiai vizsgálatok, ultrahangos vizsgálatok a belső hibák feltárásához, örvényáramos vizsgálatok a belső anyagfolytonossági hibák és az anyagszerkezeti elváltozások kimutatására, az anyagszerkezet kémiai, és fizikai tulajdonságváltozásainak mérése.
Felületi ellenőrzések	Szemrevételezéssel, optikai módszerekkel, endoszkópokkal, videoszkópokkal, festékdifúziós penetrációs eljárásokkal, mágneses felületi repedésvizsgálatokkal, a felületi feszültség és érdesség mérésével, holográfiai és interferencia mérésekkel.
Termikus módszerek	A hőmérséklet közvetlen érintkezéssel mérésével, vagy közvetett hőmérsékletméréssel (termovíziós módszer).
Rezgésdiagnosztikai módszerek	A hullámanálkülönbség, a hatásegyenértékűség és a következményazonosság elvén, a teljes rezgésfolyamat elemzésével, rezgésszámlálással, frekvenciaspektrum elemzés, fázisszög ellenőrzés, nyomáshullám vizsgálatára építve.
Hangemissziós vizsgálatok	A terhelés hatására bekövetkező képlékeny alakváltozások, repedés-terjedések hangeffektusai, a szivárgások, és a súrlódások hangjai alapján, vagy egyéb hangokból.
Folyamatellenőrzési módszerek	Az átmeneti anomáliák, a teljesítmény, a fogyasztás és a hatásfokváltozások figyelésével.
Közegelemzések	Mágneses detekcióval, vastartalom elemzéssel, szinképelemzésekkel, sugárzásaktivitás mérésekkel, nyomelem vizsgálatokkal, folyadék-elemzésekkel és szivárgás-ellenőrzésekkel.