
Szakdolgozat

**Képlékeny deformációk folyamatára
jellemző alakítási keményedés és
sebességérzékenységi tényező vizsgálata**

Rácz Gergely
Fizika BSc



Témavezető:

Nguyen Quang Chinh
MTA doktora

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Anyagfizikai Tanszék
2018

Kivonat

Ebben a munkában a képlékeny deformációk folyamatára jellemző sebességérzékenységi tényező és az alakítási keményedés stabilizáló hatását vizsgáltam, az ismert stabilitási kritériumok alapján. Vizsgálataim kísérleti tapasztalatokon, de elsősorban szimulációs számolásokon alapulnak. Feltételezéseink szerint a szuperképlékeny deformáció során, amikor az anyag több száz százalékos megnyúlásra is képes, a nagy értékű sebességérzékenységi tényező mellett figyelembe kell venni az alakítási keményedés hatását is. Így szuperképlékeny deformáció során, a szokásos stacionárius formula helyett, egy újabb, az alakítási keményedést is tartalmazó egyenletet javasoltunk. Az új egyenlet használata megfelel a stabilitási kritériumnak, ami így nagy, nyak-mentes nyúláshoz vezethet, ahogy az meg is figyelhető a gyakorlatban.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Nguyen Quang Chinh tanár úrnak a kitartó témavezetést és a rengeteg segítséget, amit tőle kaptam. Külön köszönöm a közös munka során mutatott végtelen tapintatosságát a fizikus focikon elszenvedett vereségekkel kapcsolatban.

Szeretném megköszönni az Anyagfizikai Tanszék munkatársainak a laboratóriumi mérések során nyújtott segítséget, továbbá köszönöm mindenkinek, aki elolvasta a munkát és véleményével is elősegítette elkészültét.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Elméleti háttér	2
2.1. Egytengelyű nyújtás folyamata	2
2.2. Képlékeny alakítás stabilitása	4
2.3. Szuperképlékeny alakítás	6
2.4. Hőmérséklet hatása a képlékeny alakításra	8
3. A sebességérzékenységi tényező és alakítási keményedés hatásának vizsgálata	9
3.1. Sebességérzékenységi tényező hatása: kvázi stabil nyújtási deformáció	9
3.2. Alakítási keményedés stabilizáló hatása	12
3.2.1. Új egyenlet bevezetése	12
3.2.2. Stabilitási kritériumok vizsgálata az új egyenlet alapján	13
3.2.3. Szimuláció számítások és eredményeik	17
3.2.4. Kísérleti tapasztalatok értelmezése új egyenlet alapján	20
4. Összefoglalás	25
Hivatkozások	26
Nyilatkozat	27

Ábrák jegyzéke

1. Feszültség - deformáció ($\sigma - \varepsilon$) diagram	3
2. Feszültség-deformációsebesség és sebességérzékenység változása a hőmérséklettel	8
3. Várható teljes megnyúlás a sebességérzékenységi tényező függvényében	11
4. Várható teljes megnyúlás a sebességérzékenységi tényező függvényében különböző mértékű alakítási keményedés esetén	15
5. Alakítási keményedés hatása a teljes megnyúlásra, különböző keresztmetszetű nyak esetén	16
6. Alakítási keményedés hatása a teljes megnyúlásra, különböző sebességérzékenységi tényező esetén	16
7. Szimuláció a sebességérzékenységi tényező és alakítási keményedés hatásának kimutatására	19
8. Anyagvizsgáló (Material Testing System, MTS) berendezés	22
9. Acetát műanyag minta feszültség-deformáció ($\sigma - \varepsilon$) görbéi különböző deformációs sebességek és sebesség-ugratás esetén	23

1. Bevezetés

Képlékeny alakításnak hívjuk azt az alakítási módot, mikor a deformált mintadarab maradandó alakváltozást szenved a külső erőhatás megszűnése után is. Abban az esetben, ha a vizsgált test visszanyeri az eredeti formáját a külső erőhatás megszűnése után, akkor rugalmas alakváltozás történt. A képlékeny alakítás jellemzően akkor következik be, ha az anyagban ható feszültség eléri és meghaladja az ún. folyáshatárt. Képlékeny deformáció során az anyagok többségénél megfigyelhető, hogy az alakítás hatására nő a deformáció növeléséhez szükséges feszültség. Ez az ún. alakítási keményedési jelenség, ami az egyik fontos mechanizmus az anyagok szilárdságának növelésekor. Az anyagok alakításának vizsgálata fontos terület, az egyes alakítási eljárások során az anyagot különböző céloknak megfelelő tulajdonságúvá lehet alakítani.

A szokásos szakítópróbák során a legtöbb anyag hamar, már pár százalékos képlékeny megnyúlás után eltörik, nyakasodik, vagy elszakad. Az anyagok többsége nem nyújtható az eredeti hosszának 150%-a fölé, még magas hőmérsékleten sem. Ötvözetek azon tulajdonságát nevezzük szuperképlékenységgnek, mikor megfelelően magas hőmérsékleten és megfelelő deformációsebesség mellett az anyag az eredeti hosszának több száz százalékára is megnyújtható szakadás, illetve látható nyakképződés nélkül.

A deformációs folyamat során a mintán spontán, vagy mesterségesen is kialakulhat nyak. A nyak kialakulása következtében lokálisan csökken a keresztmetszet, ezzel pedig lokálisan nő a folyásfeszültség. Ennek következtében gyorsabban fejlődik a nyak, ami az anyag szakadásához vezet. Ebben a munkában arra szeretnék mutatni, hogy az alakítási keményedés a nyak visszafejlődését eredményezheti, így növelve a maximális megnyúlás értékét. Szuperképlékeny alakítás során a sebességérzékenységi tényező mellett az alakítási keményedés szerepét is figyelembe kell venni.

2. Elméleti háttér

2.1. Egytengelyű nyújtás folyamata

Egytengelyű húzási deformáció során, a kezdetben l_0 hosszúságú és A_0 keresztmetszetű minta pillanatnyi hossza és keresztmetszete rendre l és A , adott t időpillanatban, miközben F erővel deformáljuk az anyagot. A nyújtóerő hatására, a haránt összehúzódás jelensége miatt a keresztmetszet csökken, ezért a keresztmetszet változását leíró $\dot{A} < 0$. A nyújtás során a már említett folyáshatár elérése felett beszélhetünk képlékeny alakításról. Egytengelyű nyújtás során a mintában ható σ nyújtó feszültséget a

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

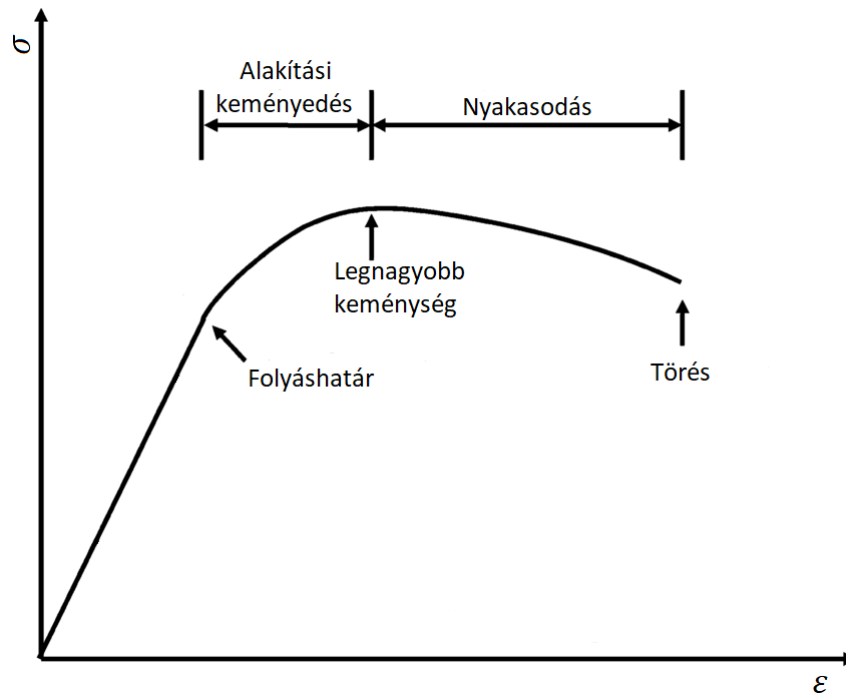
képlettel adjuk meg. Ha az adott t időpillanatban a kis dt idő alatt a minta megnyúlása dl , akkor a minta alakváltozására jellemző ε deformációjának a $d\varepsilon$ megváltozását a

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (2)$$

formulával kapjuk, amit kiintegrálva megkaphatjuk a teljes ε deformációt l_0 -ról l hosszra nyújtás esetén [1] alapján:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (3)$$

Az 1. ábrán látható általános esetben a megnyúlás-feszültség diagram, az alakítás egyes szakaszaival megjelölve.

1. ábra. Feszültség - deformáció ($\sigma - \varepsilon$) diagram

Egyszerű deformáció során megfigyelhető, hogy kezdetben a feszültség és deformáció között egyenes arányosság áll fenn. Ez a rugalmas alakváltozás szakasza. Ebben a szakaszban az ε deformáció és σ feszültség közti kapcsolatot az ún. Hooke-törvény írja le a $\sigma = E \cdot \varepsilon$ alakban, ahol E a Young-modulust jelöli. A rugalmas alakváltozás a rugalmassági határ vagy folyáshatár eléréséig tart. Ez az a legnagyobb erő, aminél kisebbek hatására a minta csak rugalmas alakváltozást szenved, vagy másképp fogalmazva, az a legkisebb erő, ami a képlékeny alakváltozás megindulásához szükséges. Az ezt követő további deformáció már maradandó változást idéz elő a mintában, ekkor beszélünk képlékeny alakváltozásról, vagy más néven plasztikus deformációról. A deformáció ezen szakaszán továbbra is nő σ értéke ε függvényében, de már nem áll fenn közöttük az egyenes arányossági kapcsolat. Ezt követően, σ egy maximális értékének elérése után, csökkenni fog feszültség, mert az anyagon elindul a nyakasodás jelensége. Ekkor σ csökkenést fog mutatni egészen addig, amíg a minta el nem törik vagy el nem szakad.

A valóságos testek az 1. ábrán láthatónál sokkal bonyolultabb viselkedést mutatnak, ugyanis az alakíthatóságuk nem csak a feszültségtől és az előzetes deformációtól függ. Ha σ feszültséggel terhelünk egy mintát, akkor azon $\dot{\varepsilon}$ sebességű deformáció megy végbe. A deformáció sebessége azonban nem csak a σ feszültség értékétől függ, hanem annak változási sebességétől, az előzetes deformációtól és egyéb szerkezeti tényezőktől is. Ez alapján felírható, a deformáció sebessége egy $\dot{\varepsilon} = f(\sigma, \dot{\sigma}, \varepsilon, T, S_i, \dots)$ függvény alakjában [1]. Ezt a függvényt valóságos testekre nehéz egzaktul megadni, mivel az alakítás esetén nem csak a kezdő- és végállapottól függnek a minta tulajdonságai, hanem attól is, hogy milyen 'utat' járt be köztük. Ezek miatt a nehézségek miatt egyszerűsítéseket kell alkalmazni a testek deformációjának vizsgálatakor.

A tapasztalat szerint a képlékeny alakítás során a minta V térfogata csak kis mértékben változik, közel állandónak tekinthető, ezért homogén deformáció esetén felírható, hogy:

$$V = l_0 \cdot A_0 = l \cdot A = \text{const.} \quad (4)$$

A (4)-es egyenletet idő szerint deriválva a következőt kapjuk:

$$l \cdot \dot{A} + A \cdot \dot{l} = 0, \quad (5)$$

aminek átrendezésével a következő egyenlőség áll fenn:

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{\dot{A}}{A} = \frac{\dot{l}}{l}. \quad (6)$$

2.2. Képlékeny alakítás stabilitása

A nyújtó deformálás során, egy bizonyos alakváltozás után a testek eltörnek. A deformáció a törést megelőzően instabillá válik, ennek oka, hogy a minták mindig tartalmaznak kisebb-nagyobb méretű hibákat. A hibák jellemzően makroszerkezeti vagy megmunkálási hibák. A hibák következtében a minta inhomogénné válik a deformáció során, ami instabilitást okoz. A minta inhomogén lehet mert, vagy lokálisan különbö-

zik a keménysége, vagy a lokális keresztmetszete különbözik a minta többi részétől. Az első eset eltérő deformálhatóságot, és így végül eltérő lokális keresztmetszetet eredményez. Ha az inhomogenitás olyan természetű, hogy a keresztmetszet-eltérés az alakítás során eltűnik, akkor a deformáció stabil, ellenkező esetben instabil. Többféle stabilitási kritérium is definiálható a keresztmetszet változását alapul véve:

- Hart-típusú stabilitási kritérium [1,2]

A keresztmetszet lokális eltérése ∂A , a keresztmetszet időben csökken, így a nyújtó deformáció stabilnak tekinthető, ha:

$$\frac{\partial \dot{A}}{\partial A} \leq 0. \quad (7)$$

Mivel $\frac{\dot{A}}{A} \leq 0$, a fenti (7)-es egyenletben szereplő kapcsolat az alábbi módon, dimenzió nélküli alakban is megadható:

$$\frac{\partial \ln |\dot{A}|}{\partial \ln A} \geq 0. \quad (8)$$

Ezek jelentése a következő: Ha a keresztmetszet-eltérés negatív, akkor a keresztmetszet változás sebességének környezettől való eltérése pozitív kell hogy legyen, tehát egy kisebb keresztmetszetű rész (pl. egy nyak), kisebb abszolút sebességgel kell hogy deformálódjon.

- Fortes-típusú stabilitási kritérium [1,3]

A deformáció akkor lesz stabil, ha a szomszédos keresztmetszetek aránya egyhez tart. Ezt a következő formában lehet felírni:

$$\frac{\partial \ln |\dot{A}|}{\partial \ln A} \geq 1. \quad (9)$$

Figyelembe véve az (6)-os kapcsolatot a deformáció sebessége ($\dot{\epsilon}$) és a keresztmetszet változás sebessége ($\dot{A}$) között, a következő formát kaphatjuk a (9)-es

egyenletben szereplő kritériumra:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial A} \geq 0. \quad (10)$$

Tehát a nagyobb keresztmetszetű részek gyorsabban deformálódnak a kisebb keresztmetszetű szakaszoknál.

Összehasonlítva a két, (8)-es és (9)-as formulában leírt stabilitási kritériumot, látható, hogy a Fortes-típusú kritérium matematikailag szigorúbb a Hart-típusúnál. Fizikai szempontból a Fortes-féle kritérium nem csak a deformáció stabilitását írja le lokális keresztmetszet változások esetén, hanem előírja az ilyen változások megszűnését is. Feltehetően az utóbbi esetnek is teljesülnie kell szuperplasztikus deformáció során, ahol az adott anyag képes több száz százalékos - látszólagosan nyak nélküli - megnyúlásra.

2.3. Szuperképlékeny alakítás

Szuperplasztikus anyagok esetén, a σ feszültség különösen érzékeny a deformáció $\dot{\varepsilon}$ sebességére, és a kettő között logaritmikus skálán s-alakú/kettős görbületű kapcsolat áll fenn, ami a 2. ábrán is megfigyelhető. Állandósult (stacionárius) kúszás esetén, amikor a σ értéke nem függ az ε deformáció értékétől, a σ - $\dot{\varepsilon}$ kapcsolat az alábbi relációval adható meg [4]:

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m, \quad (11)$$

ahol K anyagra jellemző hőmérsékletfüggő állandó, míg m a sebességérzékenységi tényező, ami általában a következő módon definiálható:

$$m = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \right|_{\varepsilon, T}. \quad (12)$$

Az m paraméternek a nyújtási deformáció során szemléletes jelentése, hogy milyen mértékben áll ellen az anyag a deformáció során bekövetkező nyakasodásnak. Szakító

próbák esetén, a szakadást megelőzően az anyagok lokálisan elvékonyodnak, nyakak alakulnak ki. Az így kialakult nyak helyén a deformáció sebessége gyorsul, míg a minta el nem szakad. Szuperképlékeny anyagok esetén nem következik be a keresztmetszet csökkenése után a deformációsebesség rohamos növekedése. A fenti, (11)-es egyenletben lévő összefüggés alapján, ha egy szakaszon megindul a nyak kialakulása, akkor a deformáció sebessége megnő, a kisebb keresztmetszet és az így megnőtt feszültség miatt. Ha m paraméter értéke nagy, akkor ez lényeges feszültségnövekedést igényelne. Feltételezve, hogy a húzó F erő állandó, csak a nyak méretétől függ a ható feszültség az adott szakaszon, ezért bár a nyak kialakulásával csökken a keresztmetszet és így nő a feszültség, lényeges növekedés nem tapasztalható, ezért a nyak deformációja lelassul. Minél nagyobb az m sebességérzékenységi tényező értéke, annál kisebbek a nyújtás során jelentkező ingadozások, vagyis annál egyenletesebb a megnyúlás. A paraméter értéke 0 és 1 közé esik, a teljes szigmoid görbe szakaszain jelentősen eltérő az értéke, ahogy az a 2. ábrán is látható. Általában alacsony és magas sebességi tartományokban $m \leq 0.3$, míg a görbe középső, meredek tartományában $m \geq 0.3$.

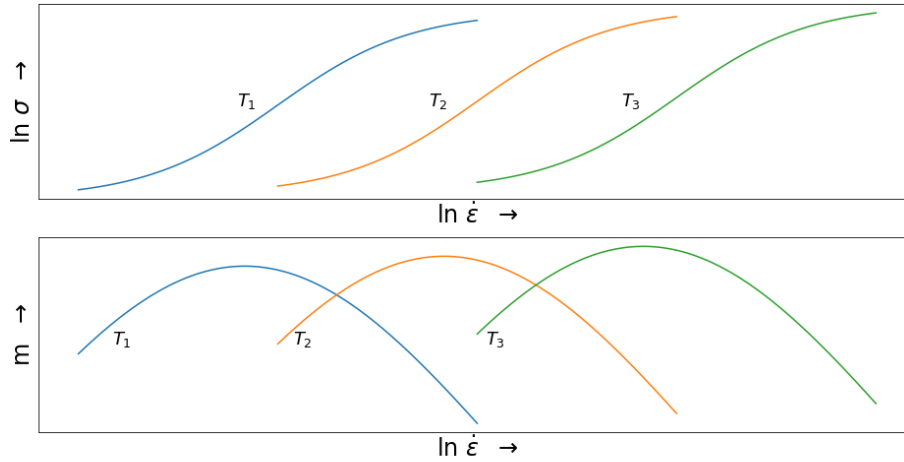
A maximális alakíthatóság, azonban nem csak az m paramétertől függ. Nem stacionárius kúszás esetén több változó is befolyásolhatja a folyamatot. A deformációsebesség ($\dot{\varepsilon}$) mellett az alakítási keményedés, illetve a szerkezeti paraméterek is befolyásolhatják a σ folyásfeszültséget. Ezen hatások figyelembevételével a deformáció folyamatára inkább a következő általános formula szolgál:

$$\sigma = K \cdot \dot{\varepsilon}^m \cdot \varepsilon^n, \quad (13)$$

ahol n az nyúlási keményedés exponens. Természetesen stacionárius kúszás közelítésében $n \approx 0$, vagyis az alakítási keményedés hatása elhanyagolható a deformációs folyamat leírásában.

2.4. Hőmérséklet hatása a képlékeny alakításra

A szuperképlékenység jellegzetesen magas hőmérsékleten végbemenő jelenség, általában csak a $T > 0.5 \cdot T_m$ feletti hőmérsékleten jelentkezik, ahol T_m az abszolút olvadási hőmérsékletet jelöli. A hőmérséklet alapvetően befolyásoló tényező a feszültség és deformáció sebesség közötti kapcsolatban. Az 2. ábrán látható szigmoid görbék alakja és helyzete változik a hőmérséklet emelkedésével. Egyre magasabb hőmérsékleteken a görbe egyre nagyobb deformáció sebesség értékek felé tolódik el, míg az m értékének maximuma szintén a nagyobb sebességek felé tolódik el.



2. ábra. Feszültség-deformációsebesség és sebességérzékenység változása a hőmérséklettel

Szuperképlékeny anyagokra érvényes a magas hőmérsékleti stacionárius kúszássebességet leíró összefüggés [5,6]:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma_m^{\frac{1}{m}} \cdot e^{-\frac{Q}{kT}}, \quad (14)$$

ahol m a már korábban tárgyalt sebességérzékenységi tényező, Q a folyamatra jellemző aktiválási entalpia, A pedig hőmérséklettől függő állandó. Ebből következően a (11)-es egyenletben szereplő K együttható így exponenciális hőmérsékletfüggést tar-

talmaz. Állandó deformációsebesség és sebességérzékenység mellett a σ feszültség a hőmérséklet szerint az alábbi összefüggés szerint változik:

$$\sigma = C \cdot e^{\frac{Q}{kT}}. \quad (15)$$

Az összefüggésben szereplő $C = C(\varepsilon, m, S_i)$, Q a már korábban említett folyamatra jellemző aktiválási entalpia, S_i pedig az anyag szerkezeti paramétereit jelöli.

3. A sebességérzékenységi tényező és alakítási keményedés hatásának vizsgálata

3.1. Sebességérzékenységi tényező hatása: kvázi stabil nyújtási deformáció

Egy minta plasztikus instabilitása (pl. nyak kialakulása) alapvetően a nyújtási deformáció kezdeti szakaszában várható. Ezzel szemben, ha az m , vagyis az anyagra jellemző sebességérzékenységi tényező nagy, akkor az anyag rezisztens a nyak növekedésére. Erre egy példa, ha $\sigma = K\dot{\varepsilon}^m$ és $m = 1$ (Newtoni viszkózus folyás), könnyen látható, hogy az esetlegesen kialakult nyakak nem fognak terjedni az anyagban. Ennek oka főleg, hogy a konstans F erő hat végig az anyagban:

$$\sigma \cdot A = K \cdot \dot{\varepsilon} \cdot A = F = \text{const}. \quad (16)$$

Visszahelyettesítve $\dot{\varepsilon}$ -t:

$$K \cdot \frac{\dot{A}}{A} \cdot A = \text{const}. \quad (17)$$

Vagyis:

$$\dot{A} = \text{const}. \quad (18)$$

Ez azt jelenti, hogy az anyag bármely területén ugyanakkora lesz a keresztmetszet csökkenése, tehát a deformáció stabil. Ezek mellett a $\sigma = K\dot{\varepsilon}^m$ összefüggésből következik, hogy minél nagyobb az m értéke, annál nagyobb megnyúlás várható.

Tegyük fel, hogy t_0 időpillanatban keletkezik egy A_2 keresztmetszetű nyak az A_1 keresztmetszetű mintán. Ekkor a $[t_0, t]$ intervallumon feltehető, hogy:

$$\begin{aligned} t_0 \text{ időpontban } A_2/A_1 &= \alpha, \\ \text{egy későbbi } t \text{ időpontban } A_2/A_1 &= \beta, \\ \beta &< \alpha. \end{aligned}$$

Mivel az F erő konstans a minta teljes hosszában, felírható:

$$K A_2 \dot{\varepsilon}_2^m = K A_1 \dot{\varepsilon}_1^m = F, \quad (19)$$

amit átalakítva a (6)-os egyenlet felhasználásával:

$$A_2^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{\dot{A}_2}{A_2} = A_1^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{\dot{A}_1}{A_1}. \quad (20)$$

Hogya ezt a teljes $[t_0, t]$ intervallumra integráljuk:

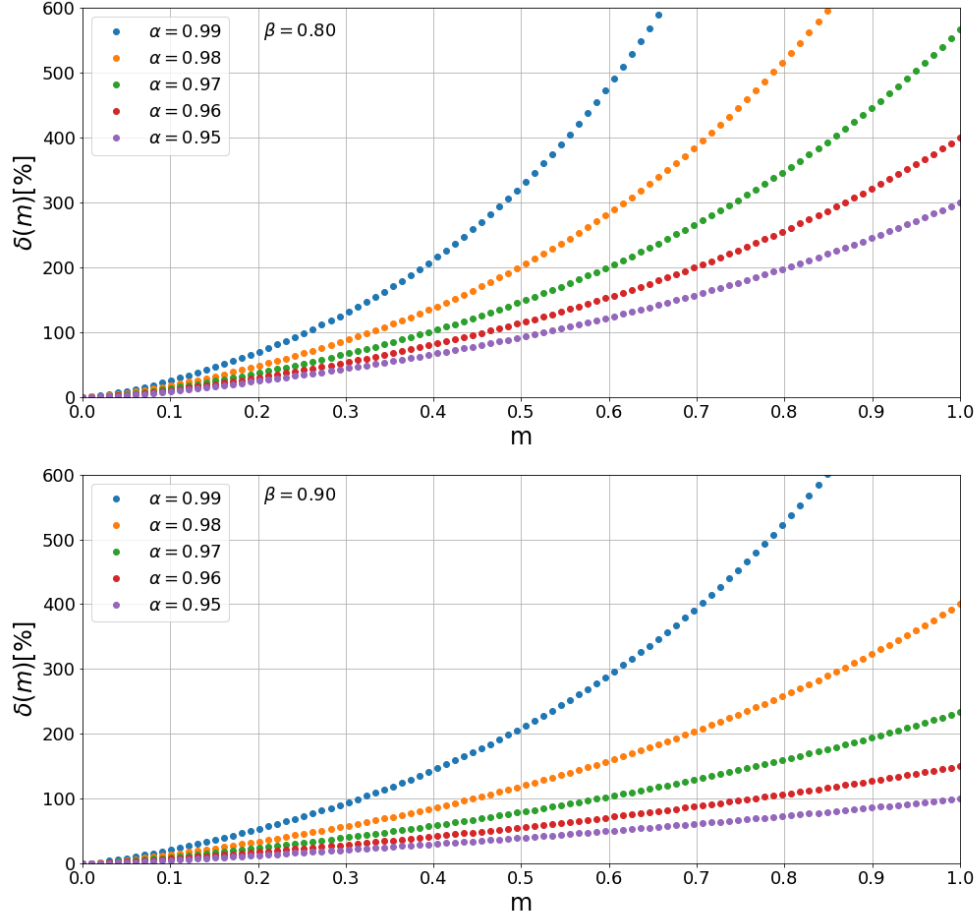
$$\int_{A_2(t_0)}^{A_2(t)} A_2^{\frac{1}{m}-1} dA_2 = \int_{A_1(t_0)}^{A_1(t)} A_1^{\frac{1}{m}-1} dA_1 \quad (21)$$

Felhasználva α és β definícióit és (21)-et:

$$A_1(t) = \left[\frac{1 - \alpha^{\frac{1}{m}}}{1 - \beta^{\frac{1}{m}}} \right]^m \cdot A_1(t_0), \quad (22)$$

amiből következik, hogy jó közelítéssel meghatározható a százalékos megnyúlás ($\delta(m)$) a $[t_0, t]$ intervallumon:

$$\delta(m)[\%] = \left\{ \left[\frac{1 - \beta^{\frac{1}{m}}}{1 - \alpha^{\frac{1}{m}}} \right]^m - 1 \right\} \times 100. \quad (23)$$



3. ábra. Várható teljes megnyúlás a sebességérzékenységi tényező függvényében

Az 3. ábrán látható a kapcsolat a sebességérzékenységi tényező és a százalékos megnyúlás között, néhány α és β érték esetén. Látható, hogy adott kezdeti inhomogén keresztmetszet (α) mellett a megnyúlás nagyban függ a sebességérzékenységi tényezőtől. A keresztmetszet-eltérésnek 2%-ról 20%-osra való változása ($\alpha = 0.98, \beta = 0.80$) esetén pl. csak $\approx 10\%$ -os megnyúlás várható az $m = 0.1$ érték mellett, de több mint 150%-os megnyúlásra számíthatunk az $m = 0.5$ érték esetén. Továbbá az is

megállapítható, hogy a $\sigma = K\dot{\varepsilon}^m$ összefüggés alapján a szuperképlékenység a minta nyak-fejlődésnek és nem a nyak-kialakulásnak való ellenállásából ered. Látható, hogy bármely időpillanatban:

$$\frac{\partial \dot{\varepsilon}}{\partial A} < 0, \quad (24)$$

tehát a Fortes-féle stabilitási kritérium ebben az esetben sosincs érvényben. Ha kialakul egy nyak, akkor az a teljes deformáció során létezni fog, ezért a $\sigma = K\dot{\varepsilon}^m$ csak kvázi stabil nyújtás leírására alkalmas.

3.2. Alakítási keményedés stabilizáló hatása

3.2.1. Új egyenlet bevezetése

Valódi, stabil deformáció esetén ($m \approx 0.5$) feltételezni kell, hogy a Fortes-féle stabilitási kritérium teljesül. Ebben az esetben több tényezőt, mint pl. az alakítási keményedés hatását is számításba kell venni. Fizikailag az alakítási keményedés stabilizáló hatása abban nyilvánul meg, hogy nő a folyásfeszültség a stacionárius értékhez képest. Látható, hogy a $\sigma = K \cdot \dot{\varepsilon}^m \cdot \varepsilon^n$ összefüggés használata esetén ez nem mindig teljesül. Például $\varepsilon < 1$; $n > 0$ esetben az alakítási keményedés hatása a feszültség csökkenését okozná az állandó értékhez képest. Az ilyen problémák elkerülésére célszerű egy új összefüggést keresni a (13)-as egyenlet helyett, ami más módon veszi figyelembe az alakítási keményedés hatását. Látható, hogy nyújtási deformációt ε és $\frac{l}{l_0}$ ugyanúgy leírja. Matematikailag azonban nagy különbség van köztük, hiszen míg ε értéke 0-tól indul, addig a $\frac{l}{l_0}$ értéke 1-től. Azért, hogy számításba vegyük a feszültség relatív növekedését, ε helyett $\frac{l}{l_0}$ -t kell használni a (13)-as egyenletben, azaz:

$$\sigma = K\dot{\varepsilon}^m \left(\frac{l}{l_0} \right)^n. \quad (25)$$

Mivel a valódi plasztikus deformáció mértékét $\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$ -ként definiálhatjuk, amiből $\frac{l}{l_0} = e^\varepsilon$, így a fenti (25)-ös egyenlet a következő formában írható:

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m e^{n\varepsilon}. \quad (26)$$

3.2.2. Stabilitási kritériumok vizsgálata az új egyenlet alapján

Az új (26)-os egyenletet használva a deformáció stabilitásának vizsgálatára, adott időpillanatban a Fortes-típusú kritériummal kapcsolatban az alábbi formula teljesül:

$$\frac{\partial \dot{\varepsilon}}{\partial A} = -\frac{\dot{\varepsilon}}{m} \left(\frac{1-n}{A} + \varepsilon \frac{\partial n}{\partial A} \right), \quad (27)$$

ami azt jelenti, hogy a (10)-es Fortes-féle stabilitási kritérium megegyezik a következő feltétellel:

$$\frac{1-n}{A} + \varepsilon \frac{\partial n}{\partial A} \leq 0, \quad (28)$$

vagy

$$\frac{\partial n}{\partial A} \leq \frac{n-1}{A\varepsilon}. \quad (29)$$

Az állandósult állapot közelében $n \ll 1$, a Fortes-kritériumot egyszerűbb formában is megadhatjuk:

$$\frac{\partial n}{\partial A} \leq -\frac{1}{A\varepsilon}. \quad (30)$$

Egy egyszerű esetben vizsgáljuk az összefüggést. Tegyük fel most is, hogy t_0 időpillanatban egy A_2 keresztmetszetű nyak keletkezik az A_1 keresztmetszetű mintán. Használjuk a korábbi módon definiált α és β változókat. A nyak kialakulásával, hasonlóan a tranziens jelenséghez, az alakítási keményedés megnő a nyaknál. Tegyük fel, hogy az alakítási keményedés azokon a területeken, ahol a keresztmetszet A_2 és A_1 az n_2 és n_1 paraméterekkel írható le. Emellett feltételezzük, hogy:

$$\partial n = n_2 - n_1 = \frac{k}{\varepsilon}, \quad (31)$$

ahol $k \geq 0$ konstans. A fenti feltevés reális, mivel a tranziens periódus után n_2 közelíteni fog n_1 -hez, hogyha ε elég nagy. Mivel t_0 -ban:

$$\frac{A_2}{A_1} = \alpha, \quad (32)$$

ezért

$$\partial A = A_2 - A_1 = A_1(\alpha - 1). \quad (33)$$

Ezek után, a (30)-(33) egyenleteket összekapcsolva a következőt kapjuk:

$$k \geq 1 - \alpha. \quad (34)$$

Ez a kapcsolat azt jelenti, hogyha a nyak elég kemény, akkor az visszafejlődik és eltűnik. Vizsgáljuk meg, hogy a k paraméter hogyan befolyásolja a teljes megnyúlást. A minta mentén ható erő állandó, és a (31)-es egyenlet alapján:

$$K A_1 \dot{\varepsilon}_1^m e^{n_1 \varepsilon} = K A_2 \dot{\varepsilon}_2^m e^{n_2 \varepsilon} = F, \quad (35)$$

amiből levezethető, hogy:

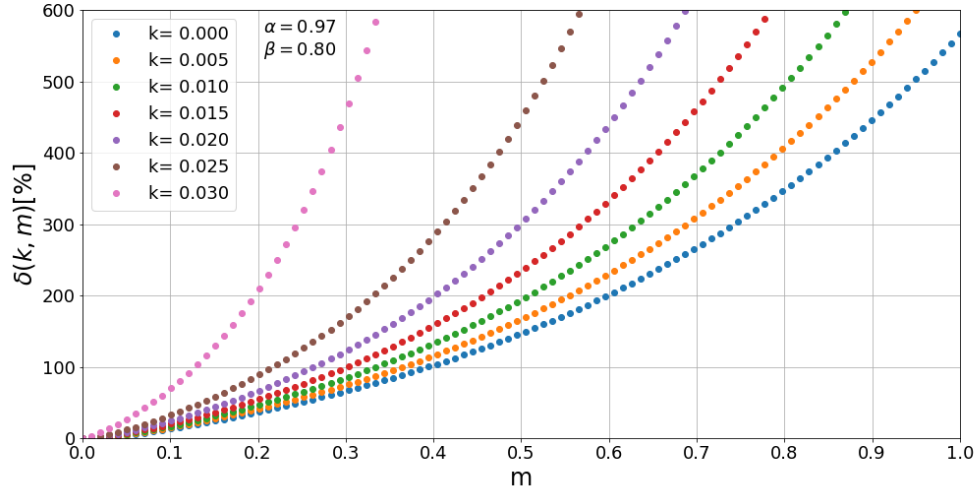
$$A_1(t) = \left[\frac{\alpha^{\frac{1}{m}} - e^{-\frac{k}{m}}}{\beta^{\frac{1}{m}} - e^{-\frac{k}{m}}} \right]^m \cdot A_1(t_0), \quad (36)$$

Illetve a $[t_0, t]$ intervallumban elérhető $\delta(k, m)$ megnyúlásra:

$$\delta(k, m)[\%] = \left\{ \left[\frac{\beta^{\frac{1}{m}} - e^{-\frac{k}{m}}}{\alpha^{\frac{1}{m}} - e^{-\frac{k}{m}}} \right]^m - 1 \right\} \times 100. \quad (37)$$

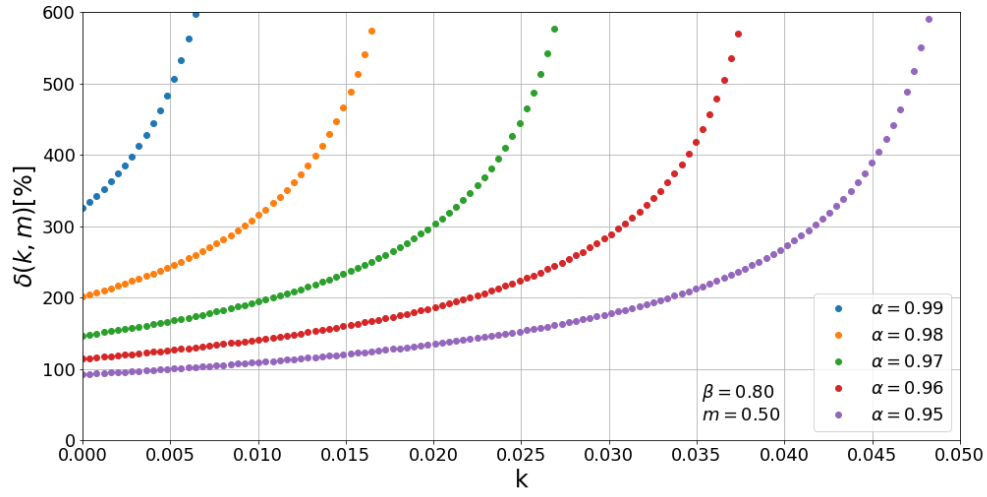
A $k = 0$ esetben visszakapjuk a (23)-as egyenletet. Tehát, ha a $k \geq 1 - \alpha$, a Fortes-kritérium teljesül, azaz a nyak visszafejlődik és eltűnik. Érdekes megvizsgálni azokat az eseteket is, ahol a nyak keményedése nem elég nagy (tehát a Fortes-kritérium nem teljesül). A 4. ábrán feltüntettem a (37)-es formula alapján várható megnyúlást az m

paraméter függvényében, különböző k értékek mellett. Látható, hogy bár a stabilitási kritérium nem teljesül, a nyak fejlődik, de a kismértékű nyak-keményedés effektíven csökkenti a nyak fejlődésének sebességét és így növeli az anyag nyújthatóságát.

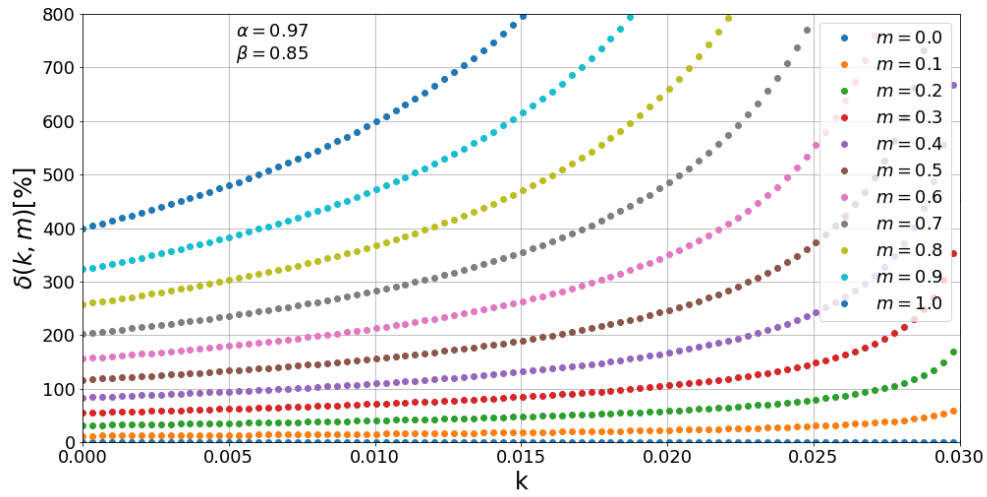


4. ábra. Várható teljes megnyúlás a sebességérzékenységi tényező függvényében különböző mértékű alakítási keményedés esetén

Az 5. és 6. ábra mutatja, a nyak-keményedés hatásait. Állandó α , β és m mellett látható, hogy minél nagyobb k értéke, annál nagyobb megnyúlás várható. Adott $\alpha = 0.97$ mellett, alakítási keményedés nélkül ($k = 0$) 160%-os nyúlás érhető el, míg kismértékű nyak-keményedés ($k = 0.025$) mellett akár 400%-os megnyúlás is várható.



5. ábra. Alakítási keményedés hatása a teljes megnyúlásra, különböző keresztmetszetű nyak esetén



6. ábra. Alakítási keményedés hatása a teljes megnyúlásra, különböző sebességérzékenységi tényező esetén

3.2.3. Szimuláció számítások és eredményeik

A szimuláció célja, hogy a (26)-os új egyenlet használatával megvizsgáljam a sebességérzékenységi tényező és alakítási keményedés, 3.1 és 3.2.1 fejezetekben részletezett, deformációt stabilizáló hatásait.

(i) Szimulációs számítás

A (4)-es egyenletből kiindulva, a mintát felbontva elemi keresztmetszetekre, továbbra is érvényes a következő összefüggés, minden i -edik szeletre.

$$v_0 = \frac{V_0}{i} = \text{const.} \quad (38)$$

A (3)-as összefüggést átrendezve és felhasználva ε definícióját a (46)-os egyenletből felírható minden elemi keresztmetszetre:

$$A_i = \frac{v_0}{l_i} = \frac{v_0}{l_0 \cdot e^{\varepsilon_i}}. \quad (39)$$

Az új (26)-os egyenlet bevezetésével az elemi keresztmetszetekre igaz lesz az alábbi összefüggés:

$$\sigma_i = K \cdot \dot{\varepsilon}_i^m \cdot e^{\varepsilon_i n} \quad (40)$$

Ezt átrendezve $\dot{\varepsilon}_i$ -re:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{d\varepsilon_i}{dt} = \left[\frac{\sigma_i}{K} \cdot e^{-\varepsilon_i n} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (41)$$

Ebbe behelyettesítve $\sigma = \frac{F}{A_i}$ -t és felhasználva A_i -t (39)-es egyenletből:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} &= \left[\frac{F}{A_i K} \cdot e^{-\varepsilon_i n} \right]^{\frac{1}{m}} = \left[\frac{F}{\frac{v_0}{l_0 \cdot e^{\varepsilon_i}} K} \cdot e^{-\varepsilon_i n} \right]^{\frac{1}{m}} = \\ &= \left[\frac{F \cdot l_0 \cdot e^{\varepsilon_i}}{v_0 \cdot K} \cdot e^{-\varepsilon_i n} \right]^{\frac{1}{m}} = \left[\frac{F \cdot l_0}{v_0 \cdot K} \cdot e^{\varepsilon_i(1-n)} \right]^{\frac{1}{m}} \end{aligned} \quad (42)$$

Mivel a minta deformációja állandó erővel történik, az állandó tagok összegyűjthetők

az $a = \frac{F \cdot l_0}{v_0}$ konstansba, amivel a deformáció sebessége egyszerűbben kifejezhető:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \left[a \cdot e^{\varepsilon_i(1-n)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (43)$$

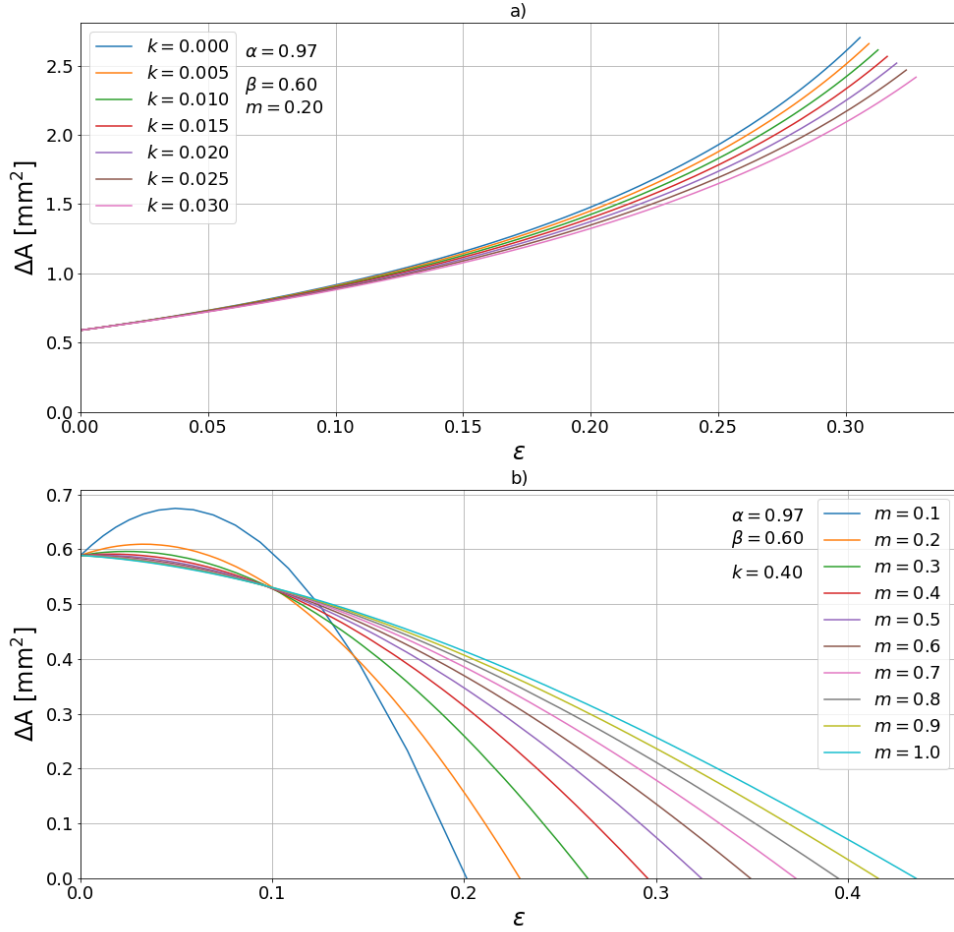
A szimuláció során minden elemi keresztmetszethez hozzárendeltem a pillanatnyi keresztmetszet és megnyúlás értékeit. Felhasználva a (6)-os egyenletet, a keresztmetszet változása felírható a deformáció sebességének ($\dot{\varepsilon}$) függvényeként az alábbi módon:

$$\frac{dA}{dt} = -A \cdot \dot{\varepsilon} \quad (44)$$

Az (43) és (44)-es összefüggések alapján időben léptettem a rendszert. Kezdeti ($t = 0$) állapotban az elemi keresztmetszetek nagysága A_0 , a deformációjuk 0, a kisebb keresztmetszetű nyak a megadott α paraméternek megfelelő nagyságú, a deformáció értéke pedig a (4)-es egyenlet átrendezésével megkapható, a nyak méretéből adódó érték. A program a szimuláció eredményeit adattömbbe menti, ezeket ábrázolva vizsgáltam a különböző m , n , α , β , F , l_0 , és v_0 paraméterek melletti eredményeket.

(ii) Szimulációs eredmények

A programot több, tetszőleges paraméter mellett futtattam, minden futásra az előzetesen várt eredményeket kaptam. A 7. ábra a) részén látható, hogy $k < 1 - \alpha$ értékek esetén, a (34)-es összefüggés alapján nem teljesül a Fortes-kritérium, és az anyag elszakad.



7. ábra. Szimuláció a sebességérzékenységi tényező és alakítási keményedés hatásának kimutatására

A szimulációt $m = 0.2$ sebességérzékenységi tényező mellett és $\alpha = 0.97$ -es kezdeti nyakméret és $\beta = 0.60$ értékű végső keresztmetszet mellett futtattam. Az ábrán a megnyúlás (ϵ) függvényében ábrázoltam a pillanatnyi keresztmetszet eltérését (ΔA) a nyak és a külső keresztmetszet között. Érdekes megfigyelni, hogy azonos kezdeti feltételek, de különböző k alakítási keményedés paraméterek mellett nagyobb meg-

nyúlásra képes az anyag a végső szakadás, vagy a végső keresztmetszet (β) elérése előtt.

Ha a k paramétert a (34)-es összefüggésnek megfelelőnek választjuk, akkor a Fortes-kritérium teljesül. A szimulációt $k = 0.4$ alakítási keményedés, $\alpha = 0.97$ -es kezdeti nyak és $\beta = 0.60$ végső keresztmetszeti paraméterek mellett futtattam, különböző sebességérzékenységi tényezőket vizsgálva. Eredményül a 7. ábra *b)* részén ábrázolt görbéket kaptam, melyeken látható, hogy a nyak a deformáció során visszafejlődik, a stabilitási kritériumnak megfelelően. Megfigyelhető, hogy a nagyobb sebességérzékenységi tényező (m) esetén a nyak nagyobb deformáció mellett, de egyenletesebben simult vissza a külső keresztmetszetbe.

3.2.4. Kísérleti tapasztalatok értelmezése új egyenlet alapján

A (12) egyenletben definiált m paraméter meghatározásához közvetlenül különböző deformáció sebességgel ($\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2$) kell különböző mintákat deformálni, és egy adott ε deformációnál leolvasva a két deformáció sebességhez tartozó folyásfeszültséget (σ_1, σ_2). Az így - (12)-es egyenlet alapján - meghatározott sebességérzékenységi tényezőt m_k -vel jelöljük. Ez a módszer azonban elég idő- és anyagigényes. A gyakorlatban az ún. sebesség-ugratás módszerrel szokás meghatározni az anyagok sebességérzékenységi tényezőjét. Az ilyen jellegű mérések során a mintát $\dot{\varepsilon}_1$ sebességgel adott ε_0 deformációig alakítják, majd megugratják a deformáció sebességét, pillanatszerűen növelve azt $\dot{\varepsilon}_1$ -ről $\dot{\varepsilon}_2$ értékre, ezután a deformáció $\dot{\varepsilon}_2$ -tal folytatódik. A sebesség-ugratással együtt a folyásfeszültség is megváltozik. Ebben az esetben az ugratás helyén - adott ε_0 deformációnál - leolvasva a két, $\dot{\varepsilon}_1$ és $\dot{\varepsilon}_2$ sebességhez tartozó σ_1 és σ_2 folyásfeszültségeket, meghatározzuk az m paraméter értékét, amit m_u -vel jelölünk.

Átmérő	8mm
Sűrűség	1.41 g/cm^3
Húzási keménység	60 MPa
Young modulus	2.7 GPa
Keménység	M86 Rockwell
Elméleti nyújthatóság	30%
Üvegesedési hőmérséklet	-60°C
Olvadáspont	170°C

1. táblázat. *Acetát rúd tulajdonságai [7]*

A fent vázolt m meghatározási eljárásokat az 1. táblázatban látható tulajdonságú acetát copolymer műanyag minták [7] deformációjával demonstrálok. A méréseket az ELTE TTK Anyagfizikai Tanszékén végeztem, a 8. ábrán látható anyag vizsgáló (Material Testing System, MTS) berendezés használatával, szobahőmérsékleten. A 9. ábrán feltüntettem három olyan feszültség-deformáció ($\sigma - \varepsilon$) görbét, melyek a $\dot{\varepsilon}_1 = 1.98e - 5 \frac{1}{s}$ és $\dot{\varepsilon}_2 = 1.92e - 4 \frac{1}{s}$ sebességgel, illetve e két sebesség közötti ugratással végzett mérésekre vonatkoznak. Az ugratás $\varepsilon = 0.115$ deformációnál történt. Jól látható, hogy ennél az ε értéknél az $\dot{\varepsilon}_1$ és $\dot{\varepsilon}_2$ deformáció sebességgel indult mérések esetén leolvasható $\sigma_1 = 57.64\text{MPa}$, illetve $\sigma_2 = 60.85\text{MPa}$. Viszont az ugratásos mérés esetében a $\dot{\varepsilon}_1$ után, $\dot{\varepsilon}_2$ -vel folytatódó deformáció magasabb, $\sigma'_2 = 62.05\text{MPa}$ feszültséggel deformálódik tovább. Emiatt a sebesség-ugratással kapott

$$m_k = \frac{\ln(\sigma_2/\sigma_1)}{\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)} = 2.354 \cdot 10^{-2}$$

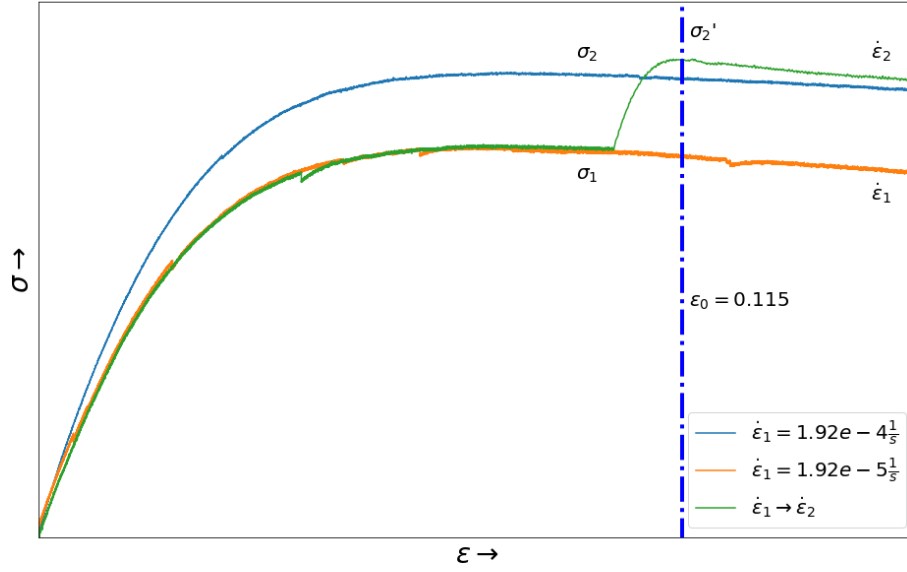
nagyobb lesz, mint a közvetlen számolással kapott

$$m_u = \frac{\ln(\sigma'_2/\sigma_1)}{\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)} = 3.202 \cdot 10^{-2}.$$



8. ábra. Anyagvizsgáló (Material Testing System, MTS) berendezés

Ez a konkrét példa azt az általános kísérleti tapasztalatot [8,9] mutatja, miszerint a sebesség-ugratással kapott sebességérzékenységi tényező (m_u) mindig nagyobb, mint a sebesség-ugratás nélkül meghatározott (m_k). Adódik a kérdés, hogy miért van ez így. A fent említett, (26)-os egyenleten keresztül, az alakítás keményedés hatásával jellemezhetjük ezt a jelenséget.



9. ábra. Acetát műanyag minta feszültség-deformáció ($\sigma - \varepsilon$) görbéi különböző deformációs sebességek és sebesség-ugratás esetén

Stacionárius folyás esetén feltételezhető, hogy az alakítási keményedés (n) csak a deformációtól függ, tehát a különböző sebességeken ($\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2$) deformált mintáknál, adott ε_0 deformáció esetén az n értéke konstans marad, azaz:

$$\sigma_1 = K \dot{\varepsilon}_1^m e^{n\varepsilon_0}, \quad (45)$$

és

$$\sigma_2 = K \dot{\varepsilon}_2^m e^{n\varepsilon_0}, \quad (46)$$

amiből a következő adódik:

$$m_k = \frac{\ln(\sigma_2/\sigma_1)}{\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)} = m. \quad (47)$$

A sebesség-ugratás során azonban a deformáció hirtelen változása miatt, hasonlóan a tranziens jelenséghez, az alakítási keményedés növekedik, n_1 -ről n_2 -re, miközben a deformációsebesség $\dot{\varepsilon}_1$ -ről $\dot{\varepsilon}_2$ -re változik, ε_0 deformációnál. Emiatt:

$$\sigma_1 = K \dot{\varepsilon}_1^m e^{n_1 \varepsilon_0}, \quad (48)$$

$$\sigma'_2 = K \dot{\varepsilon}_2^m e^{n_2 \varepsilon_0}, \quad (49)$$

amiből:

$$m_u = \frac{\ln(\sigma'_2/\sigma_1)}{\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)} = m + \frac{(n_2 - n_1)\varepsilon_0}{\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)}. \quad (50)$$

Az egyenleteket összevonva megkapható, hogy:

$$m_u = m_k + \frac{(n_2 - n_1)\varepsilon_0}{\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)}. \quad (51)$$

Mivel $\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1) > 0$; $\dot{\varepsilon}_2 > \dot{\varepsilon}_1$ és $n_2 - n_1 \geq 0$, így a fenti egyenlet jobb oldalának második tagja nem negatív. Ebből következően:

$$m_u \geq m_k, \quad (52)$$

ami teljes mértékben megerősíti az alakítási keményedés stabilizáló hatását plasztikus deformáció során.

4. Összefoglalás

A szakdolgozati munkában a jól-ismert stabilitási kritériumok alapján megvizsgáltam a képlékeny alakításra jellemző sebességérzékenységi tényező és alakítási keményedés stabilizáló hatását, melynek feltételezésével reálisabban értelmezhető a nagy deformációs (szuperképlékeny) folyamat.

Szimulációs és kísérleti eredményeimet a következő pontokban foglalom össze:

1. Megállapítottam, hogy minél nagyobb az anyag sebességérzékenysége, annál nagyobb alakíthatóság várható. A nagy értékű sebességérzékenyséű anyagok esetében várható nagydeformáció - szuperképlékeny deformáció - az anyag nyakfejlődésének, és nem a nyak kialakulásnak való ellenállásából ered. Ebben az esetben a Fortes-féle stabilitási kritérium nem teljesül. Ha kialakul egy nyak a mintán, akkor az a teljes deformáció során létezni fog, azaz a deformáció folyamata csak kvázi-stabil lehet.
2. Az alakítási keményedés stabilizáló hatását feltételezve bevezettem egy új egyenletet a deformációs folyamat leírására. Az új egyenlet alapján szimulációs számolásokkal sikerült megvizsgálni és szemléltetni az alakítási keményedés és sebességérzékenységi tényező hatásait a képlékeny deformációra. Megfelelő alakítási keményedés esetén teljesülhet a stabilitási kritérium, a kialakult nyak visszafejlődik. A stabilitási kritérium nem teljesülése esetén is tapasztalható, hogy az alakítási keményedést szenvedett nyak lassabban deformálódik, növelve a minta alakíthatóságát.
3. Az új egyenlet alapján értelmezhető az általános kísérleti tapasztalat, miszerint a sebesség-ugratással kapott sebességérzékenységi tényező mindig nagyobb, mint a hagyományos, ismétléses (sebesség-ugratás nélküli) módszer esetén. Ez a jelenség annak tudható be, hogy a sebesség ugratásakor a minta alakítási keményedést szenved el, ezért van szükség nagyobb feszültségre a minta deformációjának folytatására.

Hivatkozások

- [1] Kovács István, "A képlékeny alakítás vizsgálati módszerei", Magyar Fizikai Folyóirat 28. kötet,3-13 (1979)
- [2] E.W. Hart, Acta Met. 15,351 (1967)
- [3] M.A. Fortes, Int. MEch. Sci. 19,483 (1977)
- [4] N.Q.Chinh Kandidátusi értekezés 26-32. (1993)
- [5] J.W.Edington, K.N. Melton and C.P. Cutler, Prog. Mat. Sci. 21,61 (1976)
- [6] T.G.Langdon, Met. Trans. 13A,689 (1982)
- [7] <https://www.nylacast.com/wp-content/uploads/2015/11/Nylacast-POM-C-Technical-Data-Sheet.pdf>
- [8] S.Yuquan, L.Shujun, "Material Science and Technology Vol.5 443-449, (1989)
- [9] T.Hatayama, T.Okabe, H.Takei, "Transactions of the Japan Institute of Metals", Vol.27,No.8, 576-583 (1986)

NYILATKOZAT

Név: Rác Gergely

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Fizika BSc

Neptun azonosító: GOZ1NP

Szakdolgozat címe:

Képlékeny deformációk folyamatára jellemző alakítási keményedés és sebességérzékenység tényező vizsgálata

A szakdolgozat szerzőjeként büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy e dolgozat önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2018. május 30.

.....

a hallgató aláírása