

**Opponensi vélemény**  
**Ruszinkó Endre „Képlékeny és kúszási alakváltozás**  
**modellezése a szintézis elmélet keretében”**  
**című MTA doktori értekezéséről**

Az angol nyelven írt értekezés négy fejezetből áll és az irodalomjegyzékkel együtt 110 számozott oldal terjedelmű. Az irodalomjegyzékben 189 mű található, amelyből 35 a Szerző által önállóan írt dolgozat és konferenciai kiadvány illetve 4 társszerzős publikáció. Ebből a listából kiemelném a 2011-ben a Springer Kiadónál megjelent „Plasticity and Creep of Metals ” Ruszinkó K. társszerzővel (az édesapjával ) írt 434 oldalas monográfiát illetve a 2012-ben a Lambert Kiadónál világot látott önálló 168 oldalas "Ultrasound and Irrecoverable Deformation of Metals " c. könyvet. Kevés kivétellel valamennyi írása a szakma nemzetközi folyóiratainak valamelyikében jelent meg.

A benyújtott MTA doktori értekezés címe pontosan jellemzi Ruszinkó Endre kutatási területét, amelyet még 1999-ben választott magának és amelyet azóta is folyamatosan, egyre növekvő intenzitással művel.

A "képlékeny" illetve "kúszás" melléknévként gyakorlatilag a Szerző minden dolgozatának címében szerepel.

A szilárd testek mechanikájának az utóbbi évtizedekben egyre nagyobb jelentőségi kutatási területe a Szerző által kiemelt témakörök, amelyek a képlékeny és kúszási alakváltozás kölcsönhatását tanulmányozzák matematikai modellezéssel különböző jól elkülöníthető esetekben, nevezetesen változó terheléskor, előzetes mechanikai-termikus kezelésnél, vibrációs, ultrahang frekvenciájú terhelés mellett illetve együttes statikus és ultrahangos terhelés alatt.

Bírálatomban nagyobb figyelmet az értekezés matematikai részére szeretnék fordítani.

A disszertáció a felsorolt elméleti mechanika különböző témáival foglalkozik, sokszínű a felhasznált matematikai és fizikai apparátus és világosan látszik a dolgozat gyakorlati orientációja egyaránt, a különböző folyamatok leírását szolgáló matematikai modellek megalkotása és azok elméleti vizsgálata során.

Ugyanakkor a Szerző világosan " megérezte", hogy az értekezésben vizsgált folyamatok matematikai leírásához egy jó modellnek nem szabad túl bonyolultnak lenni és a létező matematikai eszközökkel kezelhetőnek kell lennie. Általában a matematikai modellek meghatározott körülmények között jók és helyességükről főként mérésekkel, kísérletekkel, számításokkal lehet meggyőződni.

Ha egy alapmodellel már rendelkezünk, onnan már könnyebb továbblépni a különböző általánosítások felé, de ezek az általánosítások is nagy eredménynek számítanak.

Ezért választotta a Szerző matematikai apparátusként az értekezésben vizsgált feladatok leírásához az un. szintézis elméletet. Ez az eljárás 1993-ban lett megalapozva a Szerző édesapja –Ruszinkó Konstantin professzor és Dr. Andrusik Jaroslav közös dolgozatában. Itt meg kell jegyezni, hogy a módszer első változata csak képlékeny alakváltozás modellezésére volt alkalmas. A szintézis elmélet tovább fejlesztése általánosabb feladatokra, amelyek a képlékeny

és kúszási alakváltozások kölcsönös vizsgálatát igénylik, már a Szerző nevéhez fűződik.

A értekezés 1. és 2. fejezetében a Szerző röviden és világosan ismerteti a kutatási téma eddigi irodalmát, előzményeit, a különböző kísérletekben megnyilvánuló jelenségeket illetve bemutatja a kitűzött kutatási feladatokat. Kielemezte, hogy milyen problémákkal szembesülnek az ismert klasszikus képlékeny és kúszási alakváltozás módszerei általánosabb feladatok esetén.

A 3.fejezetben , a már említett 2011-ben megjelent monográfia alapján, a Szerző részletesen bemutatja a modern szintézis elmélet alapjait, összefüggéseit. Kiemeli, hogy a szóban forgó eljárás magába foglalja a Batdorf-Budiansky -féle csúszási illetve a Sanders-féle folyási koncepciókat.

A Szerző ötletesen vezette be a *nem megfordítható (irreverzibilis) deformáció* fogalmát , amely mind az azonnali képlékeny, mind az időbeli kúszás komponenseket tartalmazza. Biztonsággal bánt a makroszkopikus alakváltozás kialakulása és mikroszkopikus szinten lejátszódó folyamatok közötti kapcsolatok tanulmányozásával.

Kimutatta, hogy az *irreverzibilis* alakváltozás (*képlékeny vagy kúszás* ) modellezését célszerű az Ilyuskin ötdimenziós  $S^5$  feszültség-deviátor térnek az  $S^3$  háromdimenziós alterében elvégezni. Az  $S^3$  altérben a terhelést a *feszültség vektor* reprezentálja, melynek komponensei

$$S_1 = \sqrt{3/2} S_{xx}, S_2 = S_{xx}/\sqrt{2} + \sqrt{2} S_{yy}, S_3 = \sqrt{2} S_{xz},$$

ahol  $S_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) a feszültség - deviátor tenzor komponensei.

Az értekezés 52 oldalas 4.fejezete tartalmazza a legfontosabb új tudományos eredményeket, melyeknek bizonyítása, megalapozása sok új ötletet igényelt. Kiemelésre kívánczik pl. a szintézis eljárás alap összefüggéseinek megfelelő finomítása, a kúszás tanulmányozása során az ún. *negatív képlékeny alakváltozási növekmény, negatív kúszás, kúszási késedelem , inverz kúszás, szekunder kúszássebesség* fogalmak egzakt bevezetése és pontos matematikai leírása.

A kitűzött irreverzibilis alakváltozás modellezése során hasznos lett egy új folyási felület alkalmazása, amelynek vetületét az  $S^3$  háromdimenziós alterében a *feszültség vektor* komponensei és a *folyáshatár* segítségével a következő szféra írja le :

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 2\tau_S^2.$$

A Szerző nagy biztonsággal bánt a bevezetett fogalmakkal és technikával és ötletesen kombinálja őket. Így, egy lépcsőszerűen változó terhelés alakváltozása esetén az *alakítási keményedést mértékét* leíró (3.8.1a) lineáris összefüggést

$$H_N = S_p + I_N + \Psi_N,$$

ahol

$$I_N(t) = B \int_0^t \frac{d\vec{S}}{ds} \cdot \vec{N} \exp(-p(t-s)) ds$$

és  $\Psi_N, S_p = \sqrt{2}\tau_p$  rendre ún. *sebesség - integrál* , *hibaintenzitás*, a nullához tartó terhelés sebességének megfelelő ún. *kúszáshatár (folyáshatár)*, igényesen kiegészítette a (4.1.1)

$$H_{-N} = S_p + I_{-N} + \Psi_{-N}$$

formulával. A (4.1) ábra világosan mutatja , hogy az utóbbi összefüggésben a  $-N$  index ahhoz az érintő síkhoz tartozik, amelynek a normálisa tompaszöget zár be az  $\vec{S}$  feszültség vektorral. Ekkor a  $H_{-N}$  mennyiség fizikai értelmezése nem más, mint egy adott terhelésnek megfelelő *ellenkező irányú keményedési mérték* és az  $I_{-N}(t)$  *sebesség - integrál* a (4.1.2) formulával adódik

$$I_{-N}(t) = -B \int_0^t \frac{d\vec{S}}{ds} \cdot \vec{N} \exp(-p(t-s)) ds.$$

A 4.fejezetben a Szerző több speciális esetet tárgyal részletesen. Így, egytengelyű húzás esetén kimutatta, hogy létezhet *negatív képlékeny alakváltozás*, amelynek a növekménye  $\Delta e$  a (4.1.55) formulával adódik. A *negatív képlékeny alakváltozás negatív előjelű kúszást* gerjeszt, amelyet a (4.1.63) formula írja le. Továbbá, sikerült előállítani egy könnyen számítható (4.1.65) alakú összefüggést a negatív kúszás megszűnésének  $t_r$  időbeli meghatározására

$$t_r = \frac{1}{p} \ln \frac{B(p-K) [\Delta S - S_1 \exp(-pt_c)]}{K (S_1 - \Delta S + S_p)}.$$

illetve kimutatni, hogy a

$$t_c + t_r \leq t \leq t_c + t_r + t_d$$

időintervallumon a *negatív előjelű kúszás* fejlődése megszűnik, azaz, kúszás-késedelem jelenik meg, amelynek időtartamát a (4.1.75) képlet határozza meg:

$$t_d = \frac{1}{K} \ln \frac{p(S_p - \Delta S + S_1)}{(p-K) (S_1 - \Delta S - S_p)} ..$$

Bizonyítva van, hogy a kúszás-késedelem utáni időintervallumon , ha

$$t > t_c + t_r + t_d$$

elindul egy pozitív irányú inverz kúszás . Ennek az *inverz kúszásnak a sebessége*  $\dot{\epsilon}$  a (4.1.79) és (4.1.82) képletek segítségével határozható meg.

A 4.2. alfejezetben a Szerző az előzetes *mechanikai - termikus kezelés* paramétereinek hatását vizsgálja az ún. *szekunder kúszás* kialakulására. Ezek a paraméterek a következők :  $H_{N \max}$ , amely az előzetes képlékeny alakváltozás méretét jellemzi,  $T_a$  a hőkezelés hőmérséklete és  $t_a$  időtartama,  $T_{\min}$  a hőmérséklet minimális értéke, amelynél stabil ún. diszlokáció-szubstruktúra alakul ki,  $\tau_S$  folyáshatár,  $\tau_p$  kúszáshatár,  $Q_i, C_i, k, A, B$  modellállandók. Kimutatta, hogy ekkor a szintézis eljárás keretében az *alakítási keményedés mértékét* leíró (3.8.1b) kvadratikus egyenlet alapján célszerű a

$$\Psi_N = H_N^2 - H_{NM}^2$$

összefüggést használni, ahol  $H_{NM}$  az előzetes *mechanikai - termikus kezelés* utáni síktávolság, azaz a kúszással szembeni ellenálló képesség. Három esetet vizsgál részletesen: A) amikor  $T_a = const, t_a = const$ ; B) amikor  $\varepsilon_0 = const, t_a = const$ ; B) amikor  $\varepsilon_0 = const, T_a = const$ . A *mechanikai - termikus kezelés* követő kúszássebesség vektorának  $\vec{e}_M$  meghatározására a Szerzőnek hármas integrál segítségével sikerült előállítani egy kompakt alakú kifejezést (A Tézis-

füzetben a (2.7) számú formula), amely tartalmazza a szóban forgó *mechanikai - termikus kezelés* paramétereit.

Érdekes új eredményeket tartalmaz a 4.3 alfejezet, amely leírja az ultrahang okozta anyag keményedését és lágyulását illetve az előzetes ultrahangkezelés hatását az anyag *szekunder kúszásának* kialakulására. Ezeknek a folyamatoknak a matematikai leírására a Szerző megfelelő modellt gyártott, amelynek alapja a (4.3.3) összefüggés

$$H_N^2 = \Psi_N + S_S^2 + F\Psi_{Nu}, F = 1 - 2h \left( \left| \vec{S} \right| \right),$$

ahol lényegesen felhasználta az ultrahang okozta kristályrács hibáinak  $\Psi_{Nu}$  intenzitását, amely a (4.3.1) -(4.3.2) formulákkal van megadva: 0

$$\Psi_{Nu} = U^2 \vec{u} \cdot \vec{N}, \vec{u} = \frac{\vec{S}_u}{\left| \vec{S}_u \right|},$$

$$U = V_1 \left[ \frac{\left| \vec{S}_u \right| - \left| \vec{S}_{u0} \right|}{\sigma_S} \right]^{V_2} \left\{ 1 - \exp \left( \frac{V_3 \left| \vec{S}_u \right| \theta}{\sigma_S} \tau \right) \right\}.$$

Fontos megjegyezni, hogy mind az ultrahangos keményedést, mind az ultrahangos lágyítást modellező (4.3.9), (4.3.7) illetve (4.3.12), (4.3.17) képletek ugyan abból a (4.3.3) egyenletből vezethetők le.

**Az értekezés eredményei kapcsán a bírálónak felmerülnek az alábbi megjegyzései, kérdései :**

1. Miért nevezi a (3.5.8) alakú

$$\left( \frac{d\chi_0}{d\lambda} \right)^2 - 4 \cot \lambda \cdot \chi_0 \cdot \frac{d\chi_0}{d\lambda} + 4 \left( \frac{1}{\cos^4 \lambda \sin^2 \lambda} - 1 \right) \chi_0^2 - \tan^2 \lambda (\tan^2 \lambda + \sin^2 \lambda) = 0$$

egyenletet Ricatti -féle differenciálegyenletnek ? A Ricatti-féle differenciálegyenlet alakja egészen más.

Kérem, részletezze hogyan állította elő a felírt nemlineáris implicit alakú differenciálegyenletnek a (3.5.9) formulában ismertetet megoldását.

2. A 36. oldalon az áll, hogy  $\chi_0(\lambda)$  nem vesz fel komplex értéket a  $\lambda$  szög bármely értékén. Milyen tartományban változik  $\lambda$ ? Azonban, ha  $\lambda < \frac{1}{2} \sin^2 \lambda \tan \lambda$ , akkor  $y_0$  és  $\chi_0(\lambda)$  komplex értékű.

3. A 103. oldalon olvasható, hogy a numerikus számításokat a Szerző a Mathcad13 programcsomag segítségével végezte. Az értekezésben ezek a számítások nincsenek részletezve. Ha lehetséges, legalább egy esetben mutassa be ezeket a számításokat.

4. Az ábrák vizuálisan bemutatják, hogy a szintézis technikával kapott eredmények jól megegyeznek a mérésekkel. Meg lehet-e adni ennek a jó megegyezésnek a mennyiségi értékelését ?

### **Összegzés.**

Az értekezés alapvetően jól megírt munka, kevés és jelentéktelen elírást vettem észre.

A fenti kérdésekre adott válaszoktól függetlenül megállapítható, hogy az értekezés eredményei jelentős mértékben továbbfejlesztették a szilárd testek mechanikájában a képlékeny és kúszási alakváltozás matematikai modellezésének elméletét és annak gyakorlati felhasználhatóságát. Az eredmények újak és megalapozásuk sok új ötletet igényelt. Az értekezésben foglalt eredmények nemzetközi összehasonlításban is jelentősek. Mind a három tézist új tudományos eredményként fogadom el.

Javaslom az eljárás folytatását, a nyilvános vita kitűzését és a mű elfogadását.

Miskolc, 2017. november 27.

Rontó Miklós  
a matematikai tudomány doktora