

RAGASZTÓSZALAGOK LEVÁLÁSÁNAK DINAMIKÁJA: SEBESSÉGFÜGGÉS ÉS INSTABILITÁS

Máté Mihály, Nguyen Q. Chinh

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Anyagfizikai Tanszék

E dolgozat témáját a hétköznapi ragasztószalagok érdekes leválási viselkedése adja a tekercsről történő letekeréskor. Szórtelenítéskor a kozmetikus a gyantát hirtelen tépi le, viszont a sebtapaszt már lassan húzzuk le a bőrről. Mind a két esetben – a gyakorlati tapasztalatok alapján – az elérhető hatás szempontjából nagyon fontos a leválasztási sebesség. Szintén érdekes jelenség, hogy egyes ragasztószalagoknál a szalag egyenletes sebességű leválása – bizonyos sebességtartományban – igen nehezen fenntartható. Ilyenkor a folyamat inkább szaggatottan – instabilan – történik, a szalag váltakozva, kisebb és nagyobb sebességgel válik le. E széleskörűen tanulmányozott ugráló folyamattal [1] egyidejűleg jellegzetes hanghatást figyelhetünk meg, valamint a szalag felületén csikozás is megjelenik. Számos tanulmány született a ragasztószalagok tapadásának tartósságáról, erősségéről. Ezek fő célja a szalag adott sebességű leválasztásához szükséges erő meghatározása különböző minőségű anyagok esetében, tájékoztatást adva az adott termék alkalmazhatósági köréről. Emellett más, meglepő effektusokról is beszámoltak a ragasztószalagok viselkedésében. Bizonyos körülmények között, például egy tekercs ragasztószalag lehúzása során, röntgentartományba eső sugárzás detektálható, ami az úgynevezett tribolumineszcencia jelenségével magyarázható [2].

Annak ellenére, hogy a ragasztószalagok leválásának sebességfüggése egyes tartományokban jól ismert, a leválási folyamatnak széles sebességtartományban nincs egységes leírása, illetve a fent említett

instabil leválás értelmezése sokszor nehezen követhető. A következőkben az általunk végzett mérésekkel kapcsolatos általános kísérleti tapasztalatok ismertetése után egy lehetséges modellt javasolunk, amivel egységesen és széles sebességtartományban leírható a leválási folyamat, illetve az ezzel együtt járó jelenségek – beleértve az instabilitást is – értelmezhetők.

Általános tapasztalatok: a leválás különböző sebességtartományai

Három, boltban kapható, hétköznapi használatra gyártott, azonos paraméterekkel (tömeg, szélesség, sugár) rendelkező ragasztószalag-tekercsot vizsgáltunk. Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban a színük alapján – az 1. ábrán látható barna, sárga és ezüst szalagként – különböztetjük meg őket.

Az alapvető tapasztalatok arra utalnak, hogy a leváláshoz szükséges F erő és v sebesség közti kapcsolat (F - v összefüggés) tanulmányozása adhat magyarázatot a jelenségekre. Ezért olyan berendezést célszerű használni, amely állandó sebességgel választja le a szalagot, miközben rögzíti az ehhez szükséges erőt. Ezeket a méréseket egy Material Testing System (továbbiakban MTS) berendezéssel végeztük. A gép mozgó húzófejébe egy könnyen forgó dobot rögzítettünk, amire felhelyeztük a vizsgált tekercsot, a szalag végét pedig egy fémlapra – ami a gép nem mozgó befogójához volt erősítve – tapasztottuk.

Kiegészítésként – az irodalomban kevésbé tanulmányozott alacsony sebességtartomány feltárására – terheléssel méréseket is végeztünk ismert tömegű súlyok szalagra való függesztetésével. Ez az összeállítás a hosszú ideig – akár 20-30 óráig – tartó méréseket is lehetővé tette. Továbbá a vizsgálati hőmérséklet – hőszugárzó és műanyag takaróhenger segítségével – (60 ± 1) °C-ig volt növelhető. Megjegyezzük, hogy ezeket a sebességfüggés szempontjából fontos, állandó terhelések mellett végzett méréseket – a hőmérséklet beállításával együtt – viszonylag egyszerű összeállítani és elvégezni. Akár egy iskolai szertárban is megvalósíthatók.

Bizonyos esetekben a leválasztott ragasztószalag felülete csikozott, ezért fáziskontraszt-mikroszkóppal nagy felbontású képeket készítettünk az érdekesnek vélt felületekről, szalagrészekről.

A szerzők köszönetet mondanak *Vörös Györgynek*, aki sokat segített a mérések tervezésében és dokumentálásában. Köszönettel tartozunk *Lendvai Jánosnak* a jelen tanulmány megírásához nyújtott hasznos szakmai tanácsaiért.



Máté Mihály az ELTE elsőéves fizikus MSc hallgatója. Aktívan vesz részt kutatásokban. A 2015-ös Országos Tudományos Diákköri Konferencián két dolgozattal is szerepelt. Ezek közül a jelen tanulmány témájáról készült munkával második helyezést ért el, valamint különdíjat is kapott. Jelenleg elméleti szilárdtest-fizikával foglalkozik. Rendszeresen segít a tudomány népszerűsítő rendezvényeken és fizikushallgatók közösségi eseményein.



Nguyen Quang Chinh az ELTE Anyagfizikai Tanszékének habilitált egyetemi docense. Évek óta foglalkozik az anyagok képlékeny alakváltozásának vizsgálatával, a plasztikus instabilitás és hasonló folyamatok leírásával, illetve elemzésével. 2016 februárjában ilyen témájú értekezéssel szerezte meg az MTA doktora címet. Oktatási és kutatási munkája mellett az ELTE Fizikai Intézet TDK-felelőseként elkötelezett segítőtje a mozgalomnak. Több hallgatója is szerzett helyezést országos konferenciákon.



1. ábra. A három vizsgált ragasztószalag: barna, sárga, ezüst.

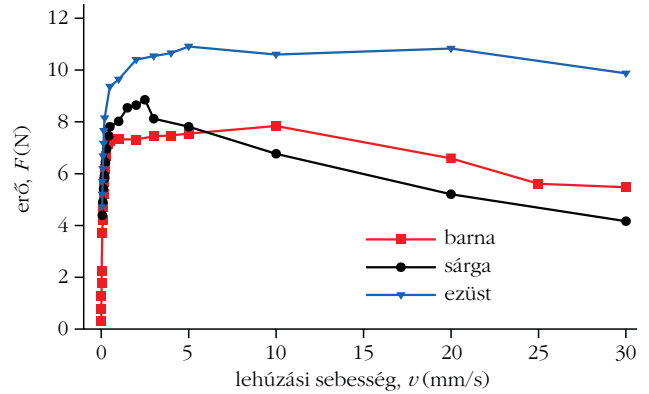
A 2. ábra mutatja a vizsgált ragasztószalagokra kapott kísérleti görbéket. A széles sebességtartományra kiterjedő $F-v$ összefüggések különböző érdekes leválási tendenciákat mutatnak.

Kis v sebességek esetén az alkalmazott F erő jellemzően hatványfüggvény szerint növekszik a sebesség növekedésével, azaz

$$F \propto v^n, \quad (1)$$

ahol az n kitevő értéke anyagtól függően 0,3–0,5 között van, összhangban az irodalmi adatokkal. A kísérleti eredményeink azt is mutatják, hogy ebben a ($v \leq 2$ mm/s) tartományban levegőbuborékok képződnek a töltő- (ragasztó) anyagban, megváltoztatva a ragasztós felület optikai tulajdonságait. Emiatt a lassú leválás során a szalag ragasztós felülete matt lesz.

Szalagtól függően, de általában 5 mm/s-nál nagyobb sebességű lehúzáshoz szükséges F erő már nem növekszik a v sebességgel, inkább telítésbe megy, vagy kis mértékben csökken a sebesség függvényében. Ezzel együtt levegőbuborékok képződése már nem tapasztalható a töltőanyagban, teljesen sima marad a levált szalag felülete. Továbbá, ebben a tartományban érezhetően hangosabban – sercegve, recsegve – válik le a szalag a tekercsről.

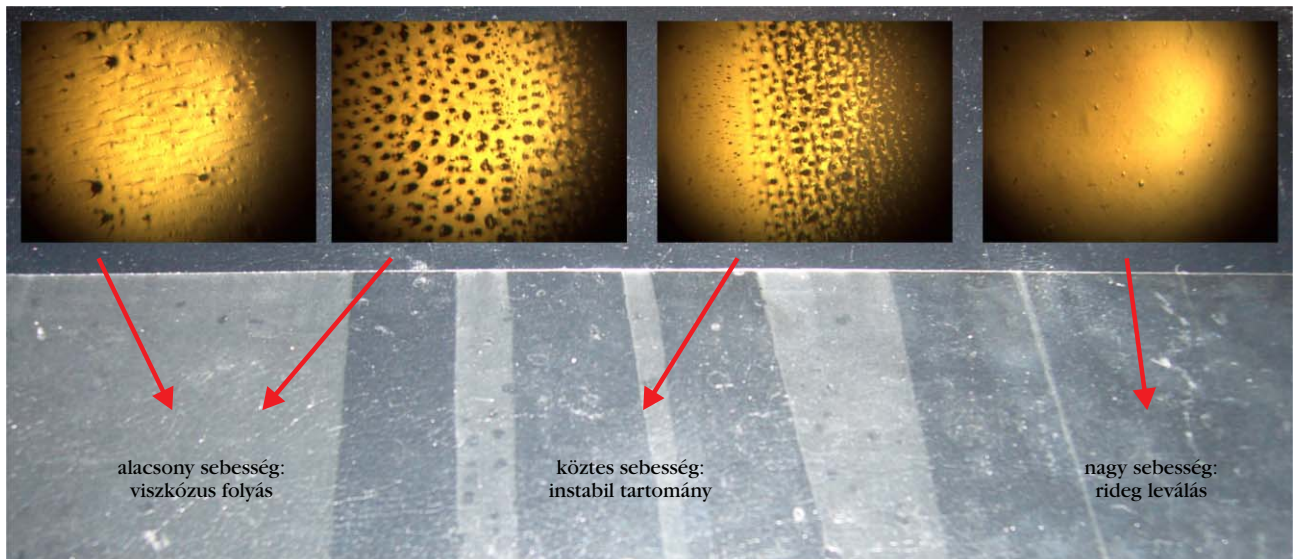


2. ábra. A vizsgált szalagokra jellemző erő-sebesség ($F-v$) összefüggések széles sebességtartományon.

Az említett kis és nagy sebességek tartományában szemmel láthatóan stabilan zajlik le a leválási folyamat. Ez „háziilag” is tapasztalható, ha egyszerűen szabad kézzel próbálunk – érzés szerint – állandó sebességgel, vagy nagyon lassan, vagy gyorsan lehúzni egy ragasztószalagot a tekercsről. E két tartomány közötti sebességek esetén azonban instabillá válik a leválási folyamat. Ebben a viszonylag szűk tartományban a szalag egyenletes sebességű lehúzása igen nehezen fenntartható, a leválási folyamat inkább szaggatottan – instabil módon – történik, a szalag kontrollálhatatlanul, kisebb és nagyobb sebességgel váltakozva válik le. Ezzel egyidejűleg jellegzetes, a levegőbuborékokat tartalmazó matt és buborékmentes sima részekből álló csíkozás jelenik meg a lehúzott szalagszakasz felületén, szaggatott hangjelenségek kíséretében. Ilyen, általunk készített videofelvételek a <http://matemihaly.web.elte.hu/ragaszto/appendix> címen érhetők el.

A 3. ábrán különböző sebességtartományokban lehúzott szalagok felületei láthatók. A fényes, illetve matt felületek váltakozása (buborékok képződése) egyértelműen korrelál az alkalmazott lehúzási sebességgel.

3. ábra. A különböző sebességekkel húzott sárga szalagon megfigyelhető optikai jelenségek.



A fent ismertetett tapasztalatok alapján a ragasztószalag leválásával kapcsolatos jelenségeket három szakaszra oszthatjuk:

1. kis sebességek tartománya stabil, csendes leválással és matt szalagfelülettel;
2. közbülső sebességtartomány instabil, hanggal kísért, szaggatott leválási folyamattal és csíkozott szalagfelülettel;
3. nagy sebességek tartománya stabil, folyamatos hanggal kísért leválási folyamattal és fényes, átlátszó szalagfelülettel.

Fontos megjegyezni, hogy a ragasztószalagok hátoldala sosem marad ragadós, vagyis a töltőanyag mindig tökéletesen leválik a tekercsről.

Mint említettük, a tartományok egységes tárgyalása, leírása eddig nem történt meg a szakirodalomban. A következőkben a kísérleti tapasztalatok alapján tekintjük át, hogy sebességtől függően milyen mechanizmusok szerint válhat le a ragasztószalag, illetve hogyan írható le egységesen az F - v összefüggés széles sebességtartományban.

Kis sebességek tartománya: a viszkózus folyás

Induljunk abból az elfogadott tényből, hogy a ragasztóanyag viszkózus folyása, illetve adhéziója játszik fontos szerepet a ragasztószalag leválásában. A töltőanyag folyására a reológiában használatos, nem-newtoni folyadékok viselkedését leíró

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

empirikus összefüggést alkalmazhatunk, ahol τ a nyírófeszültség, aminek hatására $\dot{\gamma}$ sebességű folyás (sebességgradiens) jön létre, K egy anyagtól és hőmérséklettől függő együttható.

Stacionárius folyás során feltételezhetjük a következő kapcsolatokat:

$$\begin{aligned} \tau &\propto F \\ \dot{\gamma} &\propto v, \end{aligned} \quad (3)$$

amelyek alapján a (2) formula átírható az (1) alakra. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy a kis sebességtartományban döntően a töltőanyag viszkózus folyása határozza meg a leválási folyamatot.

Megjegyezzük, hogy a viszkózus folyásra általában jellemző az erős hőmérsékletfüggés, vagyis állandó nyírófeszültség alkalmazása esetén a folyamat sebessége erősen függ a hőmérséklettől. Méréseinkben ez úgy jelenik meg, hogy állandó terhelés mellett húzásokat 20–60 °C (293–333 K) hőmérséklet-tartományban végezve a 4. ábra kísérleti eredményei (felső ábra) jól mutatják, hogy a v leválási sebesség gyorsan nő a T hőmérséklet függvényében. Már 10 °C-os hőmérséklet-növekedés hatására is legalább kétszer gyorsabban válik le a ragasztószalag. A 4. ábrán (alul) feltüntetett szokásos Arrhenius-típusú ($\ln v - 1/T$) ábrázolásból pedig látható, hogy adott terhelés

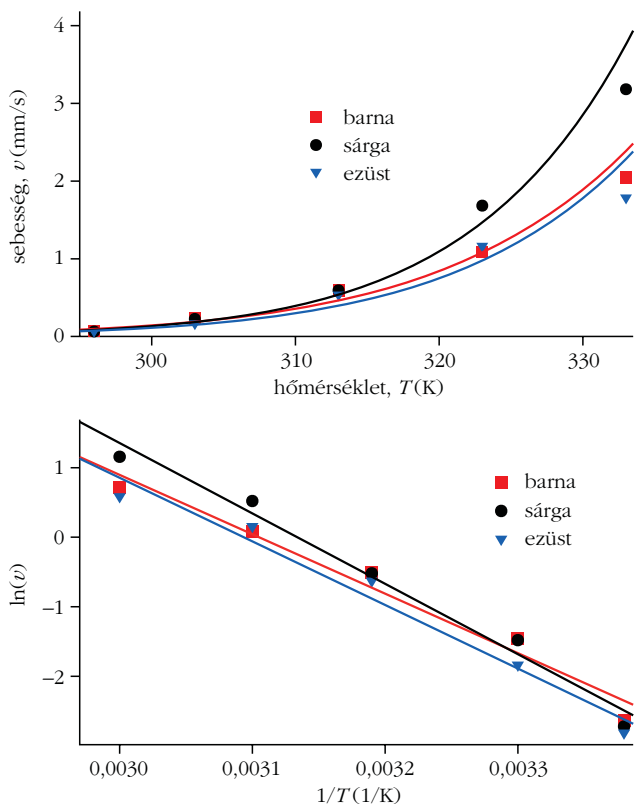
mellett a v leválási sebesség hőmérsékletfüggése a következő formulával adható meg:

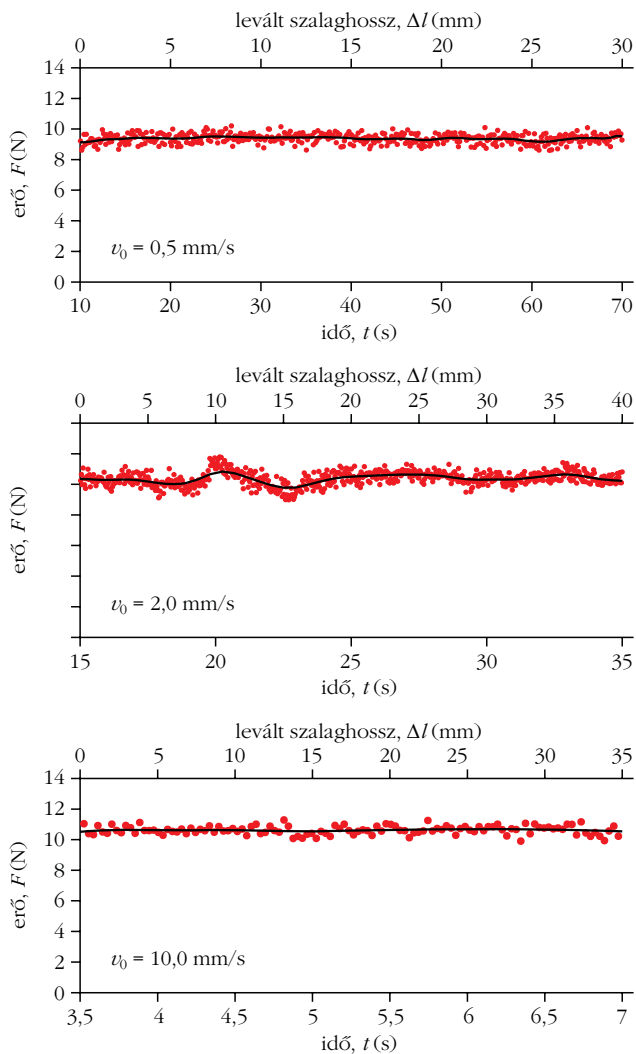
$$v = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (4)$$

ahol A egy sebességdimenziójú állandó, R az univerzális állandó. A Q mennyiség a viszkózus folyás aktiválási energiája, ami a viszkózus közeg molekuláit összetartó kötések energiájára, az anyag kohéziós erősségére jellemző. Fontos tudni, hogy nem csak a külső hatás (például mechanikai igénybevétel) miatt, hanem az állandó hőmozgás következtében, termikus aktiválás hatására is felszakadhatnak kötések. Külső terhelés nélkül azonban a rendszer dinamikus egyensúlyban van, nehéz észrevenni a termikus aktiválás hatását.

A ragasztótechnológiával foglalkozó szakirodalom szerint az általunk vizsgált úgynevezett nyomásérzékeny ragasztószalagok töltőanyagának leggyakoribb komponense a nagy molekulájú, nem-térhálós szerkezetű gumi, poliakrilát vagy poliuretán. A szerves, nagyméretű molekulák közötti kapcsolódások többféle energiaszinten is megjelennek. A gyengébb H-H kötést például csak 20-40 kJ/mol energia jellemzi, de az erősebb C-C vagy C-H kötések már jóval nagyobbak (350 kJ/mol, illetve 410 kJ/mol) [3]. Az általunk vizsgált ragasztószalagok esetében, a (4) egyenlet alapján meghatározott Q aktiválási energia 70–85 kJ/mol tartományban található. További vizsgálatok szükségesek annak tisztázására, hogy ilyen értékű

4. ábra. Állandó terhelés mellett mért v - T görbe (fölül) és a Q aktiválási energia meghatározása az $\ln(v)$ vs. $1/T$ összefüggésből (alul).





5. ábra. Az ezüst szalag különböző sebességű leválasztásához szükséges erő időbeli változása.

energiák milyen kötésekre jellemzők. A jelen dolgozat keretében elsősorban a termikus aktiválás jelentős hatását a ragasztószalagok leválására – már a szobahőmérséklet környékén – szeretnénk hangsúlyozni. A termikus hatások miatt erősen sebességfüggő a leváláshoz szükséges erő, főleg az alacsony sebességek tartományában, ahol a töltőanyag viszkózus folyása jelentős. Az eredetileg sima – teljesen átlátszó – szalagfelület mattá válását okozó levegőbuborékok akkor képződtek, amikor a leválás során a töltőanyag megnyúlik (plasztikusan deformálódik), illetve leválik a tekercsről.

Nagy sebességek tartománya: „rideg” leválási folyamat

A korábban ismertetett mechanikai, optikai és akusztikai megfigyelésekből már sejthető, hogy nagy sebességeknél lényegesen megváltozik a leválási folyamat dinamikája. Az a kísérleti tény, hogy teljesen sima (eredeti állapotához hasonlóan átlátszó, fényes) marad a levált szalag felülete, arra utal, hogy a fent említett, kis sebességeknél megfigyelt viszkózus folyás helyett a szilárd testekre jellemzően „ridegen” válik le a töltő-

anyag a tekercsről. A rideg leválás feltételezését a kísérő jellegzetes hang is megerősíti. Míg a kis sebességek esetén a leválasztásra befektetett munka döntően a töltőanyag „csendes” viszkózus folyására, a nagy sebességű leválásra a munka – a rideg leválás révén – inkább a ragasztószalag, mint rugalmas közeg rezgésére fordítódik, hangot kelteve. Feltehetően a nagy sebességek tartományában történő leválás során a töltőanyagban, a szalagfelületre merőleges (γ) irányban fellépő nagy sebességgradiens nagy Newton-féle belső súrlódást eredményez, ami „egyben tartja” a töltőréteget. Emiatt folyás nélkül – képlékeny deformáció és levegőbuborék képződése nélkül – „ridegen” válik le a töltőanyag, sebességtől szinte függetlenül. Tekintettel például arra, hogy a töltőréteg h vastagsága körülbelül $50 \mu\text{m}$, $v = 5 \text{ mm/s}$ sebességű leválasztás során a $du = v$ és $d\gamma = h$ értékeket becsülve, igen nagy,

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{d\gamma} \approx 100 \text{ s}^{-1}$$

sebességgradiens lép fel. Tehát ebben a sebesség-tartományban a ragasztóanyag a rugalmas testekéhez hasonló tulajdonságokat mutat.

Középső sebesség-tartomány: instabil leválási folyamat

Az 5. ábra mutatja, hogy beállított, állandó sebességű (MTS géppel való) húzás során hogyan változik az F erő (az $F-t$ összefüggés) a mérés során az ezüst szalag esetében.

Alacsony és nagy sebességeken az erő a gyártási egyenletlenségekből fakadó statisztikus bizonytalanságtól eltekintve közel állandó, ahogy az 5. ábrán fölül, illetve alul látható.

A középső – a vizsgált szalagok esetében körülbelül 2 mm/s és 5 mm/s közötti – tartományban a korábban említett instabil leválásra jellemző, hogy a felvett erő nem egy állandó érték körül szór. Az ilyen típusú leválásra jellemző ugrásokkal együtt jellegzetes szaggatott hangok is hallhatók, illetve a ragasztószalag felületén csíkozás jelenik meg. Ezek a kísérőjelenségek mind arra utalnak, hogy az instabilitás szakaszában a szalag inkább váltogatva a fent említett viszkózusan (kis sebességgel), illetve ridegen (nagy sebességgel) válik le.

Hangsúlyozzuk, hogy irodalmi adatok szerint az F erő a növekvő v sebesség függvényében leginkább az instabilitás szakaszában csökken. Jelen esetben is ez a tendencia tapasztalható a sárga és barna szalagok esetében. Az ezüst szalag esetében (lásd a 2. ábrán) azonban egyáltalán nem tapasztaltunk csökkenő erőt a növekvő húzási sebesség függvényében, az erős instabilitás szakaszában sem.

Az irodalomban az instabilitást – a szaggatott leválást – eddig a negatív meredekségű $F-v$ szakasz jelenlétével magyarázták [1], mert stabilan fenntartható, hosszabb ideig tartó leválás szempontjából ez a szakasz dinamikailag tiltott zónának tekinthető. A negatív meredekségű erő-sebesség ($F-v$) szakasz hatásának figyelembe vételével a ragasztószalagok leválásá-

nál fellépő instabilitás ugyanúgy megmagyarázható, mint az anyagtudományban már régóta ismert jelenség, az úgynevezett Portevin–Le Châtelier (PLC) típusú plasztikus instabilitás értelmezése [4].

Mivel az általunk vizsgált egyik (ezüst) ragasztószalag esetében az erős instabilitás ellenére sem tapasztalható csökkenő erő a növekvő leválasztási sebesség függvényében, a negatív meredekségű F – v szakasz hiányában másképpen kell értelmezni az instabil folyamatot. A következőkben egy lehetséges modellt vázolunk fel, amivel egységesen leírhatók a fent említett különböző F – v tartományok, illetve amivel a leválási folyamatokra jellemző jelenségek – buborékképződés, instabilitás – is értelmezhetők.

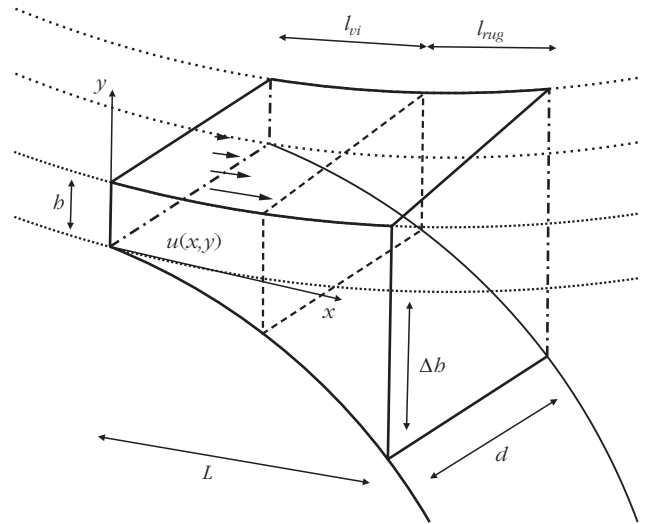
A különböző sebességtartományokban történő leválási folyamatok egységes tárgyalása

A ragasztóanyag szerkezetváltozása leválás során

Láttuk, hogy a töltőanyag az alacsony sebességek tartományában viszkózus folyadékként, míg a gyors leválasztásoknál szilárd testként viselkedett. A tartományok határának pontos helyét nem tudjuk megmondani, azt feltehetően nagymértékben befolyásolhatják a töltőanyag mikroszerkezetében történő változások. Maga a töltőanyag egy kolloid rendszer, amelyben óriásmolekulák kisebb molekulájú közegben – mint egy oldószerben – vannak elosztatva. Az ilyen anyag-halmazok sokszínű tulajdonságait a részecskék között működő erők határozzák meg. A lehetséges szerkezetváltozások általában az úgynevezett dilatancia jelenségével értelmezhetők [5]. Nyugalomban hagyva egy dilatáns folyadékot a diszpergált anyag a domináns – például Van der Waals – erők következtében viszonylag egyenletesen, rendezetten tölti ki a rendelkezésére álló teret az oldószerben úgy, hogy minden óriásmolekulát körülvesznek a kisebb méretű részecskék. Nyírás hatására az elosztatott molekulák közelebb kerülnek egymáshoz, de a belső feszültség miatt még megmaradnak a viszonylag rendezett állapotban. Azonban, egy határ-nyírófeszültségtől kezdve olyan közel kerülnek, hogy a taszítás már nem tud ellentartani, egy csomósodási folyamat indul meg, és így energetikailag metastabil helyzetbe kerül a rendszer. Ekkor a makromolekulák közül kiszorult oldószer nagyobb egységekbe tömörülve nagymértékű viszkozitásváltozást eredményezhet. A nyíróerő megszűnésekor a részecskék ismét szétszóródnak, visszaáll az alacsonyabb energiájú, rendezett helyzet.

A folyamatok modellszerű egységes leírása

Az általunk javasolt modell egyik alapfeltevése, hogy elemi lépésként a viszkoelasztikus töltőanyag deformációja egy meghatározott térrészben megy végbe, amely a leválás természete miatt különböző válási sebességű – és emiatt különböző mechanizmusra jellemző – zónákra osztható. Ezt a folyamatot semati-



6. ábra. A folyamatok felbontásának sematikus rajza.

kusan mutatja a 6. ábra. A szóban forgó térrész egy b töltőanyag-vastagságban, d szalagszélességben elterülő téglalapot, amely a szalaggal párhuzamosan, az elválás vonalától L mélységig nyúlik be a töltőanyagba. Továbbá feltételezzük, hogy a leválási folyamat az L hosszúságú szakasz egy részén rideg (rugalmas) leválással, míg másik részén viszkózus folyással megy végbe l_{rug} , illetve l_{vi} nagyságú szakaszokon. Így

$$L = l_{rug} + l_{vi} \quad (5)$$

Megjegyezzük, hogy a $d \cdot b \cdot l_{rug}$ térrészben a nagy sebességgradiens miatt keletkező belső súrlódás, valamint az említett szerkezetváltozás következtében növekvő kohézió miatt a töltőanyag nem képes viszkózus folyásra, és közelítőleg úgy viselkedik, mint egy rugalmas test.

A modell szerint egy beállított, átlagos v sebesség esetén különböző sebességgel és így különböző mechanizmussal válik le az elemi térrész l_{rug} és l_{vi} szakaszán, amelyek a leváláshoz szükséges részert F_{rug} rugalmas, illetve F_{vi} viszkózus erőnek nevezzük. A párhuzamos kapcsolás miatt a kísérletileg mérhető – eredő – F erő a két részert összege lesz, azaz

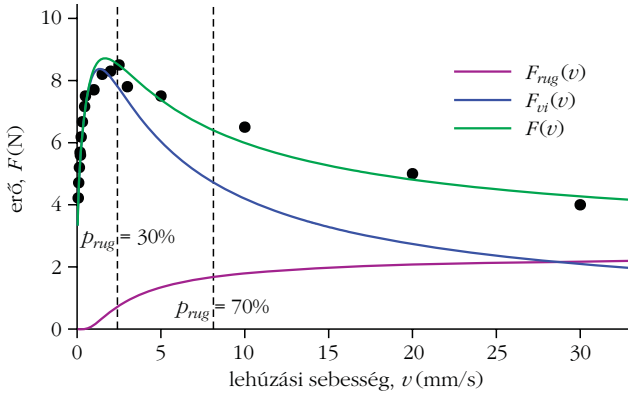
$$F(v) = F_{rug}(v) + F_{vi}(v). \quad (6)$$

Az internetes mellékletben – lásd a *Fizikai Szemle* <http://fizikaiszemle.hu> honlapja e havi részét – részletezett indoklás és számolások alapján az elemi hosszúságok v sebességfüggései a következő formulákkal kimutathatók:

$$l_{vi} = L \left[1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right) \right], \quad (7.a)$$

$$l_{rug} = L \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right), \quad (7.b)$$

valamint



7. ábra. Sárga szalag adatsorára illesztett függvény.

$$F(v) = \frac{dE\Delta bL}{b} \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right) + \frac{dKL}{b^n(n+1)} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right)\right] v^n, \quad (8)$$

ahol v_0 egy sebességdimenziójú állandó, K és n a (2) egyenletben szereplő együtthatók. E a töltőanyag nagyobb sebességekre jellemző Young-modulusa, Δb pedig a rugalmas tartomány megnyúlása az F_{rug} hatására.

Érdekes belátni, hogy a (8) konstitutív egyenlet az alábbi módon is kifejezhető:

$$F(v) = \frac{dE\Delta bL}{b} p_{rug}(v) + \frac{dKL}{b^n(n+1)} v^n p_{vi}(v), \quad (9)$$

ahol

$$p_{vi} = 1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right), \quad (10.a)$$

$$p_{rug} = \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right), \quad (10.b)$$

amely mennyiségek a viszkózus folyás, illetve a rugalmas deformáció (rideg leválás) bekövetkezési valószínűségét jelölik. Ezzel a makroszkopikusan mérhető F erő – mint várható érték – valószínűségi értelmezést kap és a (8), illetve a (9) alakban írható. Ez az általunk javasolt konstitutív egyenlet fizikai jelentése. A valószínűségi kép minden bizonnyal érthetőbbé teszi és alátámasztja a téglatesttől absztrahált deformációs térrészek nehezen elképzelhető dinamikáját.

A modell és kísérleti tapasztalatok összehasonlítása

A 7. ábra a sárga ragasztószalagra kísérletileg kapott $F-v$ adatokra illesztett függvényeket mutatja. A mért, illetve illesztett paraméterek értékei az 1. táblázatban láthatók. Az eredmények azt mutatják, hogy a választott paraméterek mellett a (8) konstitutív formulával megadott elméleti függvény – a paraméterek megfelelő választása mellett – jól leírja a mért adatokat, megerősítve a új konstitutív egyenlet alkalmazhatóságát.

1. táblázat

Az $F(v)$ függvény paraméterei a sárga ragasztószalagra

mért paraméterek	illesztett paraméterek
$n = 0,282$	$L = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
$d = 0,048 \text{ m}$	$\Delta b = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
$b = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}$	$K = 7,6 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$
	$E = 5,0 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
	$v_0 = 2,9 \text{ mm/s}$

A szalag d szélessége gyárilag adott. A b töltőanyag-vastagság mikroszkópos mérésekkel egyszerűen meghatározható. Továbbá, alacsony sebességeken az eredő erőben szereplő rugalmas tag elhanyagolható, ezért a lassú mérések során számított n kitevő felhasználható az egységes formulában is.

A mért adatok felhasználásával vizsgáljuk meg, hogy mely értékeket vehetik fel az anyagi állandók, együtt-hatók! Az illesztendő paramétereket tekintve, L a mért b nagyságából megbecsülhető, emellett tegyük fel, hogy a $\Delta b/b$ relatív deformáció 10%-os. A v_0 sebességdimenziójú állandó a kísérleti $F-v$ összefüggés élesen emelkedő szakasza miatt könnyen illeszthető a grafikonra. Ezután beállíthatók a legfontosabb K és E állandók, amelyek rendre a viszkózus és a rugalmas folyamatok súlyát határozzák meg az F erőben. Megjegyezzük, hogy az 1. táblázatban szereplő illesztett értékek rendkívül érzékenyek a mérési körülményekre.

A leválási folyamatát kísérő jelenségek értelmezése az új konstitutív formula alapján

A töltőanyagban keletkező levegőzárványok értelmezése

A gyors tartományban közel sebességfüggetlen erő és fényes, buborékmentes felületet figyelhetünk meg. A modell leíró egyenlet szerint a viszkózus tag lecsengése (alacsony valószínűsége) esetén az eredő erőt a telítődő rugalmas erő adja. Ez azért lehetséges, mert ilyen sebességeken a szerkezetváltozás következtében megnő az anyag kohéziója és az elasztikus folyamat térrésze (valószínűsége) annyira felülkerekedik a viszkózusén, hogy a deformációs tér viselkedését gyakorlatilag csak ez határozza meg. Ezért az $l_{rug} b d \approx L b d$ teljes térfogattal, tehát ilyenkor nincs buborékképződés.

Alacsony sebességeket alkalmazva a folyamatok súlyai felcserélődnek. A domináns viszkózus folyás és a kicsiny – ám jelentős szerepű – rugalmasan leszakadó anyagdarabkák képesek buborékokat kelteni. Ezt a feltevést megerősíti a 3. ábrán látható legalacsonyabb sebességen készült mikroszkópos felvétel, amely már oly lassú leválást örökített meg, hogy a rugalmas folyamat csak apró, azonnal eltűnő levegőzárványokat tudott létrehozni, kialakítva a jellegzetes barázdált folyási képet a szalag felületén.

Az instabil intervallumon természetesen a lassú és gyors tartományok optikai tulajdonságai változva, az éppen aktuális sebesség függvényében jelentkeznek.

Az instabil leválás dinamikai jellemzése

Mindhárom vizsgált ragasztószalag esetében az illesztések azt mutatják, hogy a (8) és (9) egyenletekben szereplő v_0 karakterisztikus sebesség értéke 2,5 mm/s körül van. Ezzel pedig a (10.a) és (10.b) egyenletekkel megadott valószínűségi mennyiségek 0,3 és 0,7 közötti – összemérhető – értékeket vesznek fel, azaz a két alapmechanizmus – a viszkózus folyás és a rideg leválás – 30–70% közötti valószínűséggel bekövetkezik, ha a leválási folyamat 2 mm/s és 7 mm/s közötti v sebességgel történik. Ez azt jelenti, hogy ebben a sebességtartományban mind a két alapmechanizmus bekövetkezésének lehetőségére számítanunk kell.

Ennek ismeretében magyarázható meg az a kísérleti tapasztalat, ami az állandó erővel végzett húzási mérések során többször előfordult: a fent említett instabil tartományhoz tartozó sebességgel állandósult leválás beállta után a szalag hirtelen, jóval nagyobb sebességgel „megugrott”, és a gyors leválás következtében a folyamat kontrollálhatatlanná vált. Adott – beállított – sebességgel végzett mérések esetén az állandó átlagos sebességkényszer miatt a megugrás csak átmeneti, mert mindig követi egy lassú folyamat, ami miatt a leválás „pattogóvá” vált. Egyszerűen, kézzel húzva is könnyen érzékelhető, hogy a szalag egyenletes sebességű leválasztása igen nehezen fenntartható ebben a közbülső sebességtartományban. Bár további mikroszerkezeti és dinamikai vizsgálatokra van szükség az instabil leválás elemzéséhez, az a véleményünk, hogy az instabil szakasz létezése megerősíti a fent tárgyalt új konstitutív egyenlet érvényességét a ragasztószalagok leválási folyamatának a leírásában.

Összefoglalás

A ragasztószalagok leválását széles sebességtartományban vizsgáltuk. Kísérleti eredmények azt mutatják, hogy a leválási folyamat három tartományba osztható. Lassú húzásoknál a szükséges erő értéke

nagyon erősen függ a sebességtől, ami azzal magyarázható, hogy ebben az esetben a leválási folyamat a töltőanyag termikusan aktivált, levegőzárványok képződésével járó viszkózus folyása határozza meg. A nagy sebességek tartományában lényegesen megváltozik a leválási folyamat dinamikája. A fellépő nagy belső súrlódás miatt – sebességtől szinte függetlenül, viszonylag nagy erővel – folyás nélkül, képlékeny deformáció és levegőbuborék képződése nélkül, „ridegen” válik le a töltőanyag. E alapmechanizmusokkal magyarázhatók a hétköznapi használati szokások, miszerint szőrtelenítéskor a kozmetikus a gyantát hirtelen (gyorsan) tépi le, mert a szőrszálak kihúzásához nagyobb erőre van szükség. Viszont, a sebtapaszt (vagy gyerekeknél a szemtakaró tapaszt) már nagyon lassan húzzuk le, nem bántva a szőrszálakat vagy a szempillát. A kis és nagy sebességek között, egy szűk közbülső – átmeneti – tartományban mind a két alapmechanizmus összemérhető valószínűséggel bekövetkezhet, ami instabil folyamathoz vezet.

A leválási folyamat leírásához javasoltunk egy új konstitutív formulát, ami széles sebességtartományban jól leírja a kísérleti tapasztalatokat. Az új konstitutív egyenlet segítségével nemcsak az egyes sebességtartományokban érvényesülő alapmechanizmusok szerepe magyarázható meg, hanem a leválási folyamat során megfigyelhető kísérőjelenségek is értelmezhetők.

Irodalom

1. D. C. Hong, S. Yue: Deterministic chaos in failure dynamics: Dynamics of peeling of adhesive tape. *Physical Review Letters* 74 (1995) 254–257.
2. C. G. Camara, J. V. Escobar, J. R. Hird, S. Putterman: Correlation between nanosecond X-ray flashes and stick-slip friction in peeling tape. *Nature* 455 (2008) 1089–1093.
3. University of Waterloo, bond lengths and energies. <http://www.science.uwaterloo.ca/cchieh/cact/c120/bondel.html>.
4. Bérces G.: A Portevin–LeChatelier effektus. *Magyar Fizikai Folyóirat* 33 (1983) 494–498.
5. N. J. Wagner, J. F. Brady: Shear thickening in colloidal dispersions. *Physics Today* 62 (2009) 27–32.

MTA DOKTORI VÉDÉS

Nguyen Quang Chinh, az ELTE Anyagfizikai Tanszék habilitált docense 2016 márciusában MTA doktori címet szerzett *Lapcentrált köbös fémek és ötvözetek képlékeny alakváltozási folyamatainak leírása és elemzése* című értekezésének megvédésével.

A fémek képlékeny alakváltozása, a szilárdságnövelés mikromechanizmusai több évtizede tanulmányozott és még ma sem teljesen tisztázott problémakörök, amelyek az utóbbi időben bevezetett nagymértékű deformációs eljárások alkalmazásával is tovább bővülnek.

Az értekezés több olyan, új kísérleti eredményt is tartalmaz, amelyek korszerű mérőeszközök – például atomerő-mikroszkóp, nano- és mikroindentációs berendezések, többfunkciós pásztázó elektronmikroszkóp – felhasználásával születtek. Így például, a mikro- és nanoindentációs eszköz használatával, a világon elsőként kezdődött meg az ELTE Anyagfizikai Tanszékén képlékeny instabilitások mélységérzékeny benyomódással történő tanulmányozása. Az instabilitás fellépésekor minőségi változás áll be az alakváltozás mechanizmusában, a sima stabil deformáció oscillálóvá válik. A technológiákban a termékek minősége – például a váratlan felületdurvulás – miatt kell elkerülni ezt a deformációlokalizációval járó jelenséget és megmaradni a stabil deformáció tartományában.

Nguyen Quang Chinh egy további fontos eredménye, hogy új, széles deformációtartományban érvényes konstitutív egyenletet állított fel a polikristályos lapcentrált köbös fémek alakváltozására, amely magában foglalja a kutatók és mérnökök által korábban használt Hollomon-, illetve Voce-féle formulákat is. Az új konstitutív egyenlet a nagymértékű deformációs – szemcsefinomító – eljárások gyakorlatában is hasznosítható.

Mikrooszlopokon végzett összenyomási és indentációs mérésekkel kimutatta, hogy a szobahőmérsékleti deformáció során is jelentős szerepe van a szemcsehatárcsúszásnak. Továbbá összefüggést javasolt, amellyel egységesen leírható az ultrafinomszemcsés lapcentrált köbös fémek és szilárd oldat ötvözetek folyáshatárának szemcseméretfüggése. Ezen eredmények fontosak az ultrafinomszemcsés anyagok mikroberendezésekben való potenciális felhasználásához.

Nguyen Quang Chinh az MTA doktori cím megszerzése után – magyar kollégákkal és az amerikai, orosz, japán partnerekkel továbbra is együttműködve – elsősorban az ultrafinomszemcsés anyagok extrém mechanikai tulajdonságait, az ötvözők hatását tervezési tanulmányozni különböző anyagokban, foglalkozik továbbá a plasztikus instabilitás és hasonló folyamatok leírásával, illetve statisztikai elemzésével is.

SZÁMOLÁSI FÜGGELÉK

– Ragasztószalagok leválásának dinamikája: sebességfüggés és instabilitás

Máté Mihály, Nguyen Q. Chinh
ELTE, Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék

A ragasztószalagok leválási folyamatainak modellszerű, egységes leírása

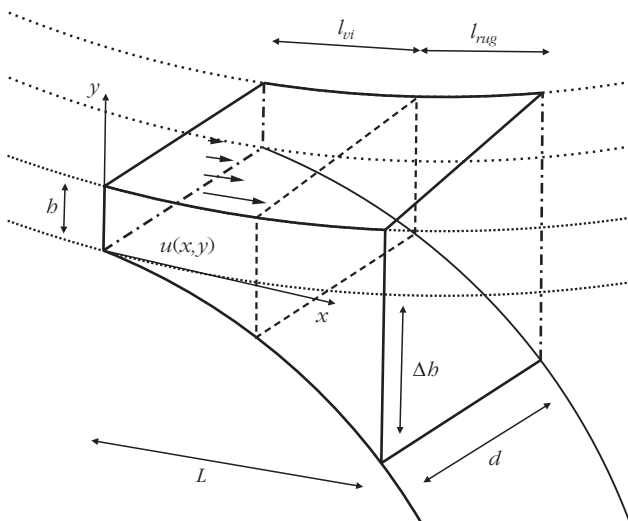
Az általunk javasolt modell egyik alapfeltevése, hogy elemi lépésként a viszkoelasztikus töltőanyag deformációja egy meghatározott térrészben megy végbe, amely a leválás természete miatt különböző leválási sebességű – és emiatt különböző mechanizmusra jellemző – zónákra osztható. Ezt a folyamatot sematikusán mutatja az *F1. ábra*. A szóban forgó térrész egy b töltőanyag-vastagságban, d szalagszélességben elterülő téglatest, amely a szalaggal párhuzamosan, az elválás vonalától L mélységig nyúlik be a töltőanyagba. Továbbá feltételezzük, hogy a leválási folyamat az L hosszúságú szakasz egy részén rideg (rugalmas) leválással, míg másik részén viszkózus folyással megy végbe l_{rug} , illetve l_{vi} nagyságú szakaszokon. Így

$$L = l_{rug} + l_{vi} \quad (F1)$$

A javasolt modellünk szerint egy beállított, átlagos v sebesség esetén különböző sebességgel és így különböző mechanizmussal válik le az elemi térrész l_{rug} és l_{vi} szakaszán, amelyeken a leváláshoz szükséges részerőt F_{rug} rugalmas, illetve F_{vi} viszkózus erőnek nevezzük. A párhuzamos kapcsolás miatt a kísérletileg mérhető – eredő – F erő a két részerő összege lesz, azaz

$$F(v) = F_{rug}(v) + F_{vi}(v). \quad (F2)$$

F1. ábra. A folyamatok felbontásának sematikus rajza.



Részerők

Rugalmas erő

A rugalmas térfogatban kijelölt kis téglá egytengelyű nyújtására alkalmazva a Hooke-törvényt:

$$\sigma = E \varepsilon, \quad (F3)$$

ahol σ az alkalmazott feszültség, ε a relatív deformáció és E pedig a töltőanyag nagyobb sebességtartományokra jellemző Young-modulusa. A

$$\sigma = \frac{F_{rug}}{A} = \frac{F_{rug}}{d l_{rug}} \text{ és } \varepsilon = \frac{\Delta b}{b}$$

mennyiségekkel az (F3) képlet kifejezhető az F_{rug} erőt és Δb megnyúlást is tartalmazó formában:

$$F_{rug} = EA \frac{\Delta b}{b} = E d l_{rug} \frac{\Delta b}{b}, \quad (F4)$$

ahol $A = d l_{rug}$ a rugalmas térrész keresztmetszete.

Viszkózus erő

Az előbbinél összetettebb folyamat írja le a sűrű töltőanyag belső súrlódásából származó erőt. Tekintsük a d, b, l_{vi} élhosszúságú téglatestet, amelyben a szalag hosszával párhuzamos áramlás valósul meg az elválási él mögött. Feltételezve, hogy az u sebességtér a d szélesség mentén homogén, továbbá a szalaggal párhuzamosan $x \in [0, l_{vi}]$ intervallumban a sebesség nullától lineárisan nő egészen a v leválási sebességig; $y \in [0, b]$ rétegvastagság irányában szintén lineárisan változik a sebesség úgy, hogy b -ban zérus. Ezekkel a feltevésekkel a sebességtér:

$$u(x, y) = \frac{x}{l_{vi}} \frac{b-y}{b} v, \quad (F5)$$

amelynek alapján az $u(x, y)$ y irányú gradiense:

$$\gamma = \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} = -\frac{x}{b l_{vi}} v. \quad (F6)$$

Ennek ismeretében a $\tau = K \gamma^n$ egyenletnek megfelelően a τ nyírófeszültség is megkapható,

$$\tau = K \left| \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \right|^n = K \left(\frac{x}{b l_{vi}} v \right)^n, \quad (F7)$$

amiből pedig az F_{vi} is meghatározható:

$$F_{vi} = \int \tau dA = \int_0^{l_{vi}} \tau ddx = \int_0^{l_{vi}} K d \left(\frac{v}{b l_{vi}} \right)^n x^n dx, \quad (F8)$$

vagy egyszerűbb alakban

$$F_{vi} = \frac{K dl_{vi}}{b^n (n+1)} v^n. \quad (F9)$$

Az eredő erő sebességfüggése

Az általunk javasolt modell másik lényeges pontja az eredő erő sebességfüggéséhez szükséges l_{vi} és l_{rug} hosszúságok sebességfüggésének megadása. Az előbbieken tárgyalt szerkezetváltozásból és tapasztalatokból mondható, hogy a nagyon kicsi sebességek tartományában szinte csak a viszkózus folyás határozza meg a leválási folyamatot. A sebesség növekedésével a rugalmas tartomány kiszélesedik. A nagy sebességek tartományában pedig a rugalmas deformáció fogja meghatározni a leváláshoz szükséges erőt.

Ilyen megfontolások, valamint az (F1) összefüggés alapján a két keresett hosszúság sebességfüggésének olyannak kell lennie, hogy

$$\begin{aligned} l_{vi} &\rightarrow L, \text{ ha } v \rightarrow 0 \text{ és} \\ l_{rug} &\rightarrow L, \text{ ha } v \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (F10)$$

Így kézenfekvő, hogy a két szakasz hosszúságát telítési függvénnyel írjuk le, oly módon, hogy a modellben feltételezett aktuális térrész L karakterisztikus hosszúságát állandónak tartjuk. Tekintsük egy elemi – L hosszúságú – anyagdarab leválását eredményező kötések felszakadását! Az l_{vi} sebességfüggésének értelmezésében abból indulunk ki, hogy az említett termikus aktiválás hatása mellett a t időpontban még nem felszakadt kötések N száma kis dt idő alatt dN -nel változik, és

$$\begin{aligned} dN &\propto dt \text{ és } dN \propto N, \\ dN &= -\alpha N dt, \end{aligned} \quad (F11)$$

ahol α egy állandó. Ebben a megfontolásban hallgatólagosan feltételezzük, hogy az L karakterisztikus hosszúságnak megfelelően összesen N_0 kötést kell felszakítani a leválási folyamatban. Az (F11) egyenletből könnyen kiszámítható, hogy a t időpontban még nem felszakadt kötések száma:

$$N = N_0 \exp(-\alpha t), \quad (F12)$$

amiből a viszkózus folyamat során felszakadt kötések N_{fel} számát a következő formulával kapjuk:

$$N_{fel} = N_0 [1 - \exp(-\alpha t)]. \quad (F13)$$

A modellben feltételezett l_{vi} szerepéről könnyen belátható, hogy

$$\frac{l_{vi}}{L} = \frac{N_{fel}}{N_0} = 1 - \exp(-\alpha t), \quad (F14)$$

amiből pedig

$$l_{vi} = L [1 - \exp(-\alpha t)]. \quad (F15)$$

Az állandó v sebességű leválási folyamat során nyilvánvalóan az l_{vi} (és l_{rug}) hosszúságok értéke stacionárius lesz. Azonban feltételezhető, hogy a stacionárius állapot beállításához szükséges t idő függ a v sebességtől. Nagyobb t kis v mellett valószínűleg meg és fordítva. Így fordított arányosságot feltételezve az (F15) összefüggés átírható úgy, hogy

$$l_{vi} = L \left[1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right) \right] \quad (F16.a)$$

és ezzel együtt

$$l_{rug} = L \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right), \quad (F16.b)$$

ahol v_0 a felszakadási folyamat időbeli lefolyásának gyorsaságát kifejező állandó.

Az (F16.a) és (F16.b) kifejezéseket az (F9), illetve (F4) formulákba behelyettesítve, az (F2) egyenlet alapján a ragasztószalag leválásának konstitutív egyenletét a következő alakban kapjuk:

$$\begin{aligned} F(v) &= \frac{dE\Delta bL}{b} \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right) + \\ &+ \frac{dKL}{b^n(n+1)} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right) \right] v^n. \end{aligned} \quad (F17)$$

Érdeemes belátni, hogy a (17) konstitutív egyenletet az alábbi módon is kifejezhetjük:

$$\begin{aligned} F(v) &= \frac{dE\Delta bL}{b} p_{rug}(v) + \\ &+ \frac{dKL}{b^n(n+1)} v^n p_{vi}(v), \end{aligned} \quad (F18)$$

ahol

$$p_{vi} = 1 - \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right), \quad (F19.a)$$

$$p_{rug} = \exp\left(-\frac{v_0}{v}\right), \quad (F19.b)$$

amely mennyiségek a viszkózus folyás, illetve a rugalmas deformáció (rideg leválás) bekövetkezési valószínűségét jelölik. Ezzel a makroszkopikusan mérhető F erő – mint várható érték – valószínűségi értelmezést kap és az (F17), illetve az (F18) alakban írható. Ez az általunk javasolt konstitutív egyenlet fizikai jelentése. A valószínűségi kép minden bizonnyal értetőbbé teszi és alátámasztja a téglatesttől absztrahált deformációs térrészek nehezen elképzelhető dinamikáját.