



E1/M1/T1

Változat: 1.2

Kiadva: 2021. február 4.

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK**

T épület földszint

Szakítás - kúszás

POLIMEREK MECHANIKAI VIZSGÁLATA

**A JEGYZET ÉRVÉNYESSÉGÉT A TANSZÉKI HONLAPON KELL ELLENŐRIZNI!
WWW.PT.BME.HU**

1. A gyakorlat célja

A mérés célja, hogy a hallgatók polimer anyagú próbatesteken elvégezzék a szakítóvizsgálatot, illetve a kúszásvizsgálatot. Ezen keresztül megismerjék a szakítóvizsgálat során a polimer anyagok esetén tapasztalható jelenségeket (pl. nyakképződés), illetve a műanyagok fémekhez képesti eltérő viselkedését. A gyakorlat célja továbbá a kúszásvizsgálat alapján a polimerek deformáció-komponenseinek meghatározása is.

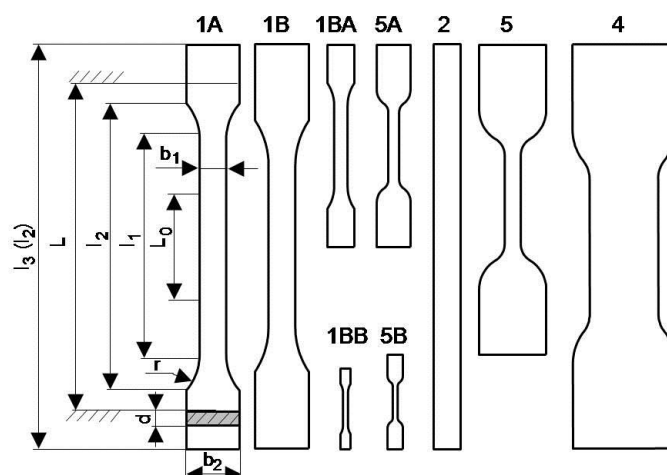
2. Elméleti háttér

A szakítóvizsgálat során a szabványban leírt geometriájú próbatestet két végénél befogva, meghatározott mérési körülmények (szakítási sebesség, hőmérséklet, nedvességtartalom) között, egytengelyű húzó igénybevétel mellett szakítjuk el, eközben mérjük és regisztráljuk a hosszváltozás függvényében fellépő húzóerőt ([videó](#)). Ahhoz azonban, hogy egy húzó igénybevételnek kitett polimer alkatrészt méretezzünk, nem elég pusztán az adott igénybevétel (erők, nyomatékok, hőmérséklet stb.) figyelembevétele, ugyanis a polimerek tulajdonságai időfüggőek. A mindennapi és műszaki életben használt polimer alkatrészek rendeltetésszerű használat esetén általában tartós mechanikai terhelésnek, igénybevételnek vannak kitéve, és erre folyamatos alakváltozással reagálnak (pl. a polc lehajlása a könyvek alatt). A kúszás során a (polimer) anyag deformációja, nyúlása az időben folyamatosan nő, annak ellenére, hogy terhelése állandó ([videó](#)). Míg a szakítóvizsgálat során a polimer termék állandó sebességű húzó igénybevételnek van kitéve (a húzás sebessége állandó, eközben a feszültség változhat), addig a kúszásvizsgálat során a húzófeszültség időben állandó. Az anyag válasza erre az ún. kúszás-gerjesztésre a kezdeti ugrásszerű deformációt követő, az időben folyamatosan növekvő deformáció.

3. A próbatest

A polimerek egyik sajátossága, hogy a szakítódiagramjuk, és így a belőle meghatározható mechanikai jellemzőik függenek a próbatest alakjától és méreteitől. A gyakorlatban kör és téglalap keresztmetszetű próbatesteket alkalmaznak, polimer anyagoknál a téglalap keresztmetszet terjedt el jobban. A szabványos próbatestek az anyag típusától függően eltérő kialakításúak lehetnek (1. ábra). Arra, hogy egy adott anyagtípusnál melyik típusú próbatestet kell használni, az MSZ EN ISO 527-es szabvány tartalmaz előírásokat és ajánlásokat [1], a pontos méreteket szintén szabványok rögzítik. Hőre lágyuló polimer anyagok esetében az 1A típusú (általános) fröccsöntött próbatestet szokták

használni. Amennyiben nem az alapanyagot általánosságban, hanem egy konkrét gépelemet, alkatrész anyagát szeretnénk jellemezni, akkor a próbatest kimunkálható belőle forgácsolással is (1B, 1BA, 1BB típusok). Hőre keményedő mátrixú polimer kompozitoknál (*részletesebben E5/M5 laborgyakorlat*) rendszerint a 2-es típust használják.



1. ábra Próbatest húzóvizsgálati típusok

A polimer próbatestek általános jellegzetessége, hogy piskóta alakúak. Teljes hosszúságuk $l_3 \geq 150$ mm, a befogási hossz, vagyis a befogó szerkezetek kezdeti távolsága 115 mm. A próbatestek keresztmetszete tipikusan 4×10 mm ($d \times b_1$), míg a végeiken kiszélesednek. A piskóta alak segít elkerülni, hogy a próbatest a merev befogások közvetlen közelében szakadjon el. Polimer mátrixú kompozitoknál (2-es típus) gyakran utólag ragasztanak fel ún. végfüleket (tabokat) hasonló célból.

A fröccsöntött termékeknel a gazdaságos előállítás érdekében általában ún. többfészkes szerszámokat használnak, így egyszerre több terméket (itt próbatest) tudnak előállítani. A fröccsöntés módja és a meglövés iránya jelentős hatással lehet a próbatest tulajdonságaira.

4. A szakítóvizsgálatból meghatározható mechanikai jellemzők

A szakítóvizsgálat eredményeként az adott mérési körülményekre vonatkozóan megkapjuk az anyag erő-nyúlás ($F-\Delta l$) görbét. Ezt egyszerűen át lehet paraméterezni mérnöki feszültség-relatív nyúlás ($\sigma-\varepsilon$) görbévé (2. ábra): az erő-tengely helyén a mérnöki feszültséget (σ [MPa]) megkapjuk, ha az erőt (F [N]) osztjuk a próbatest kezdeti keresztmetszetével (A_0 [mm²]):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [MPa]}, \quad (1)$$

a relatív nyúlás (ε) pedig a próbatest megnyúlásának (Δl [mm]); $\Delta l = L - L_0$, ahol L a próbatest aktuális hossza) és a kezdeti mérési hosszának (L_0 [mm]) a hányadosa:

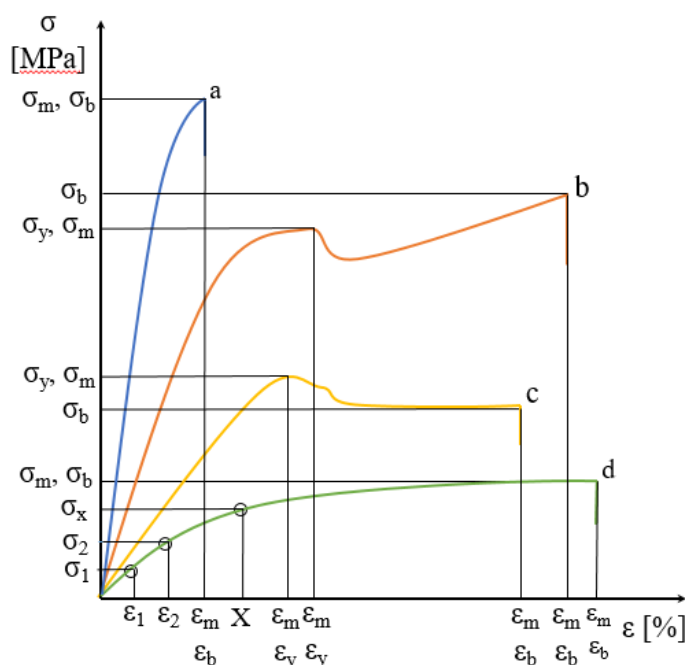
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \cdot 100 [\%]. \quad (2)$$

A szakítóvizsgálat során regisztrált erő-nyúlás görbéből (illetve az ebből képezhető feszültség-relatív nyúlás görbéből) a következőkben ismertetett mechanikai mennyiségeket lehet leolvasni. A legáltalánosabb szakítógörbe alak a 2. ábrán a „b”-vel jelölt görbe, érdemes azt tanulmányozni a következő fogalmak megértéséhez:

σ_M húzószilárdság: A szakítógörbe első lokális maximumánál ébredő (mérnöki) feszültség. Ez a feszültség egybeeshet a folyási feszültséggel (σ_Y , „b” és „c” görbe), vagy a szakítószilárdsággal (σ_B , „a” görbe).

σ_B szakítószilárdság: közvetlenül a szakadás (próbatest kettéválása) előtt mért erő és a kezdeti keresztmetszet hányadosa.

σ_Y folyási feszültség: az az első feszültség, amelynél a nyúlás a feszültség növekedése nélkül növekszik. Fémes szerkezeti anyagoknál a folyási feszültség egy éles határ (folyáshatár): alatta rugalmas, míg felette képlékeny alakváltozás jelentkezik. A viszkoelasztikus viselkedésű polimereknél már rendszerint kis feszültségeknél is maradó alakváltozások alakulnak ki, tehát folyáshatár nincsen, sőt a gyakorlatban bizonyos polimereknél fel sem lép a folyási jelenség.



2. ábra Polimerek szakítógörbéi. a) rideg (üvegszerű) viselkedés (video), b) és c) nyakképződést mutató viselkedés (video) d) lágy, gumiszerű viselkedés (video) nagy (>50%) szakadási nyúlással

Nyúlás a maximális erőnél (ε_M):

$$\varepsilon_M = \frac{L_M - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%], \quad (3)$$

ahol L_0 a próbatest vizsgált szakaszának eredeti terheletlen hossza, L_M a próbatest vizsgált szakaszának a maximális erőnél mért megnyúlt hossza.

Szakadási nyúlás (ε_B):

$$\varepsilon_B = \frac{L_B - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%], \quad (4)$$

ahol L_B : a próbatest vizsgált szakaszának a szakadáskor mért megnyúlt hossza.

A $\sigma(\varepsilon)$ szakítógörbe karakterisztikája jól jellemzi az anyag viselkedését. A nagy szakadási nyúlású anyagok szívósan viselkednek, míg a kis szakadási nyúlásúak ridegek. Ha a görbe meredeken „indul”, akkor merev az anyag, kis meredekség esetén pedig lágy. Ezért nélkülözhetetlen műszaki jellemző a húzási rugalmassági modulus, amely a szakítógörbe meredekségét fejezi ki és ezen keresztül azt, hogy egy adott erőterhelésre mekkora nyúlással reagál az anyag. Van, ahol nagy merevségre van szükség (nagy modulus), míg máshol éppen nagy alakváltozást szeretnénk kis erővel elérni (kis modulus). A $\sigma(\varepsilon)$ görbéből különböző módokon lehet meghatározni az anyag **húzási rugalmassági modulusát (E)**.

Kezdeti húzási rugalmassági modulus (E_0): a feszültség - relatív nyúlás görbe origójába húzott érintőjének meredeksége. Ha a görbe kezdőpontjához nem pontosan húzzuk be az érintőt, akkor a pontos érintőtől való kis eltérés is nagy pontatlanságot eredményez a húzási rugalmassági modulus értékében, ezért ezt a gyakorlatban ritkán használjuk.

$$E_0 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

Húr modulus (E_h): a görbe tetszés szerinti (de jellemzően a kezdeti szakaszon megválasztott) két pontját összekötő egyenes meredeksége (vö. 2. ábra, d görbén felvett két pont). A vonatkozó szabvány szerint a 0,05% és 0,25% relatív nyúlásértékhez tartozó görbepontokon átmenő egyenesnek a meredekségét kell meghatároznunk, vagyis az általános érvényű

$$E_h = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

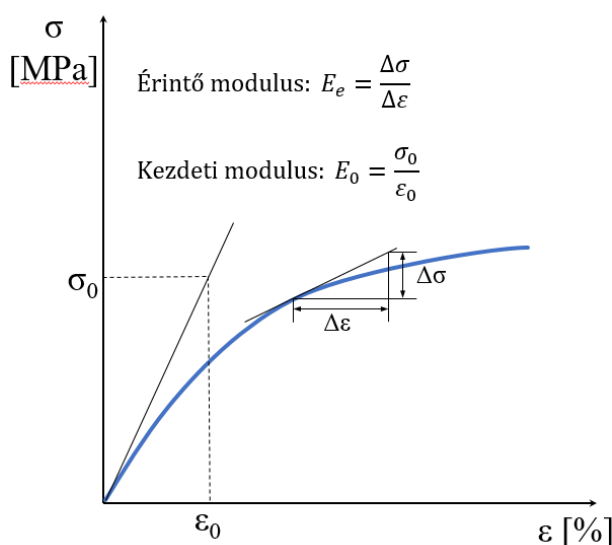
összefüggésbe a $\sigma_2 = \sigma_{0,0025}$ és $\sigma_1 = \sigma_{0,0005}$ mért értékeket helyettesítjük, valamint az $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ kifejezés értéke ebben az esetben 0,002. A húr modulus egyik esete, amikor a görbe tetszés szerinti pontját az origóval összekötő egyenes meredekségét határozzuk meg, ez természetesen pontról pontra változik.

Érintő modulus (E_e): a görbe tetszőleges pontjához húzott érintő meredeksége. Mivel a szakítógörbe általában már a kezdeti szakaszban sem lineáris (ellentétben a fémekével), így érintőjének meredeksége is pontról pontra változik (3. ábra).

Törési munka (W_B): Az $F(\Delta l)$ szakítógörbe alatti terület a szakításra fordított munka:

$$W_B = \int_0^{\Delta l} F \cdot dl \quad [\text{J}], \quad (7)$$

A törési munka rideg anyagoknál kisebb, szívós anyagoknál nagyobb. A törési munka és a rugalmassági modulus általában egymással fordítottan arányos. Mivel a gépészeti alkalmazások többségénél egyaránt nagy rugalmassági modulusú, ugyanakkor nagy szívósságú anyagokra van szükség, ezért a tervezésnél kompromisszumot kell kötni, és az adott szerkezetre optimálva kell megválasztani az adott mechanikai tulajdonságokkal rendelkező anyagot.



3. ábra Kezdet és érintő modulus meghatározása

5. A polimerek deformáció komponensei

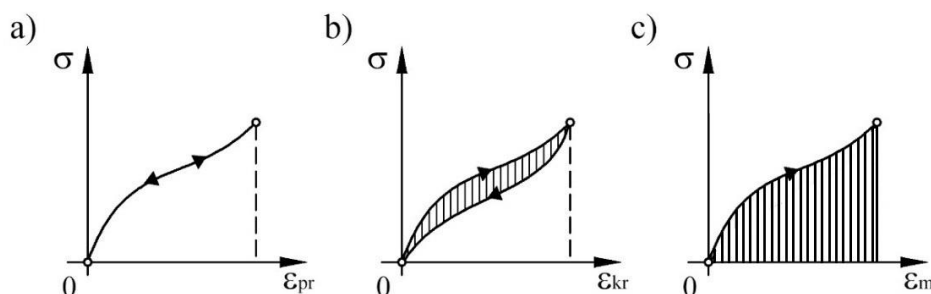
A rugalmas viselkedés során az anyag a deformációkra azonnal reagál (elasztikus viselkedés), míg a viszkózus viselkedés során az anyag válasza időigényes, a deformációk kialakulásának megfigyelhető sebessége van. A polimer anyagok többsége ezeket a viselkedéseket egyszerre mutatja (**viszkoelaszticitás**) és éppen ezért időfüggő tulajdonságokkal rendelkeznek. A viszkoelasztikus

viselkedés a polimer molekulák mozgékonyaságából eredeztethető, a polimerek feszültség-deformáció kapcsolata sok tekintetben eltér a fémekétől. A viszkoelaszticitás olyan mechanikai jelenségekhez vezet, mint a nemlineáris feszültség-deformáció kapcsolat, valamint annak a hőmérséklettől, a terhelési szinttől és az igénybevétel időtartamától való függése.

A polimer anyagok esetében e meglehetősen bonyolult kapcsolatrendszer leírási módjai közül az egyik irányzat az, hogy az összetett viselkedést olyan ideális tulajdonságok kombinációjaként kezelik, amelyek mindig egyszerre érvényesülnek. Az egyik ilyen közelítés szerint azt feltételezzük, hogy az adott igénybevétel hatására kialakuló ε -összdeformáció egy ún. ε_{pr} -pillanatnyi rugalmas, egy ε_{kr} -késleltetett rugalmas és egy ε_m -maradó deformáció komponensből tevődik össze (8):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{pr} + \varepsilon_{kr}(t) + \varepsilon_m(t) \quad (8)$$

A fenti, idealizált deformáció komponensekre nézve a fel- és leterhelésekre vonatkozó feszültség-deformáció kapcsolatokat rendre a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra A polimerek deformáció komponensei

(a) A **pillanatnyi rugalmas** deformáció komponens - amely mikroszerkezeti az atomtávolságok és vegyértékszögek megváltozásához kapcsolódik - pillanatszerűen, késleltetés nélkül alakul ki a terhelés pillanatában, és ugyancsak késleltetés nélkül alakul vissza a terhelés megszűntével, azaz időtől független, és a fel- és a leterhelési görbék egybeesnek (4.a ábra). A terhelés során kialakult deformáció és a befektetett deformációs munka is teljes mértékben visszaalakul, ezért e komponens mechanikailag és termodinamikailag is reverzibilis.

A deformáció komponens legegyszerűbb mechanikai modellje a Hooke-törvényt követő ideális rugó (1. táblázat), amely - lineáris karakterisztikája révén – a 4.a ábrához képest további egyszerűsítést, idealizálást jelent.

(b) A **késleltetett rugalmas** komponens, amely mikroszerkezeti a feszültség hatására a molekulaláncok kigöngyölödéséhez, illetve visszagöngyölödéséhez kapcsolódik, a terhelés folyamán késleltetve alakul ki, és a terhelés megszűnte után késleltetve alakul (teljes mértékben) vissza, azaz időfüggő, és a fel- illetve leterhelés görbéi nem esnek egybe (hiszterézis). A hiszterézis-hurok területe

a hővé alakult, veszteségi deformációs munkahányaddal arányos (4.b ábra). E komponens mechanikailag reverzibilis, de termodinamikailag irreverzibilis.

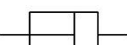
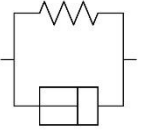
E deformáció komponens legegyszerűbb modellje a rugó és a viszkózus elem párhuzamos kapcsolásával kapható Kelvin-Voigt elem (1. táblázat).

(c) A **maradó deformáció** komponens, amely mikroszerkezeti szinten a molekulaláncok egymáshoz képesti elcsúszásához, maradó elmozdulásához kapcsolódik, a terhelés folyamán folyamatosan alakul ki, időben halmozódik és a terhelés megszüntetése után a kialakult deformáció-érték megmarad. A fel- és leterhelés görbéi nem esnek egybe, sőt az utóbbi elfajul, és a befektetett deformációs munka teljes egészében hővé alakul (4.c ábra). Következésképpen, e komponens mind mechanikailag, mind termodinamikailag irreverzibilis.

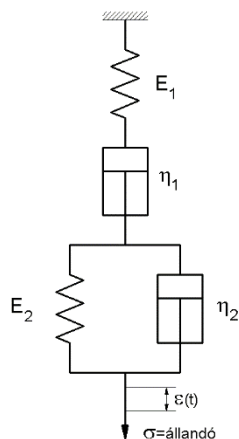
E deformáció komponens legegyszerűbb - szintén további idealizálási lépést jelentő - modellje a Newton-törvényt követő viszkózus elem (1. táblázat).

Összefoglalva tehát: a viszkoelasztikus polimer anyagok mechanikai tulajdonságait különböző mechanikai modell-elemekkel írhatjuk le (1. táblázat). Az egyik ilyen alapmodell a Hooke-törvényt ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) követő ideálisan rugalmas rugó, amely a pillanatnyi rugalmas deformáció komponensét modellezi. A Newton-törvényt ($\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$) követő ideálisan viszkózus folyadékkal töltött dugattyús henger a maradó deformáció komponensét modellezi. Az ideális rugót az E rugalmassági modulussal, míg a viszkózus elemet a hengerben lévő folyadék η dinamikus viszkozitási tényezőjével jellemezhetjük. Ezek a mechanikai modellek paraméterei. Az előbbi két modell párhuzamos kapcsolásával kapható a Kelvin-Voigt elem, amely a polimer anyagok egy sajátos jellemzőjét, a késleltetett rugalmas deformáció komponensét modellezi.

1. táblázat. A deformáció komponensek modellezéséhez használt elemek

Deformáció komponens neve	Jele	Modell	Ábrázolás, paraméter(ek)
pillanatnyi rugalmas deformáció	ε_{pr}	Hooke-törvényt követő rugó	 E
maradó deformáció	ε_m	Newton-törvényt követő viszkózus elem	 η
késleltetett rugalmas deformáció	ε_{kr}	Kelvin-Voigt elem (rugó és viszkózus elem párhuzamosan kapcsolva)	 E η

A fenti modellelemek sorba kapcsolásával kapjuk a Burgers-féle négyparaméteres modellt (5. ábra), amely a legkisebb elemszámú modell az amorf termoplasztikus polimerek kúszási viselkedésének minőségi leírásához ([videó](#)).



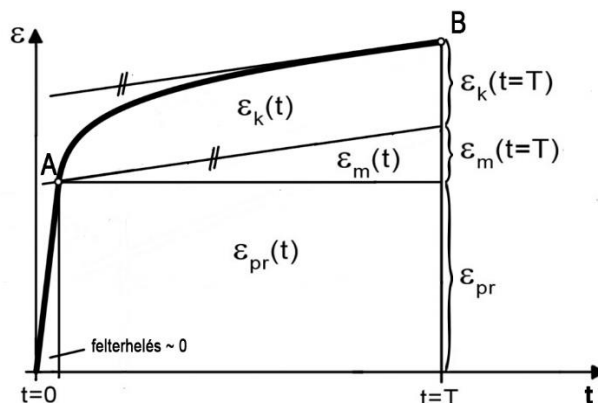
5. ábra Burgers-modell

6. A deformáció komponensek meghatározása a kúszásvizsgálatból

A kapott nyúlás-idő diagram függőleges (nyúlás) tengelyét az alábbi összefüggésnek megfelelően a további számításokhoz szükséges $\varepsilon(t)$ relatív nyúlásra léptékezzük át:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_0}$$

Az átparaméterezett diagramból szerkesztéssel könnyen meghatározhatók az adott polimer deformáció komponensei (6. ábra). (Megjegyzés: a felterhelés elméletileg pillanatszerű, ezért függőlegesnek kellene lennie. Azonban a valóságban ez mindig eltér a függőlegetől, mert a terhelés ráadáshoz egy bizonyos időre van szükség.)



6. ábra A felvett kúszási görbe kiértékelése

Első lépésben a kúszásgörbe végétől (B) merőlegest bocsátunk a vízszintes tengelyre. Ezt követően a görbén bejelöljük azt a pontot, amelynél a görbe eltér az egyenestől (A), majd ebből a pontból vízszintes egyenest húzunk, amely az előző lépésben behúzott függőleges egyenesből kimetszi a pillanatnyi rugalmas alakváltozással (ϵ_{pr}) arányos szakaszt. A következő lépésben a görbe ,B' pontjához érintőt húzunk, majd ezzel párhuzamost szerkesztünk az ,A' ponton keresztül. Így meghatározható a maradó (ϵ_m) és a késleltetett rugalmas deformáció (ϵ_{kr}) is.

7. Felhasznált irodalom

1. EN ISO 527:2012 szabvány: Szakítóvizsgálat
2. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000
3. EN ISO 899 szabvány: Kúszásvizsgálat
4. Hütte: A mérnöki tudományok kézikönyve, Springer-Verlag, 1993

A segédletben szereplő, a tananyag megértését segítő videók QR-kódja:

Szakítóvizsgálat



Nyakképződés



PMMA
szakítóvizsgálat



EPDM
szakítóvizsgálat



Deformáció
komponensek
modellezése



Ezt az oldalt
kinyomtatva
hozza
magával!

MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV

Név:

Jegy:

Neptun kód:

Dátum:

Ellenőrizte:

Gyakorlatvezető:

1. Gyakorlaton elvégzendő feladatok

- Különböző polimer próbatestek szakítóvizsgálatának elvégzése.
- A regisztrált erő-nyúlás görbék alapján a főbb mechanikai jellemzők kiszámítása.
- Polimerek kúszásvizsgálata, deformáció komponensek meghatározása szerkesztéssel.

2. Alapadatok

Környezeti hőmérséklet, T: [°C]
 Környezeti relatív légnedvesség: [%]
 A próbatestek keresztmetszete: [mm²]
 Mérési (befogási) hossz, l₀: [mm]

3. Mérések kiértékelése, vizsgálati körülmények hatásainak elemzése

No.	szakítási sebesség [mm/min]	F _M [N]	σ _M [MPa]	F _B [N]	σ _B [MPa]	ε _M [%]	ε _B [%]	E ₀ [GPa]
1								
2								
3								
4								
5								

Ezt az oldalt
kinyomtatva
hozza
magával!

Kúszásvizsgálat:

A próbatest anyaga:		
Keresztmetszet, A (a x b)	=	mm ²
A próbatest mérési hossza, l ₀	=	mm
Terhelés	=	N
Feszültség	=	MPa
Mérési idő	=	s

4. A mért és számított eredmények

[mm]	[-]
$\Delta l_{\delta}(T) =$	$\varepsilon_{\delta}(T) =$
$\Delta l_{pr}(T) =$	$\varepsilon_{pr}(T) =$
$\Delta l_m(T) =$	$\varepsilon_m(T) =$
$\Delta l_{kr}(T) =$	$\varepsilon_{kr}(T) =$