SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM

ALKALMAZOTT MECHANIKA TANSZÉK

NYÚLÁS-, ELMOZDULÁS- ÉS ERŐMÉRÉS

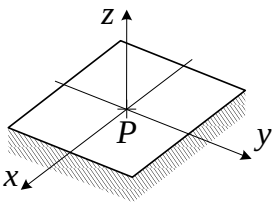
Oktatási segédlet

a Rugalmasságtan és Alkalmazott mechanika laboratóriumi mérési gyakorlatokhoz az egyetemi mesterképzésben (MSc) résztvevő mérnökhallgatók számára

1. A felületi feszültségi állapot

Gépalkatrészeknél, járműszerkezeti elemeknél gyakran előforduló eset, hogy a felületen, vagy a felület közelében alakul ki kritikus (veszélyes) feszültségi állapot és ennek következtében a felületről indul el a szerkezet tönkremenetele. Ezért fontos az alkatrészek felületén kialakuló feszültségi állapot meghatározása.

Az alkatrész terheletlen felületén kialakuló feszültségállapot:

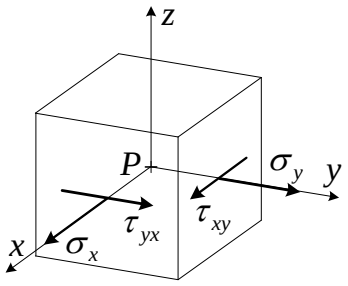


A z normálisú terheletlen külső felületen:

$$\vec{\rho}_z = \vec{0}$$

$$\Downarrow$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = \sigma_z = 0\,.$$



1. ábra: A terheletlen felületen kialakuló feszültségállapot szemléltetése

Az alkatrész terheletlen felületén feszültség nem ébred: $\vec{\rho}_z = \vec{0} \;\Rightarrow\; \tau_{xz} = \tau_{yz} = \sigma_z = 0$. Ezért a felület pontjaiban csak az *1. ábrán* látható σ_x, τ_{yx}, illetve σ_y, τ_{xy} feszültségek ébrednek.

A terheletlen felületen kialakuló feszültségi állapotot tehát a következő feszültségi tenzor írja le:

$$\left[\underset{xyz}{\underline{\underline{F_P}}}\right] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

ahol a z tengely a terheletlen felület kifelé mutató normálisa, egyben feszültségi főirány.

Az z normálisú, terheletlen felületen lévő P pont alakváltozási állapota:

$$\left[\underset{xyz}{\underline{\underline{A_P}}}\right] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix}.$$

A két tenzor koordinátái között az izotróp anyagra vonatkozó *Hooke*-törvény teremt kapcsolatot:

Az alakváltozási jellemzők előállítása a feszültségekből:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\sigma_x - \nu\sigma_y\right), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}\left(\sigma_y - \nu\sigma_x\right),$$

$$\gamma_{xy} = 2\frac{1+\nu}{E}\tau_{xy},$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}\left(\sigma_x + \sigma_y\right) = -\frac{\nu}{1-\nu}\left(\varepsilon_x + \varepsilon_y\right).$$

A feszültségek meghatározása az alakváltozási jellemzőkből:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y\right), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x\right),$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2\left(1+\nu\right)}\gamma_{xy}.$$

ahol E a rugalmassági modulus, ν a Poisson-tényező. (Acél anyagra $E \approx 2\cdot 10^5 \text{MPa}$, $\nu \approx 0{,}3$.)

A felületi feszültségi állapot nyúlásméréssel határozható meg. A nyúlásmérő bélyeges technikát a műszaki fejlesztéssel foglalkozó cégek gyakran alkalmazzák, ez az eljárás ugyanis tetszőleges alakú és terhelésű alkatrész felületén alkalmas az alakváltozási- és a feszültségi állapot meghatározására. A számítógépes módszerek elterjedésével (Pl: végeselem módszer, peremelem módszer, véges differenciák módszere, stb.) a nyúlásmérési technikát kiterjedten használják a számítások helyességének ellenőrzésére is.

Valóságos szerkezeteken / alkatrészeken feszültséget közvetlenül nem tudunk mérni! A nyúlásmérő bélyegekkel a szerkezet külső felületén különböző irányokban a *fajlagos nyúlás* értékét tudjuk mérni, és ebből a *Hooke*-törvény ismeretében a feszültségeket meghatározni.

2. A felületi alakváltozási és feszültségi állapot meghatározása nyúlásméréssel

Megfigyelés: ha megváltozik egy vezeték hossza, akkor megváltozik az elektromos ellenállása is. Az elektromos ellenállás megváltozása arányos a vezeték hosszváltozásával.

Nyúlásmérő bélyeg – a felületnek arra a pontjára kell felragasztani, ahol mérni akarunk.

Megvalósítás: Ábrázolás / jelölés:

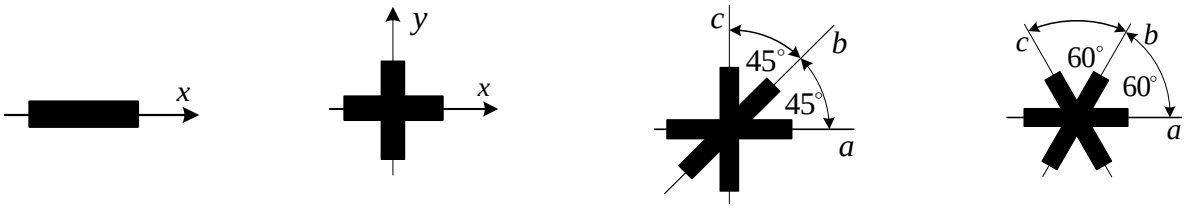
2. ábra: A nyúlásmérő bélyeg és ábrázolása

Ilyen bélyeggel egy irányban (az *x* irányban) lehet mérni fajlagos nyúlást.

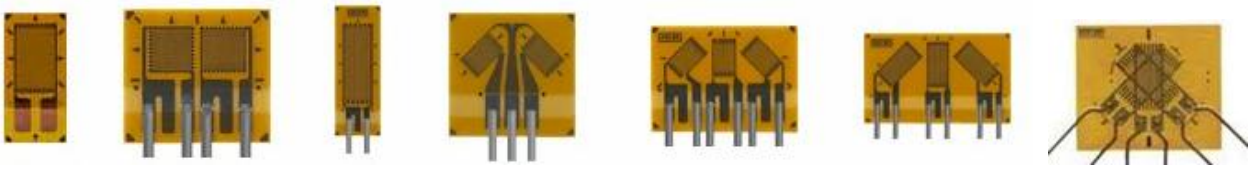
A kereskedelemben kaphatók nyúlásmérő bélyegek. Ezek között vannak olyanok, amelyek egy irányban, olyanok amelyek két irányban és olyanok is, amelyek három irányban mérnek nyúlást (*3., 4. ábra*).

A három irányban nyúlást mérő bélyegeket rozettának is szokás nevezni. Az 1. pontban ismertetett általános felületi alakváltozási / felületi feszültségi állapot rozettával határozható meg.

Egy irányú bélyeg Két irányú bélyeg 45^o-os rozetta: 60^o-os rozetta:



3. ábra: A kereskedelemben kapható nyúlásmérő bélyegek vázlata



4 ábra: Egyirányú, keresztirányú és rozetta nyúlásmérő bélyegek

A felületi alakváltozási állapot meghatározása 45°-os rozettával (3. ábra) történő mérés esetén:
A mérés eredménye: ε_a, ε_b és ε_c , ahol ε_a, ε_b, ε_c a 45°-os rozetta három nyúlásmérő bélyegének irányában mért fajlagos nyúlás érték (3. és 5. ábra).
A *z* normálisú, terheletlen felületen levő *P* pontban az alakváltozási tenzor (lásd 1. fejezet):

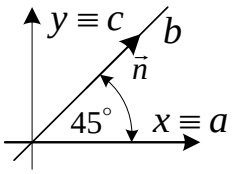
$$\left[\underline{\underline{A}}\right] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix}.$$

Az *x* és *y* irányú fajlagos nyúlásokat közvetlenül méréssel kapjuk (lásd 5. ábra):

$$\varepsilon_x = \varepsilon_a, \quad \varepsilon_y = \varepsilon_c. \tag{1.a}$$

A *z* irányú fajlagos nyúlás a Hooke-törvényből számítható: $\varepsilon_z = -\frac{\nu}{1-\nu}(\varepsilon_a + \varepsilon_c)$. (1.b)

A $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$ szögtorzulást az $\varepsilon_b, \varepsilon_a, \varepsilon_c$ fajlagos nyúlásokból számítással kell meghatározni:



A *b* irányú $\vec{n}$ egységvektor:

$$\left[\vec{n}\right] = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

5. ábra: A 45°-os rozetta mérési irányai

$$\left[\vec{\alpha}_n\right] = \left[\underline{\underline{A}}\right]\cdot\left[\vec{n}\right] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2}\varepsilon_x + \frac{\sqrt{2}}{4}\gamma_{xy} \\ \frac{\sqrt{2}}{4}\gamma_{yx} + \frac{\sqrt{2}}{2}\varepsilon_y \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\varepsilon_b = \vec{n}\cdot\vec{\alpha}_n = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2}\varepsilon_x + \frac{\sqrt{2}}{4}\gamma_{xy} \\ \frac{\sqrt{2}}{4}\gamma_{yx} + \frac{\sqrt{2}}{2}\varepsilon_y \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2}\varepsilon_x + \frac{1}{4}\gamma_{xy} + \frac{1}{4}\gamma_{yx} + \frac{1}{2}\varepsilon_y = \frac{1}{2}\varepsilon_x + \frac{1}{2}\gamma_{xy} + \frac{1}{2}\varepsilon_y \tag{1.d}$$

Az (1.d) és (1.a) egyenletekből: $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)$. (1.e)

Az alakváltozási állapot ismeretében a feszültségek a *Hooke*-törvényből állíthatók elő (lásd 1. fejezet):

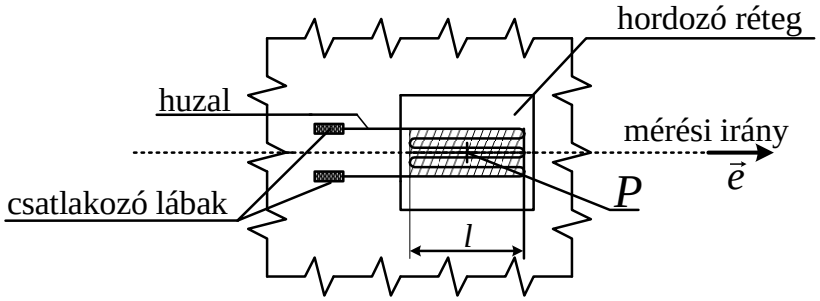
$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x), \quad \sigma_z = 0,$$
$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1-\nu)}\gamma_{xy}, \qquad \tau_{xz} = 0, \qquad \tau_{yz} = 0. \tag{2}$$

A 60^o-os rozetta mérési eredményeiből hasonló gondolatmenettel lehet a pontbeli alakváltozási állapotot meghatározni.

3. A nyúlásmérő bélyeg

Ismeretes, hogy egy huzal/vezető elektromos ellenállása függ a huzal hosszától és keresztmetszetétől: $R = \rho\frac{l}{A}$, ahol l a huzal/vezető hossza, A a huzal keresztmetszete, ρ a vezető fajlagos ellenállása. Ha a huzal hossza megnő, vagy keresztmetszete lecsökken, az ellenállása megnövekszik. Ha egy ilyen huzalt úgy rögzítünk az alkatrész felületéhez, hogy az alkatrész alakváltozását a huzal is elszenvedje, anélkül, hogy hatással lenne magának a vizsgált alkatrésznek az alakváltozására, akkor ennek a huzalnak az ellenállás-változásából következtethetünk a szóban forgó alkatrész vizsgált felületén bekövetkező alakváltozásra.

A nyúlásmérő bélyeg eredeti formájában tehát egy villamos szigetelőlapra (hordozó réteg) rögzített elektromos vezető huzal, amelynek felületére a külső hatások kizárására egy védőborítást visznek fel. A nyúlásmérő bélyeget a terheletlen alkatrész *P* pontjára ragasztjuk, pontosabban a *P* pontban az alkatrész szabad felületére (*6. ábra*).



6. ábra: A szabad felület P pontjára ragasztott egyirányú nyúlásmérő bélyeg vázlata

A ragasztónak kellően szilárdnak kell lennie ahhoz, hogy a felület alakváltozását maradéktalanul továbbítsa a mérőbélyeg hordozó rétegének. A hordozó rétegnek pedig olyan lágynak kell lennie, hogy az alkatrész alakváltozását ne befolyásolja. A nyúlásmérő bélyegek mérőelemei a nyomtatott áramköri technikának megfelelően már nem vezető huzalok, hanem az ábra alakját követő vezető fóliák, vezetőrétegek.

Az acél alkatrészek méréséhez használt nyúlásmérő bélyegek névleges elektromos ellenállása $R = 120\,\Omega$ nagyságú. A mérési hossz (a *6. ábrán l* jelöli) a mérési céltól függően $l = 0{,}3 - 100\,\text{mm}$; szokásos gépészeti feladatoknál 1-3-5-7-10 mm értékű.

Fontos megemlíteni, hogy a mérőbélyeg nem egy pontban, a *P* pontban mér, hanem a *P* pont környezetében a mérési hossznak és a bélyeg szélességének megfelelő területen méri az átlagos nyúlást. A bélyeg kialakítása biztosítja a mérőbélyeg ellenállásának nagyfokú érzéketlenségét a mérési irányra merőleges nyúlásra. A szokásos keresztirányú érzékenység tizedszázalék nagyságrendű, vagyis az

alkatrész mérési irányra merőleges nyúlása több százszor kisebb ellenállás-változást okoz, mint az ugyanakkora nagyságú, de a mérési irányba eső nyúlás.

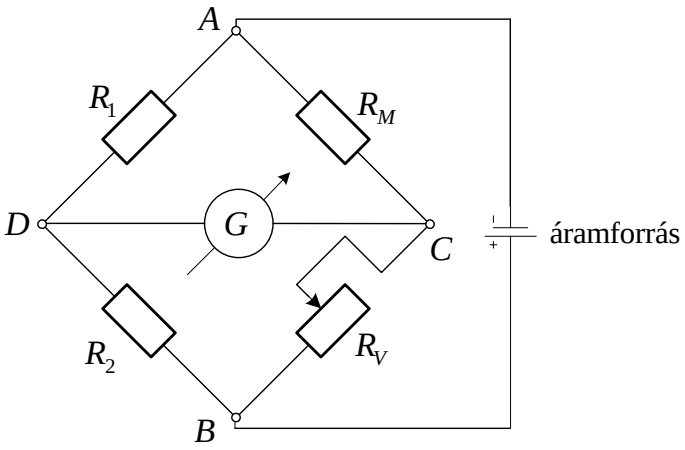
Ez alapján feltételezhetjük, hogy a jól felragasztott nyúlásmérő bélyeg elektromos vezetőjének fajlagos nyúlása megegyezik a *P* pontban, illetve a pont megfelelő környezetében a mérendő alkatrész felületén bekövetkező átlagos fajlagos nyúlással.

A bélyeg elektromos ellenállása: $R = \rho \frac{l}{A} \quad [\Omega]$, ahol *l* a vezetőréteg hossza m-ben, *A* a vezetőréteg keresztmetszete mm^2-ben, ρ a vezetőréteg fajlagos ellenállása $\frac{\Omega\,\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$ mértékegységben.

Ha a bélyeg az alkatrész terhelése közben a mérendő felülettel együtt alakváltozva megnyúlik, akkor a bélyegen lévő vezetőréteg megnyúlik, keresztmetszete lecsökken, így *R* ellenállása megváltozik. A tapasztalat szerint ez a ΔR ellenállás-változás arányos a fajlagos nyúlással: $\frac{\Delta R}{R} = k_0 \varepsilon$, ahol k_0 az ún. bélyegállandó, más néven átalakítási tényező. Mivel a k_0 bélyegállandó 2 és 2,7 közötti érték (a nyúlásmérő bélyeg típusától függő érték), ezért a relatív ellenállás-változás a fajlagos nyúlás nagyságrendjébe esik.

Az ilyen kis (tized-, század-, vagy akár ezredszázaléknyi) ellenállás-változás pontos és megbízható mérésére, az erre a célra épített mérőműszer, az ún. mérőerősítő alkalmas. A mérőerősítő működése a *Wheatstone-híd* (kiejtés: Vítszton-híd) kiegyenlítésére vezethető vissza.

Az alkatrész felületére ragasztott R_M ellenállású mérőbélyeget a bélyeg csatlakozó lábaihoz forrasztott vezetékekkel csatlakoztatva a mérőműszerbe épített három másik ellenállással ún. *Wheatstone-híd* kapcsolásba kötjük össze (*7. ábra*).



7. ábra: A mérőhíd kapcsolási vázlata

A *Wheatstone-híd A, B* kapcsaira egyenáramú áramforrást, a *C* és *D* kapcsok közé egy *G* galvanométert (érzékeny áramerősség-mérő) kapcsolunk. A mérendő alkatrész terheletlen. Az R_V változtatható ellenállást úgy állítjuk be, hogy a galvanométeren ne folyjon áram, vagyis a galvanométer mutatója $I_G = 0$ áramerősség értéket jelezzen. Ilyenkor a *C* és a *D* pont azonos potenciálon van, vagyis az ellenállásokból képzett feszültségosztókra fennáll az

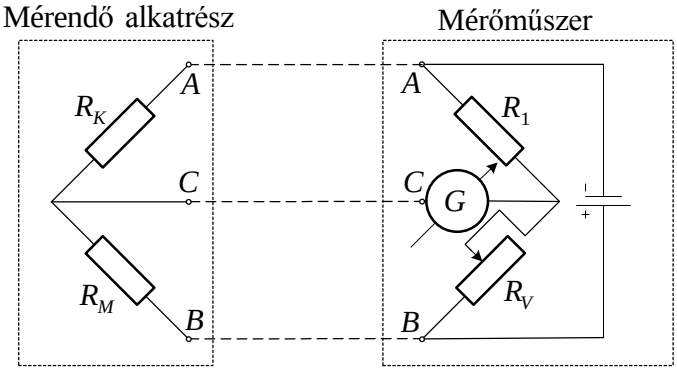
$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_M}{R_M + R_V}$$

egyenlőség. A nevezőkkel való bővítés után kiesik R_1R_M szorzat és az $R_M R_2 = R_1 R_V$, vagy az ezzel egyenértékű $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_M}{R_V}$ egyenlőséget kapjuk. Vagyis a híd szemben lévő ágaiban lévő ellenállások szorzata egyenlő. Ha teljesül az $R_1 = R_2$ egyenlőség, akkor célszerű olyan R_V változtatható ellenállást használni, melynek ellenállása a középállásban megegyezik a mérőbélyeg ellenállásával.

Ha a mérendő alkatrészt megterheljük, akkor az R_M ellenállású nyúlásmérő bélyeg megnyúlik, a híd elhangolódik és a galvanométeren áram folyik. Ekkor az R_V ellenállást ismét addig kell változtatnunk, amíg az $I_G = 0$ kiegyenlítettség be nem áll. A hangolási értéket mindkét esetben a változtatható ellenállás skálájáról tudjuk leolvasni. A leolvasás különbsége megadja, mennyi az R_V ellenállásnak a ΔR_V megváltozása a terheletlen állapothoz képest. Mivel $\Delta R_V = \Delta R_M = R_M k_0 \varepsilon$, így ebből az ε fajlagos nyúlás meghatározható.

Az R_M értékére a munkadarab hőmérsékletének változása is hatással van, mivel a hőmérséklet változásával a mérendő test hőtágulást szenved és az ebből származó nyúlást is méri a bélyeg. Ezért ezt a hatást ki kell egyenlítenünk, kompenzálnunk kell. Annál is inkább, mert a munkadarabnak már néhány Celsius fokos melegedése olyan mértékben változtatja a mérőbélyeg ellenállását, mint egy 10^{-5} nagyságrendű fajlagos nyúlás. Ekkora hőmérsékletváltozást pedig pusztán a munkadarab megvilágításával is okozhatunk.

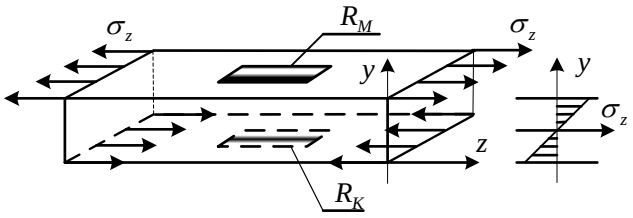
A *8. ábrán* látható mérési elrendezésben a *Wheatstone-híd* két „félhídra” oszlik. A jobboldali félhíd a mérőerősítőben foglal helyet, a baloldali félhíd mindkét ellenállása egy-egy nyúlásmérő bélyeg.



8. ábra: A mérési elrendezés kompenzációval

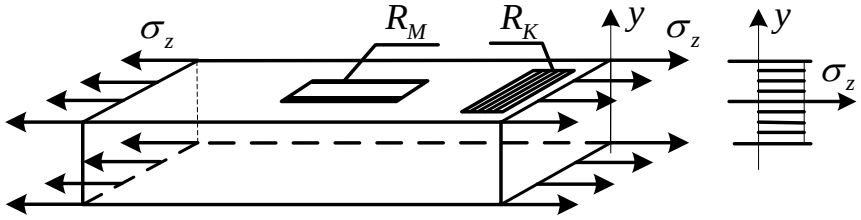
Az R_M a mérendő alkatrész alakváltozását érzékeli a terhelés megjelenésekor, az R_K kompenzátor bélyeget pedig a mérendő alkatrész környezetében olyan helyre ragasztjuk, ahol nem ébred feszültség, így nem jön létre nyúlás, de a hőmérséklet közel azonos a mérendő *P* pont környezetének hőmérsékletével. Ekkor a hőmérséklet változása miatt bekövetkező ellenállás-változások ΔR_M és ΔR_K azonos értékűek. Így a szemben lévő hídágakban az ellenállások szorzata azonos marad, nem szűnik meg a híd kiegyenlítettsége. Ezzel tehát kiküszöböltük, kompenzáltuk a hőmérsékletváltozás hatását. A *7. ábra* bal oldalán látható $R_M - R_K$ kapcsolást fél hídkapcsolásnak nevezzük.

A *9.* és a *10. ábrán* a hőmérséklet-kompenzált nyúlásmérés gyakorlati megvalósítása látható rudak két legegyszerűbb igénybevételére, a hajlításra és a húzás-nyomásra.



9. ábra: Hőmérséklet-kiegyenlítés hajlítás esetén

Ha a rúd igénybevétele tiszta egyenes hajlítás, akkor a két mérőbélyeg alkalmazása teljes mértékben kompenzálja a hőmérséklet változásának hatását, hiszen a híd szomszédos ágaiban vannak. Az alakváltozásból eredő ellenállás-változásaik viszont összeadódnak, az R_M -mel jelölt mérőbélyeg ugyanis nyúlik, vagyis ellenállása nő, míg az R_K -val jelölt hossza és ezzel ellenállása csökken. Így a híd kiegyenlítése után leolvasott ellenállás-változást osztani kell kettővel, hogy az R_M ellenállású mérőbélyegnél fellépő fajlagos nyúlást kiszámíthassuk.



10. ábra: Hőmérséklet-kiegyenlítés húzás-nyomás esetén

Ha a rúd igénybevétele húzás-nyomás, akkor a hőmérséklet-változást az *10. ábra* szerinti elrendezésben kompenzálhatjuk. A próbatestnek a terhelés irányára merőleges méretei és ezzel az R_K jelű bélyeg hossza csökkennek, amit a nyúlásmérés kiértékelésekor figyelembe kell venni. A *Wheatstone-híd* kiegyenlített állapota $R_V = R_1 \dfrac{1+k_0\varepsilon_z}{1-k_0\nu\varepsilon_z}$ esetén következik be, ami a magasabb rendű tagok elhanyagolásával az $R_V = R_1\left[1+(1+\nu)k_0\varepsilon_z\right]$ kifejezéssé egyszerűsödik. Az így kapott nyúláseredményt tehát $(1+\nu)$-vel osztani kell, hogy a ténylegesen bekövetkezett nyúlást megkapjuk (ν a Poisson-tényező).

A kereskedelemben kapható nyúlásmérő bélyegek bizonyos esetekben egyáltalán nem igénylik a hőmérsékletkiegyenlítést. A vezetőréteg anyagának gondos megválasztásával ugyanis elérhető, hogy a bélyeg anyagának a hőmérsékletváltozás miatt bekövetkező ellenállás-változása ugyanakkora abszolút értékű, de ellentétes előjelű legyen, mint az a változás, ami a mérendő alkatrész hőmérséklet-változás okozta tágulásából ered. Ha tehát valóban olyan hőtágulású anyagból készült alkatrészt vizsgálunk, amilyenre a speciális bélyeget tervezték, akkor a hőkompenzálás elmaradhat. Ezeknek a speciális bélyegeknek viszont komoly hátrányuk, hogy amennyiben nem a megfelelő anyagot vizsgáljuk velük, akkor teljesen hamis eredményt szolgáltathatnak.

A hőkompenzálásra tehát különösen ügyelni kell, ha ismeretlen hőtágulású (ismeretlen anyagú) alkatrészt vizsgálunk. Semmiképpen nem alkalmazható hőkompenzáló bélyegként a mérőbélyegtől eltérő típus, hiszen előfordulhat, hogy ezzel a kompenzálás helyett tovább növeljük a kiegyenlítetlenséget!

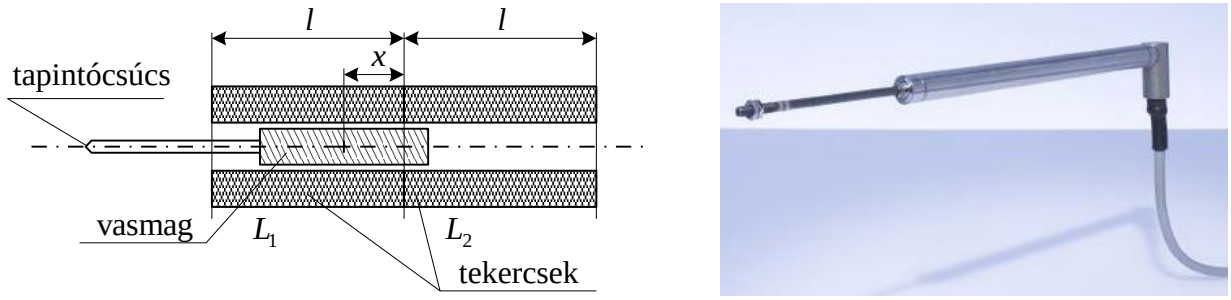
A fent leírt mérési elv az idők folyamán nem változott, de a mérőműszerek lényegesen korszerűbbek lettek. Az egyenáramú műszerek helyett váltóáramú ún. vivőfrekvenciás mérőerősítőket használunk.

A hidat csak a mérés kezdetén kell kiegyenlíteni és a kijelző skálát úgy is kalibrálhatjuk, hogy nyúlás helyett a feszültséget mutassa. A mérőműszerek / mérési adatgyüjtők egyszerre több mérőbélyeget és/vagy mérőeszközt (útadó, erőmérő cella, gyorsulásmérő, stb.) is ki tudnak szolgálni. (A többcsatornás mérőerősítő általában 6 vagy 12 csatornás, de létezik 100 csatornás mérőerősítő is.) A laboratóriumi gyakorlaton egy *Hottinger-Baldwin Messtechnik GmbH* által gyártott *Quantum 840* típusú számítógépes 6, illetve 12 csatornás mérő és méréskiértékelő műszercsoportot használunk. A csatornák egy része hőfokmérésre, illetve elmozdulás mérésre használható.

4. Elmozdulás-mérés induktív útadóval

A gépeken, szerkezeteken sok esetben olyan kis elmozdulásokat is pontosan meg kell mérni, melyek szabad szemmel észre sem vehetők. Az ilyen kis elmozdulások mérésére induktív elmozdulás-mérőt, vagy a műszaki gyakorlatban elterjedt nevén: induktív útadót használnak.

Az induktív útadó működése azon alapul (*11. ábra*), hogy egy tekercs induktivitása megnövekszik, ha ferromágneses anyagból készült tárgy közeledik hozzá. Acéltárgyak elmozdulását tehát már egy egyszerű tekercs segítségével is mérhetnénk, azonban az induktivitás a távolságnak nem lineáris függvénye, továbbá a zajszint és a pontosság rendkívüli mértékben függene a távolságtól. A gyakorlatban az úgynevezett tapintós, kettőstekercsű induktív útadó rendelkezik megfelelő linearitással és nagy mérési tartománnyal.



11. ábra: Tapintócsúcsos kettőstekercsű induktív útadó

A két tekercs belsejében mozgó vasmag pillanatnyi helyzetétől függ az L_1 és L_2 tekercs induktivitása, valamint a két tekercs kölcsönös *M* induktivitása. A tekercsek L_1 és L_2 induktivitásából, valamint az M kölcsönös induktivitásból meghatározható a vasmag *11. ábrán* látható, középhelyzettől mért *x* elmozdulása:

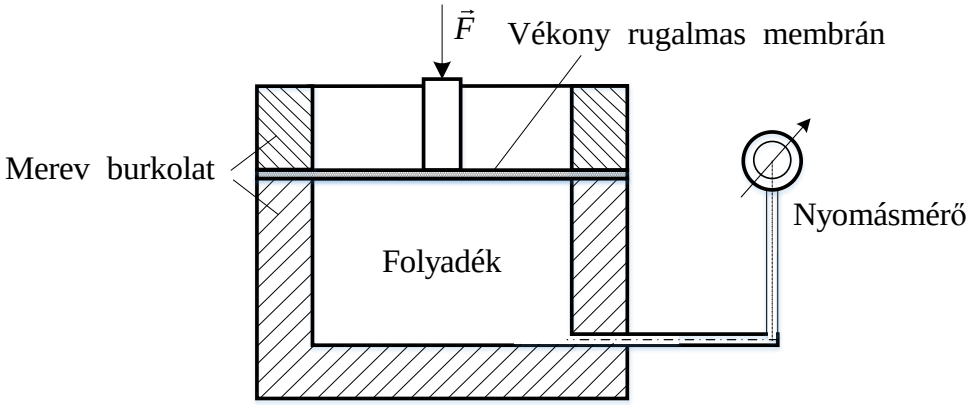
$$x = \alpha \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2 + 2M} = \alpha K, \text{ ahol } \alpha \text{ a készülékre jellemző állandó.}$$

A $K = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2 + 2M}$ mennyiség ugyanis – szemben magukkal az L_1, L_2, M induktivitásokkal - szé-

les tartományon belül lineáris függvénye az *x* elmozdulásnak. Az *x* elmozdulást a mérőerősítő a szükséges induktivitások mérése után közvetlenül szolgáltatja. Kielégítő pontosságot érhetünk el a két tekercs félhídba kapcsolásával is, ahogy a nyúlásmérő bélyeg hőmérsékletkompenzálásánál tettük. Ekkor a két induktivitás különbségét mérjük és ez a vasmag elmozdulásával arányos, feltéve, hogy ez az elmozdulás kicsi az útadó tekercseinek hosszához képest. Mivel éppen a rendkívül kicsi (legfeljebb tized, vagy század milliméternyi) elmozdulások mérése a célunk, ez a feltétel teljesül, hiszen a tekercsek 5-10 cm hosszúak.

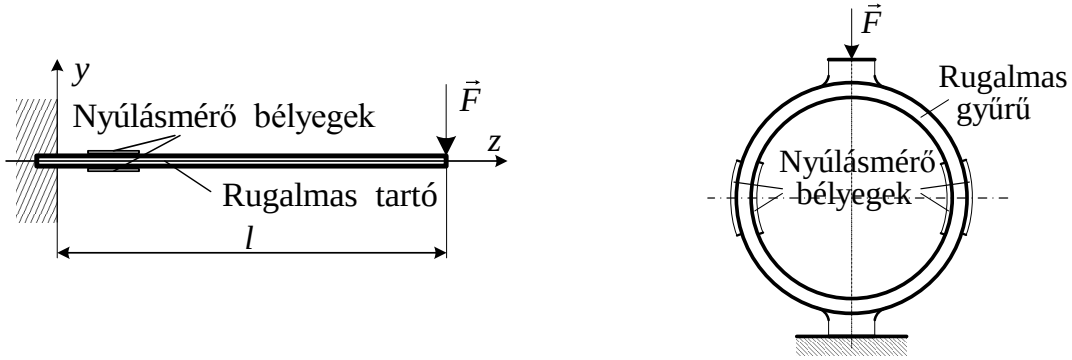
5. Erőmérés erőmérő cellával

A mérnöki gyakorlatban szintén fontos mérendő mennyiség az erő, ami egy alkatrészt, gépelemet terhel. Erő mérésére különböző elven működő erőmérő cellákat használnak. Az erőmérő cella érzékelő elemét mindig nagymerevségű burkolatban helyezik el.



12. ábra: Hidraulikus erőmérő cella

A *hidraulikus erőmérő* cellákban folyadék (olaj) az érzékelő elem (*12. ábra*). Az erő hatására alakváltozó rugalmas membrán megváltoztatja a folyadék térfogatát és ennek következtében a folyadékban fellépő nyomást. A cella folyadéknyomást méri, amiből az erő meghatározható.



13. ábra: Erőmérés rugalmas elemek (tartó, gyűrű) alkalmazásával

A *rugalmas érzékelő elemeket tartalmazó erőmérő* cella merev burkolatában leggyakrabban rugalmas tartó, vagy rugalmas gyűrű található, aminek alakváltozását nyúlásmérő bélyegek mérik (*13. ábra*). A cella a rugalmas elemeken fellépő nyúlást méri, amiből az erő meghatározható. Az ilyen elven működő erőmérő cellákra mutat példát a *14. ábra*.

A *piezoelektromos érzékelő elemet tartalmazó erőmérő* cella piezoelektromos tulajdonságú (pl. kvarc kristályokat) anyagot tartalmaz. A piezoelektromos anyagban alakváltozás hatására elektromos feszültség lép fel. A cella ezt az elektromos feszültséget méri, amiből az alakváltozás, illetve az alakváltozást létrehozó erő meghatározható.

14. ábra: Erőmérő cellák