

# A folyamatműszerezés érzékelői

## Energiaátalakulások szilárd testekben – 3.

Dr. Fock Károly

A szilárd testekben végbemenő energiaátalakulások tárgyalása során elsőként a rugalmas anyagok tulajdonságainak mérés technikai felhasználását tárgyaljuk. Az előző anyag részben bevezetett definíciók szerint most a rugalmas szilárd testekben végbemenő főhatásokról van szó. Az alapvető szilárdságtani ismeretek összefoglalása után részletesebben foglalkozunk a rugalmasan deformálódó mechanikai érzékelők legfontosabb csoportjaival: a rugókkal, a rezgésmérőkkel és a rezonátorokkal. A tárgyalás elsődleges célja a mechanikai érzékelők tulajdonságainak a bemutatása, de minden alkalommal kitérünk arra is, hogy milyen megoldásokkal lehetséges a villamos kimenőjel létrehozó érzékelőket, jelátalakítókat ezekhez csatlakoztatni.

### Mechanikai érzékelők (mech, mech, 0)

A mechanikai érzékelőknek annak ellenére van meghatározó jelentőségük a mérés technikai gyakorlatban, hogy kimenőjelük nem távadható, ami pedig napjainkban elengedhetetlen követelmény. Fontosak ezek az érzékelők abból a szempontból, hogy létezik egy sor olyan mérendő fizikai mennyiség,

amelynek a méréséhez kényszerűségből vagy célszerűségből mechanikai érzékelőket használunk. A jelfeldolgozáshoz szükséges villamos kimenőjel pedig egy további érzékelő (mech, el, 0 vagy mech, el, el) alkalmazásával nyerjük, létrehozva ezzel egy jelátalakítási struktúrát (lánc-, párhuzamos- vagy körstruktúra).

1. táblázat Mechanikai tulajdonságok műszaki alkalmazásai

	Bemenőjel	Kimenőjel	Szerkezeti kialakítás	Alkalmazás
A	Erő, nyomaték, gyorsulás	Mechanikai deformáció	Rugó	Erő-, nyomaték- és rezgésmérők
	Nyomás	Mechanikai deformáció	Membrán, zárt végű cső	Nyomásmérők
	Erő	Mechanikai rezgési frekvencia	Húr, szalag, prizmatikus tartó	Rezonátor típusú erőmérők
	Nyomás	Mechanikai rezgési frekvencia	Zárt henger	Rezgőhengeres nyomásmérők
	Erő	Felületi hullámterjedési sebesség	Rugalmas felület	Erőmérők
	Nyomás	Erő	Membrán	Nyomás-erő átalakítók
B	Elmozdulás, szögelfordulás	Elmozdulás, szögelfordulás	Fogaskerék, fogasléc, csigakerék	Áttételek, sebességváltók, hajtóművek
	Elmozdulás, szögelfordulás	Elmozdulás, szögelfordulás	Emelő	Áttételek, Áttételek
C	Áramlási sebesség	Nyomáskülönbség	Szűkítőelem	Áramlásmérők
	Elmozdulás, szögelfordulás	Áramlási sebesség	Mozgó torlótest	Szelepek
	Áramlási sebesség	Szögsebesség	Turbinakerék	Áramlásmérők, víz- és gőzturbinák, szélkerekek
	Szögsebesség	Áramlási sebesség	Turbinakerék	Szivattyúk
	Sebesség	Áramlási sebesség	Dugattyú, membrán	Szivattyúk
	Áramlási sebesség	Fluid rezgési frekvencia	Álló torlótest	Áramlásmérők
	Nyomás	Elmozdulás	Dugattyú, membrán	Dugattyús- és membránmotorok, belsőégésű motorok
	Elmozdulás	Nyomás	Dugattyú	Pneumatikus és hidraulikus tápegységek, légkompresszorok
	Áramló térfogat	Elmozdulás, szögelfordulás	Dugattyú, membrán, lapátkerék	Folyadék- és gázmennyiség-mérők
Jelmagyarázat: Érzékelők Szabályozástechnikai elemek Energetikai gépek, berendezések				

Az előző fejezetekben a termodinamikai alapok tárgyalása során az aktív érzékelőkre szűkítettük le a feldolgozásra kerülő témakört. Ezekre az érzékelőkre általánosan igaz a jeláramlás irányának a megfordíthatósága, ami nagymértékben kibővíti a felhasznált elemek alkalmazhatóságát, és a mérés technikai területen kívül más műszaki feladatokra (pl. szabályozástechnikai célokra) is felhasználhatók. Azt is érdemes észrevenni, hogy a mérés technikában használatos elemek a bennünket körülvevő műszaki környezet ma már nélkülözhetetlen szerkezeteinek, gépeinek speciális kialakítási formái. Gondoljunk csak a rugalmassági, szilárdsági tulajdonságok felhasználásával kialakított gépekre, tartószerkezetekre (hidak, daruk), az energiaellátásban alapvető víz- és gőzturbinákra, a robbanómotorokra, szivattyúkra és hajtóművekre. Az érzékelők ezeknek a gépi berendezéseknek a mérés technikai követelményrendszer előírásainak megfelelő – általában miniatürizált – változatai.

Az 1. táblázat a mechanikai érzékelőknek egy részletes összefoglalóját adja a bemenőjel–kimenőjel szerinti felbontásban. A táblázat 3. oszlopa azokat a mechanikai alapelemeket sorolja fel, amelyek ezeket a kapcsolatokat megvalósítják. Ismételten emlékeztetni szeretnénk arra, hogy az érzékelők belsejében működésük során mechanikai energiaáramlás megy végbe, de a mérés technikai gyakorlatban az információáramlás szempontjából elegendő a megfelelően kiválasztott változók közötti kapcsolat ismerete<sup>1</sup>.

A 4. oszlopban a lehetséges alkalmazásokat találhatjuk. A teljesség kedvéért a kék színnel jelölt mérés technikai alkalmazás mellett a zöld színű elemek elsősorban a jelirány-változtatás miatt létrejövő szabályozástechnikai felhasználást jelentik, míg piros színnel – a szerkezeti kialakítás nagyfokú hasonlatossága alapján – az energetikai szempontból fontos gépeket, berendezéseket tüntettük fel.

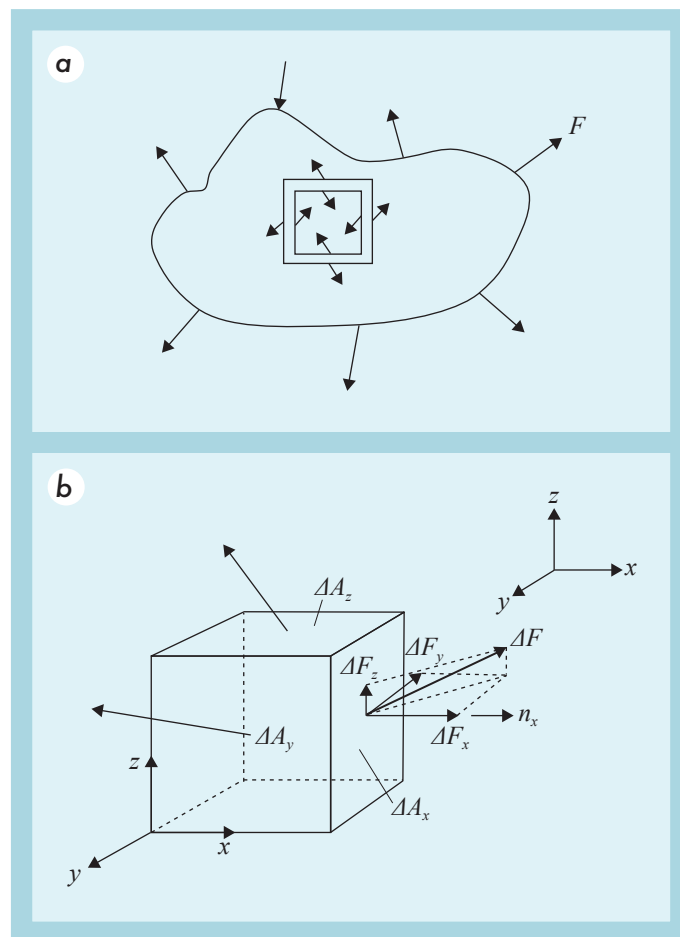
Az 1. táblázat **A** jelű soraiban felsorolt érzékelők működésére egységesen az jellemző, hogy szerkezeti kialakításukban alapvető szerepet játszik egy célszerűen kialakított rugalmas elem. **B** jelű sorokban látható szerkezeti kialakításokban a merevnek tekinthető elemek képezik a működés alapját. **C** jelű sorokban feltüntetett eszközök mindegyike pedig folyadék vagy gáz halmazállapotú, áramló közeggel áll kapcsolatban. Mérés technikai szempontból ebben a csoportban találjuk az áramlási sebesség és az áramló térfogat mérésére szolgáló mechanikai érzékelőket.

Az előző fejezetben csak azokra az érzékelőkre korlátoztuk a részletesebb elméleti vizsgálatot, amelyek jelen esetben az 1. táblázat **A** jelű csoportjába tartoznak. A tárgyalás során ismertetjük ezen érzékelők működésének alapjait, közöljük statikus vagy dinamikus karakterisztikájukat és egyéb mérés technikai tulajdonságaikat, valamint rámutatunk arra, hogy milyen módszerrel lehet ezekhez villamos kimenet jelű érzékelőket csatlakoztatni.

Mind a mechanikai érzékelők, mind a rugalmas mechanikai tulajdonságokkal kapcsolatban lévő, más működési elvű érzékelők (piezoelektromos, piezorezisztív, magnetoelasztikus stb.) működésének leírásához feltétlenül szükségesek az alapvető szilárdságtani, rugalmasságtani ismeretek, ezért elsőként a mechanikai alapfogalmakat tárgyaljuk, majd rátérünk az 1. táblázat **A** csoportjába tartozó érzékelőelemek ismertetésére.

### Mechanikai alapfogalmak

Annak érdekében, hogy az anyagok elasztomechanikai tulajdonságait le tudjuk írni, szükséges a mechanikai feszültség és mechanikai deformáció fogalmainak az ismerete.



1. ábra Gondolatkísérlet a mechanikai feszültség definíciójához

### Mechanikai feszültség

Ha egy rugalmas testre kívülről erők hatnak, akkor megváltozik a test alakja. Gondolatkísérletként vágjunk ki egy differenciálisan kis kockát egy erővel terhelt test belsejéből. A kocka élei egy derékszögű koordináta-rendszer tengelyeivel legyenek párhuzamosak (1. a ábra). Annak érdekében, hogy a külső erők által létrehozott alakváltozást megtartsuk, a kocka minden lapjára kiegészítő erőkkel kell hatnunk. Tekintettel azonban arra, hogy a rugalmas test a külső erők hatása alatt nyugalomban volt, fel kell tételezni, hogy az elemi térfogatelemre ható erők és nyomatékok is egyensúlyban vannak.

Bontsuk fel a kocka lapjaira ható erőket a lapra merőleges és a lap síkjába eső összetevőkre, ezen utóbbit pedig a koordináta-tengelyek irányába eső komponensekre (1. b ábra). Az erőkomponenseket  $\Delta F_x$ ,  $\Delta F_y$  és  $\Delta F_z$ -vel, a kocka felületeit  $\Delta A_x$ ,  $\Delta A_y$  és  $\Delta A_z$ -vel jelölve (a felületek indexei a felületi normálisok irányát jelölik), az erőkomponensek és felületek hányadosai a mechanikai feszültség definícióját.

A  $\frac{\Delta F_x}{\Delta A_x}$ ,  $\frac{\Delta F_y}{\Delta A_y}$  és a  $\frac{\Delta F_z}{\Delta A_z}$  feszültségkomponensek a kocka lap-

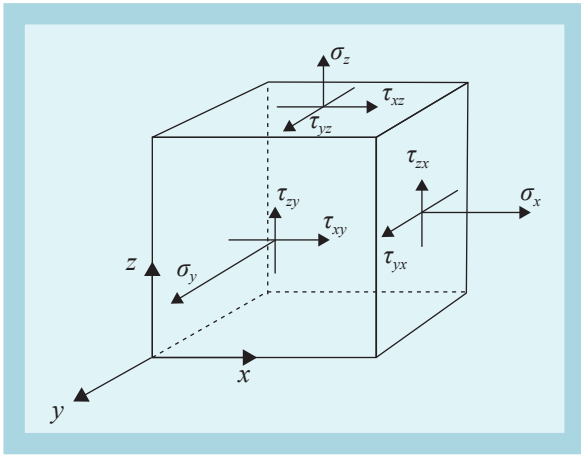
jaira merőlegesek. Elnevezésük: normál feszültség, és szokásos jelölésük rendre:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  és  $\sigma_z$ . Az index az erőkomponens és a felület normálisának irányával egyezik meg.

A lapok síkjába eső erőkomponensek és a síkba eső felü-

letek hányadosát (pl. az 1. b ábra jelöléseivel  $\frac{\Delta F_y}{\Delta A_x}$ ,  $\frac{\Delta F_z}{\Delta A_y}$ )

nyíró- vagy csúsztatófeszültségnek nevezik. Szokásos jelölésük:  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{zx}$ , stb. Az első index az erőkomponens irányára, a második a felület normálisának irányára utal.

<sup>1</sup> Vö.: Fock K.: A folyamatműszerezés érzékelői, Az érzékelők csoportosítása – 1., Magyar Elektronika 2009 (4) 23-24. old.



2. ábra A mechanikai feszültség-állapot szemléltetése

Az egyenletrendszer együtthatómátrixa általában a főátlóra aszimmetrikus, ami felbontható egy szimmetrikus és egy aszimmetrikus mátrix összegére. A szimmetrikus tag tovább bontható két olyan szimmetrikus mátrix összegére, amelyből az egyik csak a főátlóban tartalmaz elemeket, a másikkal pedig a főátlóban nincsenek elemei:

$$\begin{pmatrix} d\xi_x \\ d\xi_y \\ d\xi_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \xi_x}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \xi_y}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial \xi_z}{\partial z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_x}{\partial z} + \frac{\partial \xi_z}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_x}{\partial y} + \frac{\partial \xi_y}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_z}{\partial x} + \frac{\partial \xi_x}{\partial z} \right) & 0 & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_z}{\partial y} + \frac{\partial \xi_y}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_y}{\partial x} + \frac{\partial \xi_x}{\partial y} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_y}{\partial z} + \frac{\partial \xi_z}{\partial y} \right) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_x}{\partial z} - \frac{\partial \xi_z}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_x}{\partial y} - \frac{\partial \xi_y}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_z}{\partial x} - \frac{\partial \xi_x}{\partial z} \right) & 0 & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_z}{\partial y} - \frac{\partial \xi_y}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_y}{\partial x} - \frac{\partial \xi_x}{\partial y} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_y}{\partial z} - \frac{\partial \xi_z}{\partial y} \right) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$$

Az egyenlet egyes tagjainak fizikai jelentése a következő:

Az első mátrix elemei megadják a tér három irányában a relatív hosszváltozásokat, amelyeket normál nyúlásoknak nevezünk és szokásos jelölésük:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial \xi_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial \xi_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial \xi_z}{\partial z}$$

A normál nyúlások dimenziótlan mennyiségek.

Az egyenlet második tagját képező mátrix elemei az eredetileg egymással derékszöget bezáró térfogatelem-oldalak szögváltozását jelentik. Ilyen alakváltozás nyírás esetén fordul elő, elnevezésük nyíró- vagy csúsztató deformáció. A

$$\begin{pmatrix} \varphi_{xs} \\ \varphi_{ys} \\ \varphi_{zs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_y}{\partial z} + \frac{\partial \xi_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_z}{\partial x} + \frac{\partial \xi_x}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi_x}{\partial y} - \frac{\partial \xi_y}{\partial x} \right) \end{pmatrix}$$

jelölésekkel (ahol  $\varphi_{xs}$ ,  $\varphi_{ys}$ , és  $\varphi_{zs}$  rendre a határoló lapok  $x$ ,  $y$  és  $z$  tengely körüli elfordulását jelentik) **egy elemi térfogatelem deformációját** a

$$\begin{pmatrix} d\xi_x \\ d\xi_y \\ d\xi_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varphi_{ys} & \varphi_{zs} \\ \varphi_{ys} & \varepsilon_y & \varphi_{xs} \\ \varphi_{zs} & \varphi_{xs} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$$

egyenletrendszerrel írhatjuk le. A szimmetriából következően a deformációra jellemző mátrix 6 független elemet tartalmaz.

Az egyenlet harmadik tagja a deformálódott térfogatelemnek a koordináta-rendszer origója körüli forgását írja le, ami a további vizsgálat szempontjából érdektelen. Az elmondottakat jól szemlélteti az 5. ábra, amelyen az elemi kocka  $x$ - $z$  síkban lévő lapja deformációját láthatjuk együttesen (a jelű ábra) és – az egyenlet szerinti – lépésekre bontva (b, c és d jelű ábrák).

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu

A kivágott elemi kocka egyensúlyából következik, hogy  $|\sigma_x| = |\sigma_x|$ ,  $|\sigma_y| = |\sigma_y|$ ,  $|\sigma_z| = |\sigma_z|$ , továbbá  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$  és  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ , feltételeknek teljesülnie kell. Ennek az a következménye, hogy a kocka feszültségállapotának a leírásához hat független adatnak, a normálfeszültségeknek és a csúsztatófeszültségekből háromnak az ismerete szükséges (és elegendő). A mechanikai feszültség dimenziója: [N/m<sup>2</sup>]. A fentiekben definiált feszültségkomponensek alkotják a (T) feszültségtenzort, és a 2. ábra foglalja össze elemeinek a jelentését.

$$(T) = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad \text{ahol} \quad \begin{matrix} \tau_{xy} = \tau_{yx} \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} \end{matrix}$$

**Mechanikai deformáció**

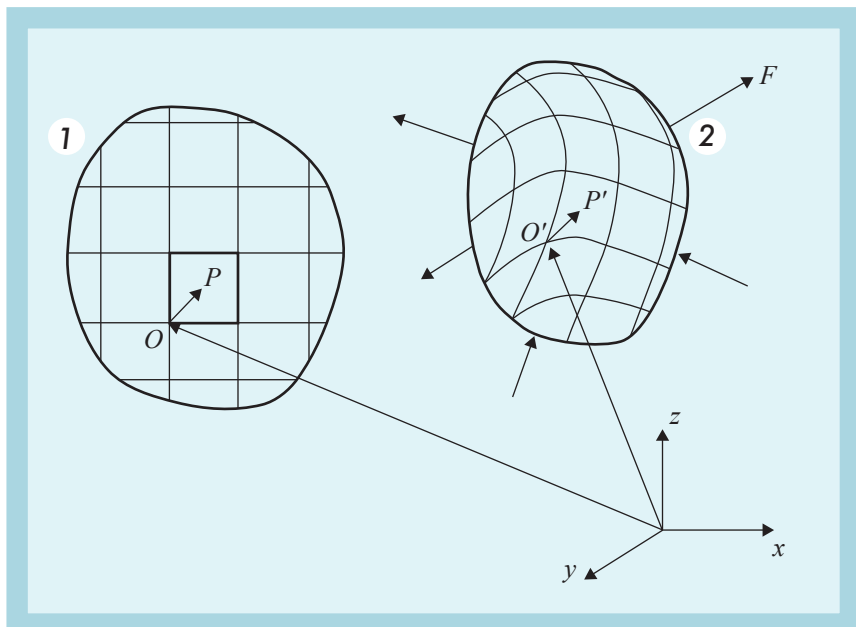
Jelöljük ki egy rugalmas test belsejében terhelésmentes állapotban egy elemi térfogatelemet (3. ábrán az 1 jelű állapot). Külső erők hatására egy deformáció keletkezik, ami együtt jár a test helyzetének a megváltozásával is (3. ábra 2 jelű állapot). Megváltozik ezáltal az elemi kocka helyzete is, feltehetően el is fordul, valamint alakja deformálódik. A továbbiakban számunkra érdektelen a helyzetváltoztatás és a forgás. A deformáció definíciójához csak az alakváltozás az érdekes, amit az elemi kocka éleinek a hosszúságváltozásaként és lapjai között mérhető derékszögeknek kisméretű megváltozásaként érzékelhetünk.

A leíráshoz vizsgáljuk meg a térfogatelem belsejében lévő P pont helyzetének a deformáció során bekövetkező megváltozását. A 4. ábra alapján jelöljük a deformáció előtt a térfogatelem belsejében levő P pont koordinátáit a kocka csúcspontjától mérve a  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  és  $\Delta z$  rendezőkkel. A mechanikai terhelés hatására a P pont a P' helyre kerül. A  $\bar{d}\xi$  elmozdulás komponensei rendre  $d\xi_x$ ,  $d\xi_y$  és  $d\xi_z$ , és a P' pont koordinátái:

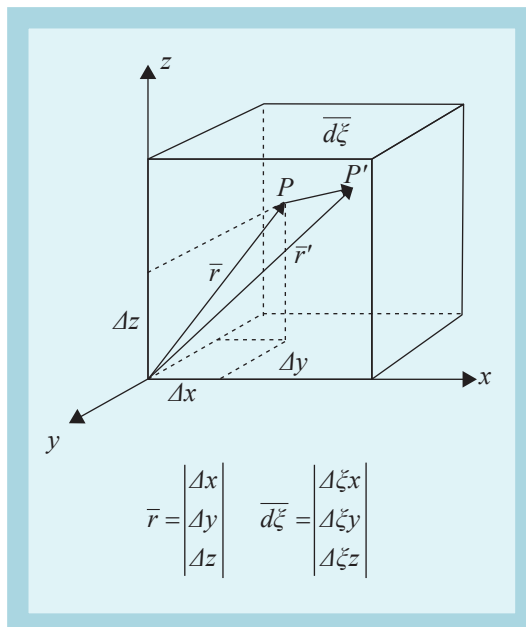
$$\begin{matrix} \Delta x' = \Delta x + d\xi_x \\ \Delta y' = \Delta y + d\xi_y \\ \Delta z' = \Delta z + d\xi_z \end{matrix}$$

Kis torzulás és kellően kis méretek esetén a  $\bar{d}\xi$  deformáció jó közelítéssel az  $\bar{r}$  helyzetvektor rendezőinek lineáris kombinációjaként adható meg az alábbi egyenletrendszer szerint:

$$\begin{pmatrix} d\xi_x \\ d\xi_y \\ d\xi_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$$



3. ábra Térfogatelem helyzetváltozása, elfordulása és deformációja a mechanikai terhelés hatására



4. ábra Térfogatelem deformációja

5. ábra Rugalmas test deformációjának összetevői a) teljes deformáció b) nyúlás c) nyírás d) forgás

