

Műszaki műanyagok terhelési sebességtől függő alakváltozási és folyási jellemzőinek meghatározása

Major Zoltán*

Bevezetés

A műanyagok műszaki alkalmazásának siker sztorija töretlenül folytatódik napjainkban is. A különféle hőre lágyuló és hőre keményedő, erősítetlen és erősített műanyagokat egyre gyakrabban alkalmazzák teherviselő szerkezetek, összetett mechanikai és környezeti igénybevételnek kitett alkatrészek anyagaként. Míg a korábbi évtizedekben fejlődési irányként a speciális, megnövelt tulajdonságokkal rendelkező, kisebb mennyiségben előállított műszaki műanyagok (pl. polikarbonát (PC), poliszulfon (PS), poliéter-éterketon (PEEK) stb.) egyre szélesebb körű elterjedését prognosztizálták, addig napjainkban a tömegtermelésben előállított műanyag típusok (pl. polipropilén (PP)) egyre gyakoribb és egyre igényesebb műszaki alkalmazásainak lehetünk tanúi. Ugyanakkor egyre újabb és újabb, a legkülönbözőbb speciális alkalmazói igényekhez igazított anyag típusok, különböző műanyagok kombinációból előállított „ötvözetek” (blendek) és a legkülönbözőbb módon erősített (ásványi anyagokkal töltött, természetes alapú szálanyagokkal, üvegszállal /rövid, folyamatos, szövet stb./, vagy karbonszállal erősített) műanyagok állnak rendelkezésre.

A tervezőknek, az alkatrészgyártóknak ebből a hatalmas és szerteágazó választékból kell kiválasztani azt az anyagot, ami adott technológia és gazdasági környezet mellett az optimális műszaki megoldást is jelenti. Miután az anyagkiválasztás alapját elsősorban, bár a műanyagoknál nem kizárólagosan, a mechanikai tulajdonságok jelentik, így ezek pontos ismerete döntő az adott alkalmazás szempontjából. A műanyagipar a korábbi évtizedek során, részben a fémek anyagoknál alkalmazott vizsgálati módszerekhez, részben a különféle műanyagok jellegzetes tulajdonságaihoz, viselkedéséhez igazodva kifejlesztette saját vizsgálati módszereit, amelyek részletes összefoglalása megjelent a lap egy korábbi számában is [1]. Ezen vizsgálati módszerek alapján meghatározott mérőszámok anyagadat-bankokban (pl. Campus [2]), műanyagokkal foglalkozó kézikönyvekben [3] jól össze vannak foglalva.

Saját anyagvizsgálói gyakorlatom alapján elmondható, hogy a felhasználó akkor kerül nehéz helyzetbe, ha pontosan az általa kiválasztott anyagról nem talál kielégítő információkat (ez a ritkább eset), vagy ha az adott alkatrész olyan igénybevételnek lesz kitéve az üzemelés alatt, amire tartozó anyagtulajdonságokról a szabványosított vizsgálati módszerekből meghatározott mérőszámok nem adnak kielégítő információt (ez a sokkal gyakoribb eset). Ilyen speciális terhelési eset pl. az ütésszerű terhelés, az ütközés során végbemenő alakváltozás. Gyakorlatilag minden mozgó alkatrész kaphat ilyen jellegű terhelést, különösen igaz ez a járművekben (karosszériaelemek, motortér, utastér) egyre növekvő mennyiségben és utasbiztonsági szempontból is egyre frekvenciáltabb helyeken alkalmazott, műanyagból készült alkatrészekre.

A műanyag alkatrészeket is mindinkább számítógépes eljárásokkal tervezik. Ahhoz, hogy egy szerkezeti elem alakváltozásai különböző terhelési esetekben biztonságosan számíthatóak legyenek véges elem bázisú szimulációs programokkal, bemenő paraméterként meg kell adni az adott anyag valós mechanikai viselkedését leíró anyagjellemzőket (anyagegyenletek). A hagyományos vizsgálati módszerekből ezek nem, vagy csak korlátozott mértékben határozhatók meg. Ezért a vizsgálati módszereket egyre inkább a számítógépes modellezés igényeire kell alakítani.

Miután a leggyakoribb feladat monoton változó terheléssel meg-

határozni a mechanikai tulajdonságokat, a közleményben szeretném bemutatni, hogy a tág határok között megválasztott terhelési sebesség ($10^{-5} - 8$ m/s) esetén az egytengelyű húzó- és nyomóterhelés hatására

– hogyan változnak a feszültség–nyúlás függvények a különböző erősítetlen, hőre lágyuló műanyagoknál (PC, PE, PP-k);

– milyen különbségek észlelhetők a mérnöki és a valódi rendszerben felvett feszültség–nyúlás diagramok között, mik a korlátjai az egyik ill. a másik alkalmazásának;

– a diagramok változásai milyen jellegű anyagszerkezeti változásra utalnak;

– az anyagjellemzők (pl. a rugalmassági modulusz, E , a folyáshatár, σ_y) milyen sebességfüggést mutatnak;

– a vizsgálatokat milyen olyan járulékos hatások kísérik (pl. adiabaticus felhevülés, szívós-rideg átmeneti viselkedés), amiket mind a vizsgálati módszerek továbbfejlesztésénél, mind pedig az eredmények felhasználásánál figyelembe kell venni.

A napi gyakorlatban gyakran elegendő csak a folyáshatárig pontosan meghatározni a feszültség–nyúlás kapcsolatot. Az alkatrészek döntő többsége nem üzemelhet a folyáshatár környezetében levő feszültség szinten. A mérnöki mérőszámok eddig a határig jól alkalmazhatóak. Ugyanakkor a maradék képlékeny alakváltozás és a megfolyt anyag tulajdonságainak meghatározása több szempontból is fontos.

Szilárd fázisú alakítási folyamatok tervezéséhez nélkülözhetetlen az alakítási ellenállás meghatározása. Ennek meghatározásához szükséges a teljes folyási görbe ismerete, vagyis az anyag mechanikai jellemzése a képlékeny alakváltozás tartományában is. Bár a szilárd fázisú alakítások (hőformázás, szál- és fóliahúzás, mélyhúzás) nem a műanyagok legelterjedtebb alakadó technológiái, mégis növekszik jelentőségük az utóbbi időben.

A szilárd fázisú alakváltozási folyamatok nemkívánatos esete az, amikor nem szándékos külső terhelés hatására történik folyás és a folyás után jelentős alakváltozás. Az ütközési folyamatok numerikus modellezéséhez elengedhetetlen nemcsak a sebességfüggő folyáshatár meghatározása, hanem a képlékeny alakváltozási, a folyás utáni folyamatok ismerete, a vonatkozó anyagjellemzők megbízható meghatározása. Az autókba egyre több műanyag alkatrészt építenek be, így az ütközési biztonságtechnikai modellekhez szükséges mind a karosszériába és a motortérbe, mind pedig az utastérbe beépített alkatrészek műanyagainak jellemzése. Az autóipar új európai szabványai szerint a járművek utastérébe csak olyan műanyag elem építhető be, ami még igen alacsony hőmérsékleten (< -40 °C) sem törik ridegen. Így ezen anyagok legvalószínűbb károsodása a képlékeny instabilitás.

Ugyanakkor, a különféle műanyagok szerkezeti tulajdonságai miatt a törési folyamatok okai, azok lefolyása sem érthető meg a folyási, a folyás utáni alakváltozási folyamatok (nagy alakváltozások) pontos ismerete nélkül. Az utóbbi években számos olyan elmélet született [4], amely a tervezők és felhasználók rémálmát, a gyakorlatban is sajnos sokszor előforduló rideg/félideg törést mikrofolyási mechanizmusokkal magyarázza és modellezi. A fémek anyagokra kidolgozott rugalmas-képlékeny (EPFM), vagy a teljes folyást meghatározó (PYFM) törésmechanikai módszerek sem alkalmazhatók a műanyagokra, ha azok eltérő jellegű képlékeny viselkedését pontosan nem ismerjük.

Jól ismert és a szakirodalomban is részletesen elemzett [5] tény, hogy a műanyagok mechanikai tulajdonságai is idő, hőmérséklet és feszültség szint függőek. Állandó terhelés hatására megváltoztatják alakjukat, azaz kúsznak. Az így kialakult deformációk döntő része a terhelés megszűnése után eltűnik, az anyag vagy a szerkezet visszaáll/visszatér az eredeti állapotába. Az időben monoton változó terhelés hatására egy

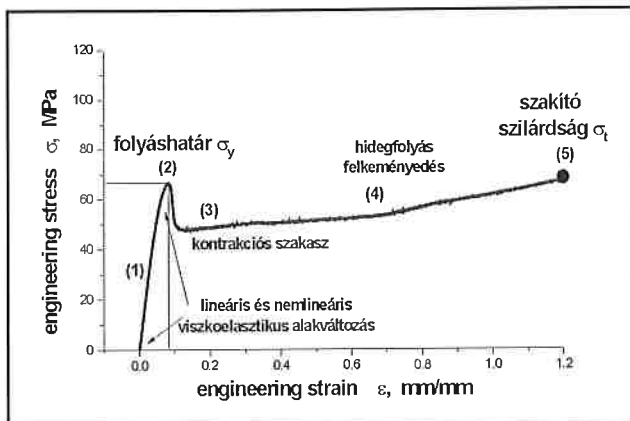
*Joanneum Research Institut für Kunststofftechnik, Leoben

kritikus állapot elérése után azonban az alakváltozások egy része megszűnik meg, az anyag képlékenyen alakváltozik, megfolyik, így maradó alakváltozásokat mérhetünk.

Itt meg kell jegyezni, hogy tágabb értelemben a műanyagok terhelés alatt mindig „folyanak”, hiszen a deformációnak van egy viszkózus része. A fémek anyagoknál használt folyási fogalom ezért nem szerencsés, helyette a maradó vagy inelasztikus alakváltozások összességének jellemzésére a képlékeny alakváltozás fogalmát használom.

Vizsgálattechnikai és kísérleti háttér

Ha egytengelyű szakítóvizsgálattal felvesszük a vizsgált anyag szakítódiagramját (1. ábra), akkor azon a következő folyamatokat különböztethetjük meg:



1. ábra. Egy hőre lágyuló műanyag elvi szakítódiagramja (a mérnöki σ - ϵ) és annak részei

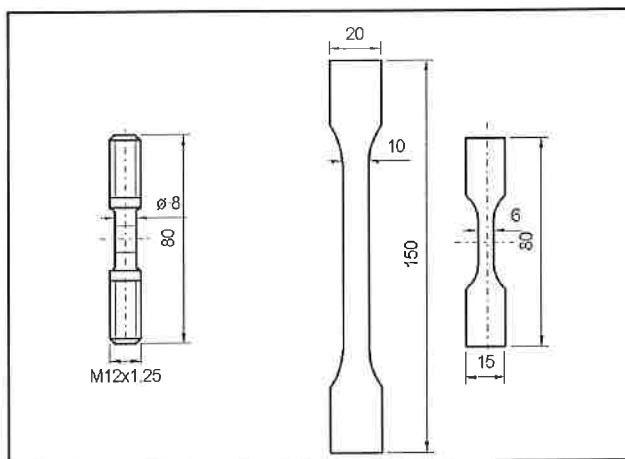
A terhelés kezdeti szakaszában az alakváltozás lineáris viszkoelasztikus, azaz már ebben a szakaszban is eltér az ideálisan lineáristól. Gyakorlati számításokhoz a rugalmassági modulus értéke a feszültség és nyúlás kapcsolatából jó közelítéssel meghatározható [6]. A terhelés növelésével a feszültség-nyúlás kapcsolat már csak nemlineáris összefüggésekkel (nemlineáris viszkoelasztikus tartomány) határozható meg. Az ún. érintő- és húrmódulus között egyre nő a különbség.

A terhelés további növelésével a szakítódiagram elér egy olyan pontot, ahol egységnyi nyúlásnövekményhez már nem tartozik feszültség-növekedés. A gyakorlatban a görbének ezt az első maximum pontját tekintjük mint *folyáshatárt*. Minden olyan esetben, amikor létezik ez a pont a feladat egyszerű. Több olyan műanyag van, amely folyamatosan növekvő szakítógörbét mutat, de a maximum elérése után hirtelen, ridegen törnek. Ilyenek a repedezettséget (craze-t) mutató műanyagok (pl. polimetil-metakrilát (PMMA), polisztirol (PS)). Ekkor a fizikai értelemben vett folyáshatár meghatározása helyett egyszerűen a szakítószilárdságot határozhatjuk meg. A folyáshatár meghatározásának vannak pontosabb, mélyebb fizikai háttérrel rendelkező módszerei is [7, 8]. Ekkor a próbatesteket különböző mértékig terhelik, a terhelés megszüntetése után hagyják relaxálni és ez után a maradó alakváltozásokból állapítják meg a folyáshatár pontos helyét.

Amikor a folyáshatárig egyenletes alakváltozás (egytengelyű feszültségállapot) megszűnik, és a próbatesten *lokalizált alakváltozás* jelenik meg, a próbatest kontrahálódik (eltérően, mint a fémek anyagoknál), a feszültségállapot többtengelyűvé válik. A mérnöki diagramban az erő hirtelen (pl. PC-nél) vagy folyamatosabb csökkenését (pl. PP-nél) figyelhetjük meg. Hogy ez a jelenség értelmezhető-e mint az anyagra jellemző lágyulás, vagy csak a geometriai instabilitás következménye, az csak a valódi rendszerben dönthető el. A további terhelés során ez a csökkenés is elér egy minimumot, és ettől a ponttól kezdve a szakítógörbe enyhén vagy egyes anyagoknál meredekebben növekszik egészen a szakadás bekövetkezéséig. A próbatesten kialakult kontrakciós részből az anyag stabil állapotban mintegy hidegen kifolyik. Ez a folyamat együtt jár mikroszerkezet-változásokkal is [5, 9].

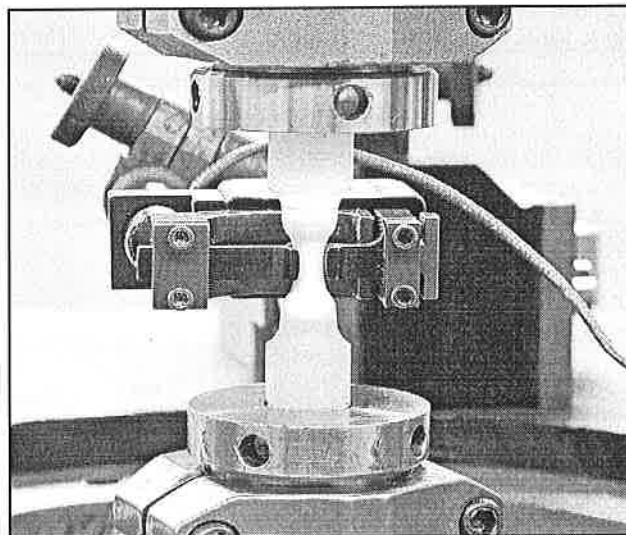
Ahhoz hogy a folyás utáni viselkedést ténylegesen jellemezni tudjuk a *valódi feszültség-valódi nyúlás kapcsolat*ot kell meghatározni. Míg a mérnöki rendszerben a feszültséget az eredeti keresztmetszetre (A_0) a nyúlást pedig a kiinduló mérési hosszra (l_0) vonatkoztatva számítjuk, addig a valódi feszültség az erő és a mindenkor aktuális keresztmetszet (A_i) hányadosaként, a valódi nyúlás pedig a mindenkor mérőhosszra (l) vonatkoztatva értelmezhető. Ha tehát az erő változásával egyidejűleg a keresztmetszet változását is tudjuk mérni, akkor a valódi feszültség meghatározható. Ez legkönnyebben hengeres szakítópróbatesttel végezhető el. A fémeknél használt vizsgálati módszerek alkalmazhatók műanyagoknál is, az irodalomban a legfontosabb összefüggések, ezek magyarázata megtalálható. [10].

A hengeres próbatesteket préselt lapokból munkálják ki. Ez esetben a próbatest homogénnek és izotrópnak tekinthető, a molekulaszervezet semmilyen irányultsággal sem rendelkezik. A vizsgálatokhoz használt lapos és hengeres próbatestek alakja, méretei a 2. ábrán láthatók. A hengeres próbatest, eltérően a fémektől, nem a legjellegzetesebb mű-



2. ábra. A vizsgálatokhoz használt szakítópróbatestek alakja és méretei

anyag szakítópróbatest alak, de az előállításához szükséges többletráforgatás megtérül a mérés technika lényeges egyszerűsödésével, valamint, nagyobb terhelési sebesség esetén, a forgásszimmetria miatt sokkal stabilabb a befogás és így lényegesen kedvezőbb dinamikus viselkedés érhető el. A 3. ábrán egy 0.1 m/s-ig használt vizsgálati elrendezés fényképe látható. A *keresztmetszet változását* egyrészt a próbatestre rögzített extenzométerrel, másrészt optikai úton mérjük. Az átmérőt mé-

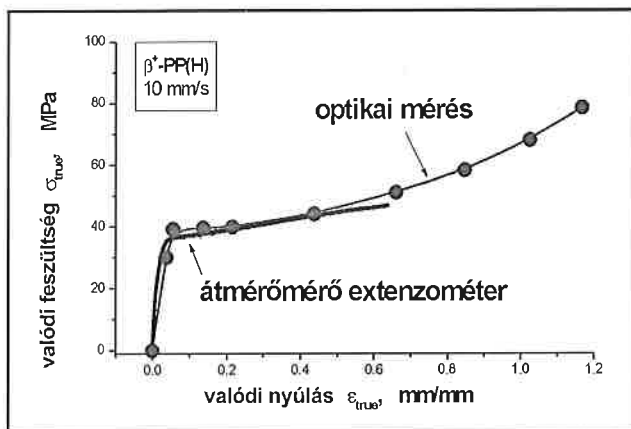


3. ábra. Hengeres próbatestek szakítóvizsgálatánál 0.1 m/s terhelési sebesség tartományig használt mérési elrendezés

rő extenzométer max. 2 mm átmérőváltozásig és kb. 1 m/s terhelési sebesség alkalmazható, ennél nagyobb alakváltozás és terhelési sebesség esetén optikai módszerrel (CCD kamerák 50 kép/s 1024x768 felbontás, 400 kép/s 768x512 felbontás, 3000 kép/s 240x240 felbontás és digitális képfeldolgozó rendszer) határozzuk meg az átmérőváltozást. A gyakorlatban a kisebb alakváltozások esetén mindaddig, amíg a mérő-

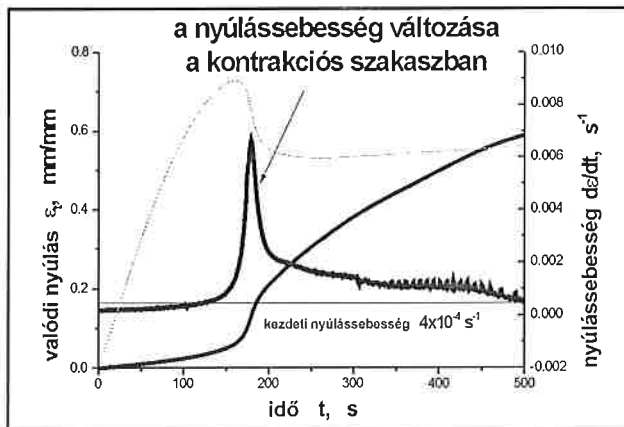
meghatározására (pl. foltszerű /speckle/ lézer interferometria, vagy pásztázó /scanning/ lézer extenzométer). Egyszerűbb esetben, kismértékű kontrakcióig egy axiális és egy keresztirányú extenzométerrel is jól meghatározható a térfogati nyúlás [12].

Meg kell továbbá említeni, hogy miután a kísérletek során a dugattyú elmozdulás sebességét szabályoztuk úgy, hogy a terhelés során lineáris



4. ábra. A valódi feszültség-valódi nyúlás diagramok konstrukciója átmérőmérő extenzométer és optikai mérőeszköz kombinációjával csúcs jól követi a kontrakciót, az átmérőmérő jobb jelet ad, mint a véges felbontású kamera és képfeldolgozó rendszer; a nagyobb alakváltozások viszont már csak optikailag mérhetők. Az 4. ábrán a két mérőeszköz összehasonlítása és a teljes valódi feszültség-nyúlás görbe összehozása látható.

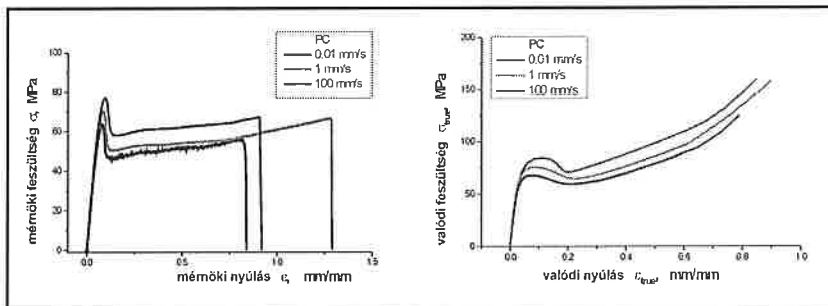
Míg a valódi feszültség meghatározása inkább csak mérés technikai nehézséget jelent, addig a valódi nyúlás meghatározásánál a definíciók fizikai hátterét valamint azok érvényességi határait is figyelembe kell venni. A fémeknél a képlékeny alakváltozás állandó térfogatban megy végbe, ez a térfogatállandóság azonban nem mindig igaz műanyagoknál (a maradó alakváltozás együtt jár térfogatváltozással). Az 5. ábrán a különböző összefüggések érvényességi tartományait szemléltetem. Az átmérőváltozás természetes logaritmusából számított valódi nyúlás szigorúan véve csak állandó térfogatban végbemenő képlékeny alakváltozásnál használható. Ez jó közelítéssel igaz a töltetlen műanyagokra (<5–8%, [11]), de már a töltött, erősített rendszerek esetén jelentősebb térfogatváltozással kell számolni. Tökéletes megoldást olyan mérőrendszer jelentene, ami folyamatosan a terhelés irányában és arra merőlegesen lokálisan is képes a nyúlások ill. nyúláseloszlások



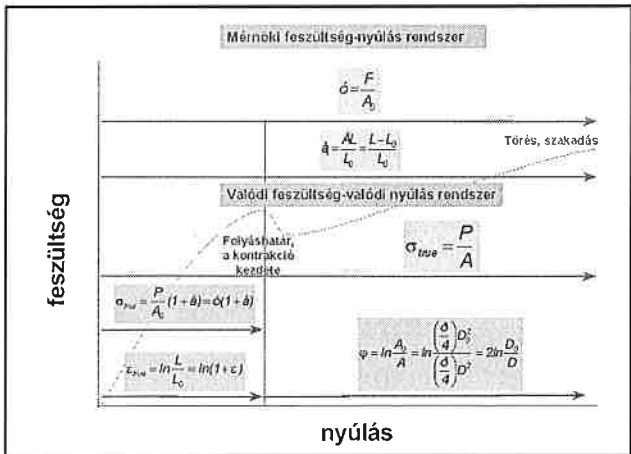
6. ábra. A globális és a lokális nyúlássebesség változása a szakítóvizsgálat alatt

legyen, a valódi nyúlássebesség a terhelés alatt, különösen a kontrakciós szakaszban, változott. A kapott valódi feszültség-valódi nyúlás diagramok így nem teljesen pontosan mutatják a nyúlássebesség változásának hatásait. Ezt a jelenséget szemlélteti a 6. ábra.

A 7–8. ábrákon különböző műanyagok (PC és PP-k) terhelési sebességtől függő mérnöki és valódi feszültség-valódi nyúlás görbéi láthatók. Megfigyelhető, hogy míg a PC a valódi rendszerben is lágyulást mutat a folyáshatár utáni kontrakciós szakaszban, addig a PP anyagok [az α kristályszerkezetű homopolimer α-PP(H), a hexagonális kristályszerkezetű homopolimer β+-PP(H), a kopolimer u-PP(RC)] különböző



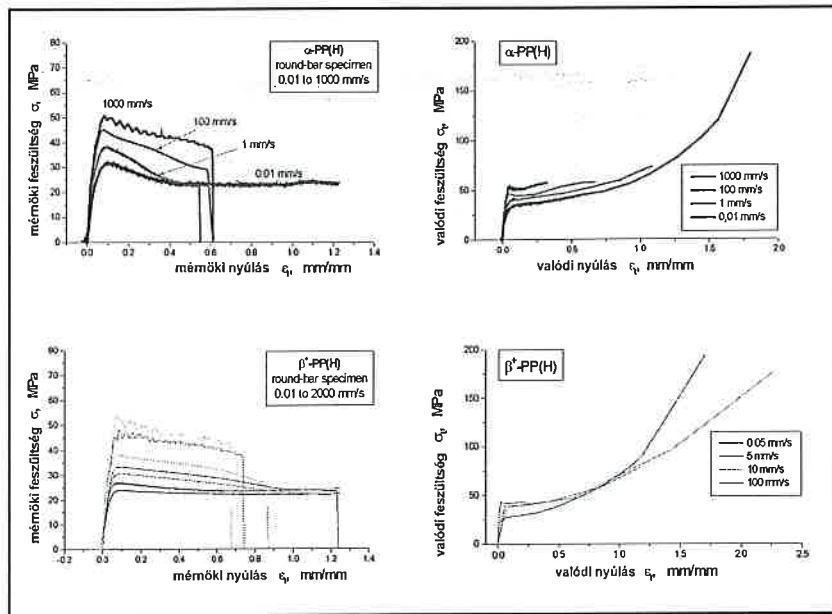
7. ábra. PC anyag terhelési sebesség függő mérnöki és valódi feszültség-valódi nyúlás görbéi



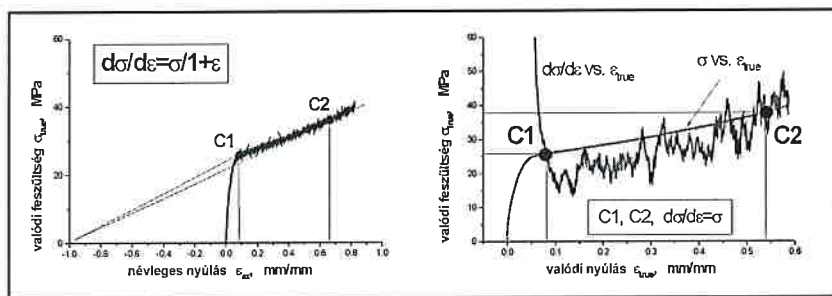
5. ábra. A mérnöki és a valódi rendszer összefüggéseinek alkalmazási határai

mértékben felkeményednek. A lágyulás, a kristályszerkezet és molekulaláncok orientációja miatti felkeményedés okainak elemzése meghaladja jelen közlemény kereteit, de az irodalomban kiváló és részletes elemzések találhatók [9, 13-15].

A következő kérdés az, hogy milyen módszerrel jelölhető ki a folyamatosan változó valódi görbéken a jellegzetes változásokhoz tartozó értékek? Az első jellegzetes pont (C1) az, amikor az anyag elveszti stabilitását, az egyenletes nyúlás befejeződik és megkezdődik a kontrakció. A második pont (C2), amikor a stabilan növekvő kontrakciós szakasz átalakul és megjelenik a hidegfolyás. A két jellegzetes pont meghatározásának két módszerét mutatja be a 9. ábra. Az első eset, amikor a $d\sigma/d\varepsilon$ derivált egyenlő a feszültség (σ) értékével, a második eset az ún. Considere-féle megoldás, ahol a valódi feszültséget a mérnöki nyúlás függvényében ábrázoljuk és az 1+ ε pontból a görbéhez húzott érintő szolgáltatja a kritikus pontokat. Ha csak egy érintő húzható, akkor csak a kontrakció kezdete jelölhető ki és a kontrakció instabil módon megy végbe; ha két érintő húzható, akkor teljesülnek a kontrakciós hely stabil növekedésének feltételei, hideg folyás alakulhat ki. A módszerek és fizikai hátterük részletes leírásai megtalálhatók a [16, 17] munkákban. Az első pont (C1) tekinthető a valódi rendszerben mért folyáshatárnak.



8. ábra. PP anyagok terhelési sebesség függő mérnöki és valódi feszültség–valódi nyúlás görbéi



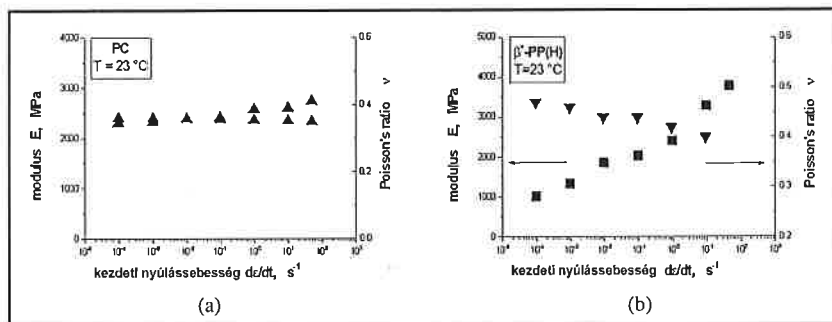
9. ábra. Kritikus pontok meghatározásának módszerei (C1, C2) a valódi rendszerben

Amikor a kontrakció megjelenik a feszültség-állapot többtengelyűvé válik. Részletes vizsgálatok bizonyították [11], hogy a Bridgman-féle képlet [17] jó közelítéssel írja le a műanyagok többtengelyű feszültségállapotát a kontrakciós szakaszban. Pontosabb számításokhoz a kapott feszültségértékeket korrigálhatjuk a képlet segítségével.

A szakítóvizsgálatok eredményei

A terhelési sebesség növelésével többféle változást észlelhetünk.

Növekvő terhelési sebesség mellett a rugalmassági modulusz értékei növekszenek. Ezt a változást szemlélteti a 10. ábra. Ugyancsak szót

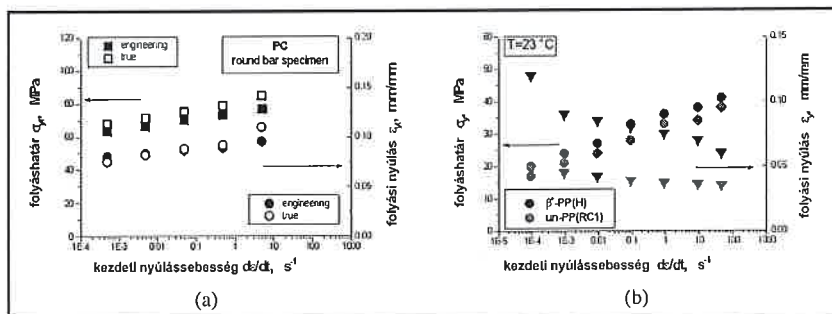


10. ábra. A rugalmassági modulusz (E) és a Poisson-szám sebességfüggése; (a) PC, (b) β⁺-PP(H)

kell ejteni a kereszt- és hosszirányú nyúlások viszonyának változásáról. A Poisson-szám ugyanolyan jellegű viszkoeelasztikus jellemző, mint a rugalmassági modulusz (hőmérséklet- és időfüggő), a terheléssel nemlineárisan változik. Növekvő terhelési sebesség esetén a kezdeti érték kis mértékben csökken (PC 0.38-0.36, PE 0.45-0.35, PP 0.42-0.33).

Mind a mérnöki, mind pedig a valódi rendszerben mért folyáshatár folytonosan nő (legalábbis a vizsgált sebességtartományban) a terhelési sebesség növelésével. Ezt szemlélteti a 11. ábra. A folyáshatárnál mért nyúlás a különböző anyagoknál eltérő tendenciákat mutat. A PC anyagnál növekszik, az α-PP(H) esetén nő/csökken, a β⁺-PP(H) anyagnál csökken a terhelési sebesség növelésével.

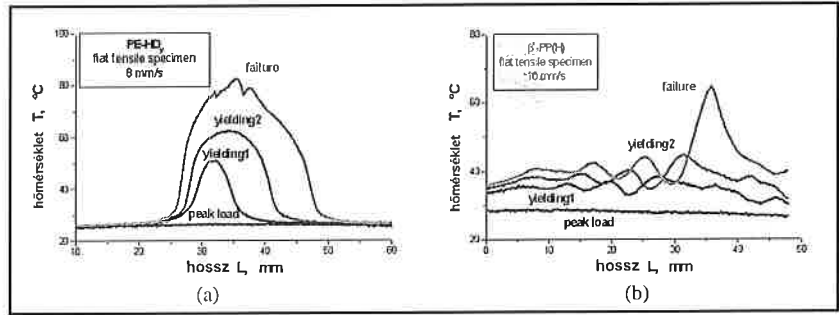
Röviden szót kell ejtenünk a mérést befolyásoló dinamikus jelenségekről és ezek csökkentésének, figyelembevételének módjairól. A terhelési sebesség növelésével a mérőeszközök jelein megjelennek dinamikus hatásokra utaló jelek. Az inerciaerők, a rugalmas hullámterjedések, visszaverődések befolyásolják nagy sebességek esetén a mérési eredményeket. Továbbá, mind az erőmérőcellák, mind a különböző nyúlásmérők alkalmazási tartománya korlátozott, nagy terhelési sebesség esetén speciális mérőeszközöket (piezo-erőmérők, nyúlásmérő-bélyeges adapterek /Ti-ötvözetek/, nagy sebességű optikai eszközök) kell használni. A teljes befogó, erőmérőcella és próbatest rendszer tömeg/merevség viszonyát sikerült úgy optimalizálni, hogy a vizsgálatok során ki tudtuk használni a rendelkezésre álló teljes terhelési sebesség tartományt (8 m/s).



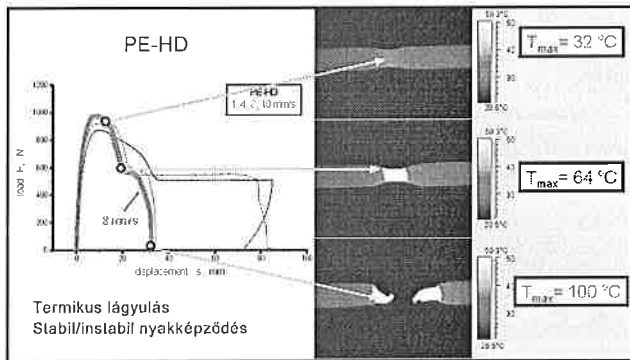
11. ábra. A folyáshatár (σ_f) és a folyási nyúlás (ε_f) sebességfüggése; (a) PC, (b) β⁺-PP(H) és u-PP(RC)

A folyáshatár utáni szakaszon többféle tönkremeneteli formát figyelhetünk meg. Az egyik esetben, pl. a PE-HD gázcsőanyagoknál, a terhelési sebesség növelésével megszűnik a hideg folyás szakasza, a kontrakciós szakasz elveszti stabilitását és mintegy „megolvadva” összeshűkül, majd elszakad. A másik esetben először a hideg folyás jellege változik meg, majd a kontrakciós szakasz veszt el stabilitását és jelentősen lerövidül. Tovább növelve a sebességet az anyag ridegen, kontrakció nélkül, vagy alig mérhető kontrakcióval törik el. Végül a PC anyagon a kb. 6 nagyságrendnyi (10⁻⁵ – 10¹ m/s) sebességváltozás szinte semmilyen különbséget nem jelent sem a kontrakció megjelenésében, sem annak növekedésében, sem pedig a végső károsodási formában.

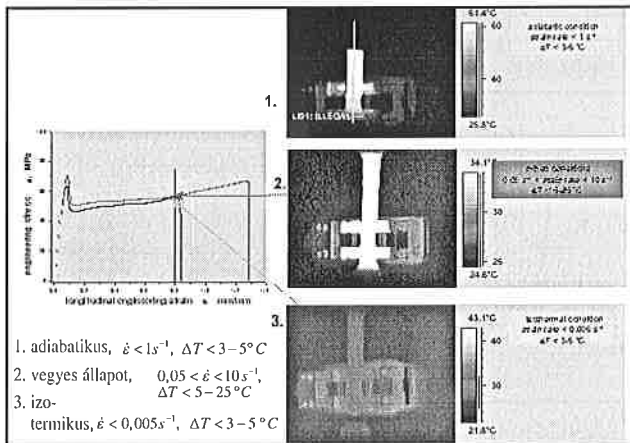
Több jel utal arra, hogy egy adott kritikus lokális nyúlássebesség elérése után az alakváltozási folyamat nem állandó hőmérsékleten, hanem *adiabatikus felmelegedés* mellett játszódik le. Ennek vizsgálatára a szakítópróbatést hőmérsékletét az alakváltozás során infravörös kamerával mértük és egy ehhez csatlakozó képfeldolgozó rendszerrel a teljes felület hőmérsékletét valamint annak eloszlását is meghatároztuk. Az 12. ábrán az a PE anyagnál említett folyamat látható, amikor a terhelési sebességet növelve (szakítódiagramok 1, 4, 8, 10 mm/s) a kontrakciós szakasz elveszti stabilitását és a próbatést instabilan elszakad. A 13. ábrán a PC szakítódiagramjai mellett a szakadási ponthoz tartozó hőmérséklet-eloszlások képei láthatók. Ez esetben a hőmérséklet-változás nem járt együtt a károsodás típusának megváltozásával.



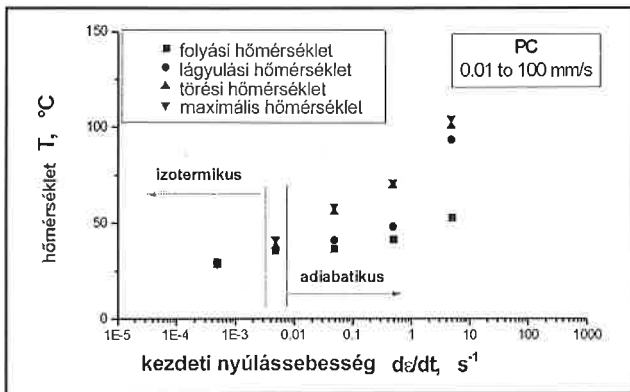
15. ábra. A szakítópróbatestben a nyúlások lokalizációja miatti hőmérsékletváltozás (a) PE-HD, (b) β^+ -PP(H)



12. ábra. A károsodás formájának változása a terhelési sebességgel PE anyag szakítóvizsgálata során



13. ábra. PC szakítópróbatést szakadási hőmérsékletének változása a terhelési sebesség növelésével

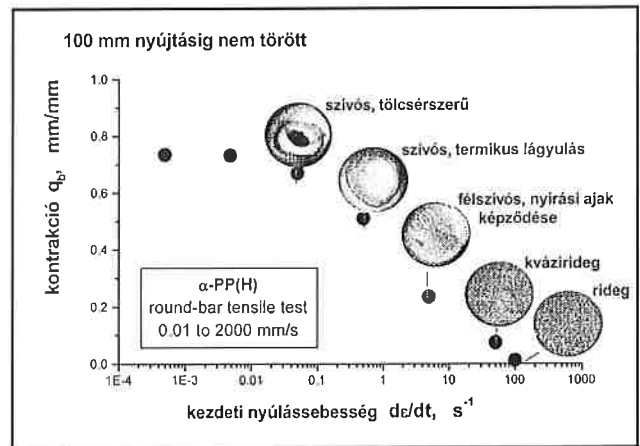


14. ábra. A maximális hőmérséklet sebességfüggése

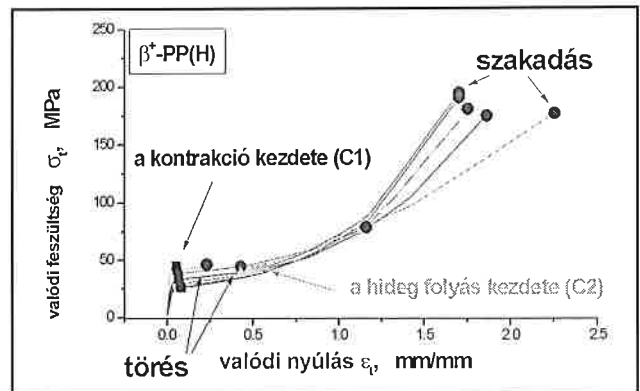
A próbatést hőmérséklete a kontrakciós szakaszban már viszonylag kis nyúlássebességek esetén ($> 0.01 s^{-1}$) is nagyobb, mint egy a kontrakciótól távoli helyen, vagy mint a környezeti hőmérséklet. A 14. ábrán a PC anyagon mért értékeket ábrázoltuk a terhelési sebesség függvényében. A terhelési sebesség növelésével ez a maximális hőmérséklet nő (T_{max}) és adott esetben a vizsgált műanyag valamilyen jellegzetes átalakulási hőmérsékletét (T_g, T_m) is megközelítheti vagy el is érheti.

A PE anyag egy viszonylag szűk sebességtartományban (4-8 mm/s) vált a hideg folyásról a kontrakció instabilitására. 10 mm/s-nál nagyobb terhelési sebesség esetén a kontrakciós szakasz hőmérséklete meghaladja a 140 °C-ot, ami közel jár a PE olvadáspontjához. Míg a PE-nél a kontrakciós rész gyorsan lokalizálódik, mintegy képletesen „leválik” a próbatést többi kismértékben alakváltozott részéről, addig pl. a β^+ -PP(H) esetén a kontrakció a próbatést lényegesen nagyobb térfogatában, sokkal egyenletesebben elosztva, kisebb lokális hőmérséklet-növekedéssel játszódik le. Ezt a két eltérő folyamatot mutatja be a 15. ábra.

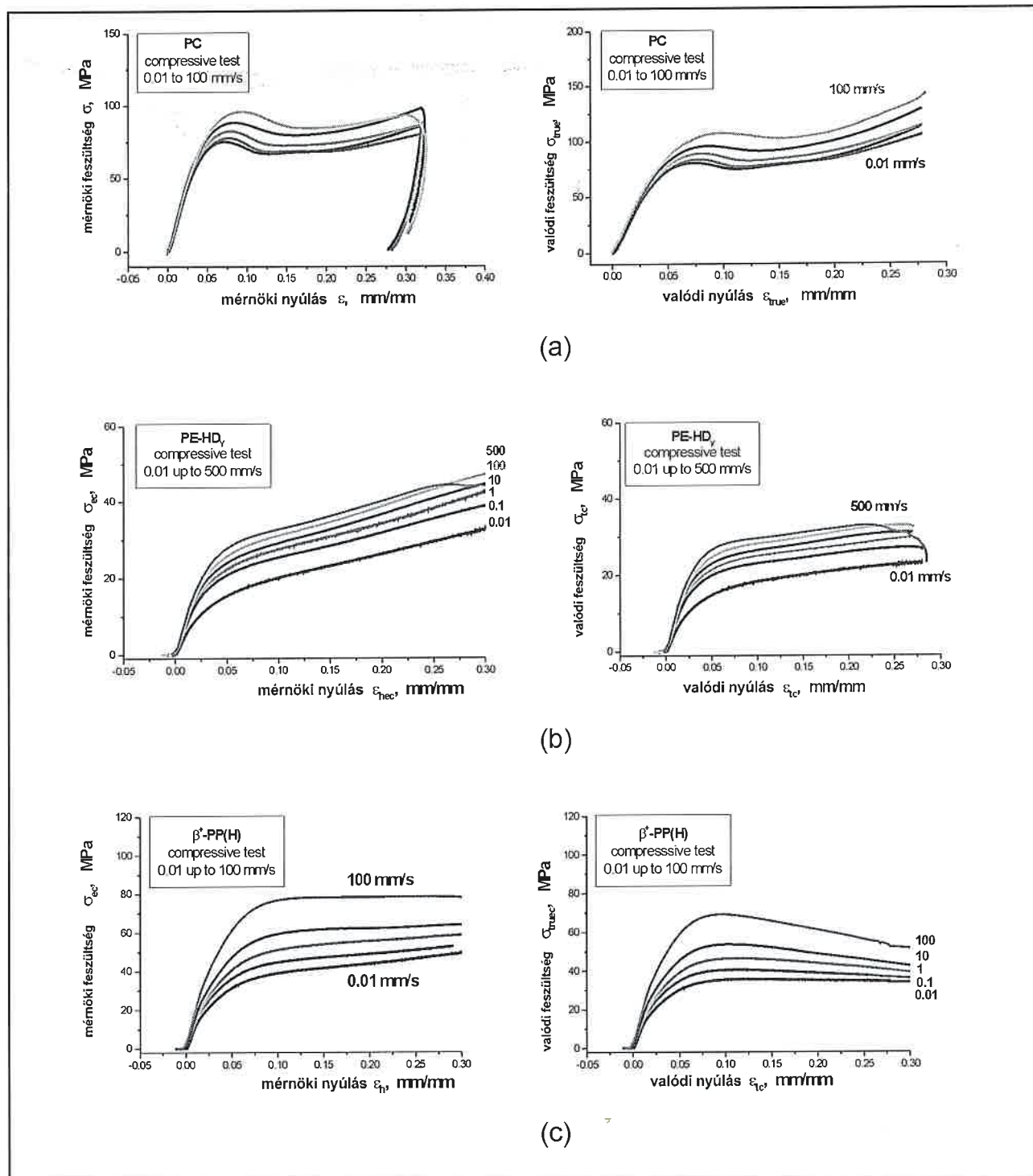
A PP homopolimereken, bár igen eltérő módon, de egy adott sebes-



16. ábra. A fajlagos átmérőváltozás sebességfüggése (α -PP(H)) és a különböző károsodási formákhoz tartozó töretfelületek



17. ábra. A kritikus átalakulási pontok (C1, C2) és a végső szakadás helyének, típusának (szakadás, törés) a terhelési sebesség növelésével bekövetkező változása β^+ -PP(H) anyag szakítódiagramjain



18. ábra. Különböző műanyagok növekvő terhelési sebességgel felvett nyomódiagramjai; (a) PC, (b) PE-HD, (c) β^+ -PP(H)

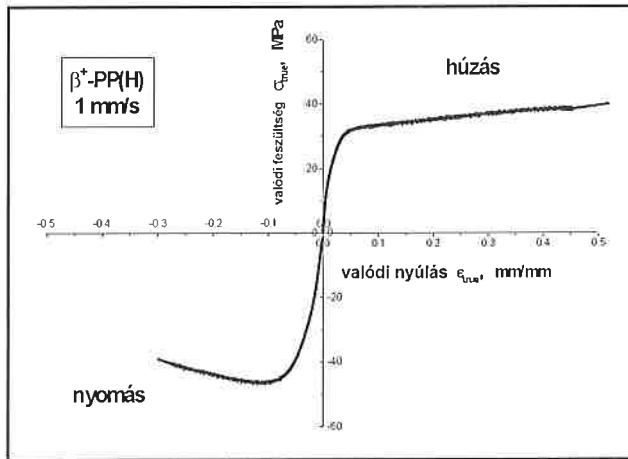
ség (az α -PP(H)-nél 1 mm/s, a β^+ -PP(H)-nél 100 mm/s) után egyértelműen az anyag elridegedését figyelhetjük meg. Több töretfelületen találunk arra utaló nyomot, hogy a tönkremenetel a próbatest közepén – ahol háromtengelyű feszültségállapot uralkodik – indul meg és halad a felület felé, ahol a feszültségállapot kéttengelyű. Ebben az esetben egy adott terhelési sebességtartományban ($10 < v < 500$ mm/s) a töretfelület szélén az ún. nyírásos ajak képződése is megfigyelhető. Az α -PP(H) próbatestek fajlagos átmérőváltozása a terhelési sebesség függvényében valamint a különböző töretfelületek láthatók a 16. ábrán. Kis terhelési sebességgel (< 0.1 mm/s) terhelt próbatest stabil kontrakció után hidegen folyik, majd elszakad. Ennek a folyásnak a jellegét, mértékét a terhelési sebesség növelésével megjelenő adiabatikus hatások

megváltoztatják ($0.1 < v < 10$ mm/s). Tovább növelve a sebességet a kontrakció instabillá (> 50 mm/s) válik, majd nagyobb sebességeknél (> 500 mm/s) a próbatestek mérhető maradó kontrakció nélkül ridegen eltörnek. Ha a vizsgált sebességtartományban a felvett valódi feszültség–valódi nyúlás diagramokba berajzoljuk a kritikus pontok (C1, C2, szakadás/törés) helyét, akkor a 17. ábrán szemléltetett változásokat észlelhetjük.

Nyomóvizsgálatok

A nyomóvizsgálatokhoz 10x10x25 mm méretű hasábokat használunk. A terhelési sebesség tartománya ez esetben $10^{-5} - 5 \times 10^{-1}$ m/s kö-

zött változott. A próbatesteket edzett, polírozott acél nyomólapok között kb. 8 mm összenyomódásig terheljük. Különösen nagy figyelmet fordítottunk a próbatestek lehető legpontosabb kimunkálására, a befogó és a próbatest felületeinek párhuzamosságára, a felületek közötti súrlódás csökkentésére. Az így kapott nyomófeszültség–nyúlás görbéket szemlélíti a 18. ábra. A terhelési sebesség növelésével a nyomóvizsgálatnál is hasonló jelenségeket figyelhetünk meg mint a szakítóvizsgálatnál. A modulusz és a folyáshatár értéke nő, a PC anyag nyomóterhelés esetén is lágyulást, míg a PE és a PP anyagok keményedést mutatnak. Ha egy diagramban ábrázoljuk a húzó- és nyomófeszültség–nyúlás görbéket (19. ábra), akkor megfigyelhetjük, hogy a nyomógörbe alakja, lefutása eltér a húzóétól, illetve azonos nyúláshoz nagyobb feszültséget mutat. Következésképpen a nyomó rugalmassági modulusz valamivel, a nyomásnál mért folyáshatár 10-20%-kal nagyobb, mint a szakításnál mért. Az adiabatikus felhevülés nyomóterhelés során is megjelenik, tovább bonyolítva a nyomóvizsgálat eredményeinek értékelését.



19. ábra. β⁺-PP(H) húzó-nyomó feszültség-nyúlás görbéi 1 mm/s terhelési sebességnél

Ha az alakváltozásokat a kezdeti kis alakváltozások tartományától a folyáshatár utáni nagy (képlékeny) alakváltozások tartományáig le akarjuk írni, akkor többféle lehetőség közül választhatunk.

A feszültség–nyúlás görbéket *linealizálhatjuk*, és egyszerűen két, három, vagy akár több egyenessel közelítjük. Az első egyenes az adott feladat szerint célszerűen választott érintő, vagy a húrmodulusz lehet, a második illetve többi egyenes az adott szakasznak megfelelő keményedési kitévővel jellemezhető. A legtöbb végeeselemes szoftver tartalmaz ilyen jellegű anyagmodelleket. Az irodalomban, pl. PC anyagú alkatrészek modellezésére találhatunk ilyen példákat [18].

A folyáshatárig terjedő nemlineáris szakaszt leírhatjuk például két-, vagy háromparaméteres *hatványfüggvénnyel*, és konstruálhatunk olyan függvénykapcsolatokat, amelyek figyelembe veszik a *viszkoelasztikus* viselkedést [19].

Megkísérhetjük a *teljes sebességfüggő valódi feszültség–valódi nyúlás görbe* matematikai leírását. Ilyen megoldásokra találunk példákat a [20, 21] irodalmakban. Egy ilyen „anyagegyenlet” a következő részekből állhat: Egy arányossági tényező a görbe kezdeti szakaszának a leírására, egy viszkoelasztikus tag (valamilyen hatványfüggvény alakban), a felkeményedést jellemző tag és a nyúlássebesség változását figyelembevevő tényező.

Végül, ha a teljes terhelési sebességtartományt és az abban lejátszódó valamennyi folyamatot figyelembe akarjuk venni (mechanikai és termikus változások), akkor egy kombinált *termomechanikus modellel* is dolgozhatunk, amire szintén találunk példát az irodalomban [22].

Nyilvánvalóan a modellek egyre bonyolultabbá is válhatnak, és egy adott tervezési feladathoz a kiválasztás és alkalmazás szempontjai nagyban függenek a rendelkezésre álló személyek és szoftverek teljesítőképességétől, az időtől és a finanszírozási lehetőségektől.

Összefoglalás, további tervek

Az előzőekből látható, mi minden történik az anyaggal/próbatesttel már egy egyszerű szakítóvizsgálat/nyomóvizsgálat során, ha a terhelési sebességet tág határok között változtatjuk. A valóságos alkatrészekben végbemenő változások bonyolultabbak, hiszen az itt bemutatott anyagok viszonylag egyszerűek (nem vagy alig módosított), a próbatestek jó közelítéssel homogének és izotrópok voltak, nem tartalmaztak feszültséggyűjtő helyeket (hibák, bemetszések, repedések). Ez az alkatrészekre mind nem igaz. Ahhoz, hogy alkatrészekben, szerkezeti elemekben végzett szimulációkhoz, a valós anyagok viselkedését jobban megközelítő összefüggéseket állapítsunk meg még több feladatot kell megoldani;

A jövőben a mérőrendszert tovább akarjuk fejleszteni úgy, hogy a vizsgálatokat állandó valódi nyúlássebességgel (valódi nyúlásvezérlés) is el lehessen a lehető legnagyobb sebességgel (10 s⁻¹) végezni. Ehhez a követelményhez, továbbá a sorozatmérések elvégzéséhez szükséges az optikai mérőrendszer átgondolása, célszerű átalakítása.

Az „ideális” próbatestek vizsgálata mellett bemetszett és valamilyen technológiai irányultsággal rendelkező próbatestestek, valamint újabb és töltött, erősített anyagok vizsgálatát tervezzük.

Feladat a mért anyagegyenletek beépítése meglévő végeeselemes szoftverekbe, a próbatestestek alakváltozásának szimulációja és a modellek finomítása.

A nagy kihívást számomra a bemetszések, repedések környezetében is érvényes, a különböző, de különösen nagy terhelési sebességek (10–100 s⁻¹) esetén a valós anyagok viselkedését és károsodását tükröző anyagmodellek kidolgozása, illetve ilyen modellekhez bemenő adatok meghatározása jelenti.

Irodalom

1. Thamm, F.: Anyagvizsgálók Lapja, (2001) 11. évf., 1. szám, 9-13.
2. CAMPUS Plastics Database, CWIG Frankfurt am Main, 1999
3. Domininghaus, H.: Di Kunststoffe, VDI Verlag, 1992, Düsseldorf
4. Leevers, P.S.: Int. J. of Fracture 73: 109-127, 1995
5. Howard, R.N., Young, R.J.: The Physics of Glassy Polymers, Chapman & Hall, London, 1995
6. ISO 527: 1998, Plastics – Determination of Tensile Properties
7. Quinson, R., Perez, J., Rink, M., Pavan, A.: J. of Mat. Sci. 31 (1996) 4387-4394
8. Brooks, N.V., Duckett, R.A., Ward, I.M.: Polymer, 1992, Vol. 33 No. 9, 1872-1880
9. Strobl, G.R.: The Physics of Polymers, Springer, 1997, Berlin
10. Gillemot, L.: Anyagszerkezettan és Anyagvizsgálat, TK, Budapest, 1976
11. G'Sell, C., Jonas, J.J.: J. of Mat. Sci. 14 (1979) 583-591
12. Pukánszky, B.: J. of Mat. Sci.: 29 (1994) 2350-2358
13. Lin, L., Argon, A.S.: J. of Mat. Sci.: 29 (1994) 294-323
14. Boyce, M.C., Parks, D.M., Argon, A.S.: Mechanics of Materials, 7 (1988) 15-33
15. Howard, R.N.: Macromolecules 1993, 26, 5860-5869
16. Birley, A.W., Haworth, B., Batchelor J.: Physics of Plastics, Hanser Verlag, 1992, München
17. Dieter, G.E.: Mechanical Behavior of Materials under Tension, in Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, New York, 1976, 329-348
18. Lu, J., Ravi-Chandar, K.: Int. J. of Solids and Struc. 36 (1999), 391-425
19. Michaeli W., Dassow J.: Simulation des Werkstoffverhaltens von Kunststoffen auf der Basis von Normkurzeituntersuchungen, DVM, Aachen, 1998
20. Duffo, P., Monasse, J., Haudin, M.: Journal of Materials Science 30 (3) (1995) 701-711
21. Michaeli, W., Glibmann, M.: Polymer Testing, 20 (2001) 591-596
22. Hasan, O.A., Boyce, M.C.: Polymer Engineering Science 35 (4) (1995) 221-244