

Hivatalos bírálói vélemény

Ruszkó Endre

Képlékeny és kúszási alakváltozás modellezése a szintézis elmélet keretében

c. doktori munkájáról.

Az utóbbi évek látványos technikai fejlődése magával hozza az új anyagok megjelenését, a korábbiak továbbfejlesztését, acéloknál a folyáshatár megemelését, a kúszási jelenségek pontosabb megértésének igényét, az alakítási technológiákban az ultrahangos gerjesztés alkalmazásának bővülését.

Mindezek hatással vannak az anyagok mechanikai viselkedésének pontosabb leírását célzó kutatások végzésére, a kísérletekből adódó eredmények alapján anyagtörvények pontosabb megfogalmazására, ezeket felhasználó a testek feszültségi és alakváltozási állapotainak meghatározását szolgáló elméletek, numerikus módszerek tovább fejlesztésére.

Ruszkó Endre témaválasztása beilleszkedik a fentiekbe, nevezetesen a képlékeny és kúszási állapotok vizsgálatába, analitikus megoldások létrehozására, három fő területen.

Egyik a kúszási jelenségeknél tapasztalható ún. negatív kúszás, a késedelemmel kialakult kúszás, ill., az ezeket követő újbóli kúszás, ún. inverz kúszás kialakulásának leírása, egységes rendszerbe való foglalása.

Második terület annak vizsgálata, hogy a kúszásra milyen hatása van az előzetes termikus hőkezelés.

A *harmadik* pedig az ultrahangos terhelés hatásának elemzése, többek között a folyáshatár értékének megváltozása, az egyidejű mechanikai és ultrahangos terhelés hatásának vizsgálata.

Témaválasztása indokolt.

Az értekezés angol nyelven íródott. Négy fejezetből áll, 102 oldalt követően 7 oldalas bő irodalomjegyzék zárja le a munkát.

Az *első fejezet* a bevezetés, rövid ismertetése a disszertáció tárgyának, a fő céloknak.

A *második fejezet* a kísérletek eredményeit ismerteti, levonva belőlük a megoldandó feladatokat. Itt kiemelt jelentősége van a 2.2 ábrának (a tézisek 1. ábrája) az első kutatási területet illetően, a 2.14-2.20 ábráknak (tézis 2- 5. ábra) a hőkezelés hatásának vizsgálatához kapcsolatosan, továbbá a 2.10-2.11 ábráknak (tézis 6-8. ábra) az ultrahang hatásával kapcsolatban. Ezekből az ábrákból von le fontos következtetéseket a megoldandó feladatokat illetően.

A *harmadik fejezet* a szintézis elmélet fontosabb eredményeit foglalja össze. Ezen elméletet a Lemberg Műszaki Egyetemen Ruszkó Konsztantyin és Andruszik Jaroszlav dolgozta ki 1993-ban. Az elmélet első variációját kis alakváltozású képlékenységtani feladatokra használták. Az elmélet a Batdorf-Budiansky féle csúszási koncepciót és a Sanders féle folyási

elméletet ötvözi. A csúszási koncepció szerint a test egy P pontjának környezetében kialakuló plasztikus alakváltozást a micro szinten (a fém kristályainak méretét adó kis térfogaton) megjelenő csúszások összessége szolgáltatja.

A csúszás kialakuláshoz Sanders a Tresca féle folyási feltételt alkalmazza oly módon, hogy az $\mathbf{n}$ normálisú felületen $\mathbf{l}$ irányában fellépő csúszató (nyíró) feszültség el kell, hogy érje a nyírási csúsztató feszültséget.

Lényeges az elméletben, hogy a mechanikai feltételeket az Iljushin által javasolt 5 dimenziós feszültségi deviátorok terében írja le. A maximális csúsztató feszültség irányát három szögmegadásával tarja kézben, az $\tilde{\alpha}$ és $\tilde{\beta}$ szögek a sík $\mathbf{n}$ normálisát jelölik ki, ω pedig a síkban a csúsztató feszültség irányát. A maximális értékhez az $\mathbf{N}$ normális tartozik. A felírható síkok összessége érinti a folyási felületet.

A másik fontos elem, hogy bevezeti a háromdimenziós alteret, amiben jóval egyszerűbbé válik a folyási feltételek kezelése. Itt megjegyzendő, hogy a szintézis elmélet csak akkor alkalmazható, ha a feszültségi állapotnál a kiskockán a normálfeszültségek mellett csak az egyik síkpáron lép fel csúsztató feszültség, pl. $\tau_{xy} \neq 0, \tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0$. Ebben az S^3 -as térben kapott sík nyomát kijelölő $\mathbf{m}$ irány úgyszintén gömbi koordinátarendszerben van felírva α és β szögekkel. Jelentős szerephez jut az $\mathbf{N}$ és $\mathbf{m}$ közötti szög, a λ . Az S^5 ös térbeli síknak a távolsága az origótól H_N , míg az S^3 -ban h_m , amelyek a (3.4.11) en keresztül vannak kapcsolatban egymással.

Megjegyzés 1: Mi a fizikai alapja a (3.4.7) alatti d normalizáló faktornak?

Az S^5 -ben az érintősíkok egyenlete a (3.4.4) és (3.4.18) egyenletekkel adható meg, az első esetben az $\tilde{\alpha}$, $\tilde{\beta}$ és ω szögeken keresztül, a második esetben az α , β és λ révén.

A 3.5 alatti alfejezetben fontos javaslattal él a jelölt. Nevezetesen azzal, hogy a χ helyett a $\chi_0(\lambda)$ bevezetésével elérhető lesz, hogy a (3.5.1) alatti sík egyenlete mindenütt deriválhatóvá válik.

Megjegyzés 2: Hogyan viselkedik a (3.5.9) alatti $\chi_0(\lambda)$ kilencven fok környékén?

Mivel az S^3 -as térben az érintősík (3.6.1) alatti nyoma folyás bekövetkeztekor kielégíti a (3.6.2) alatti szélsőérték feltételeket, a folyási felület érintői egy gömbfelületet burkolnak (mintha a Mises féle folyási feltétel állna fenn). A tényleges feszültségi állapot az S^5 térben értelmezett. Valójában a (3.5.1) alatt bevezetett $\chi_0(\lambda)$ szöggel, a tényleges folyási feltétel már nem a Tresca féle, de nem is a Mises féle.

Megjegyzés 3: Mennyi a hiba a Tresca és a Mises feltétel vonatkozásában, hogyan volna ez kimutatható?

A szintézis elmélet nem a folyási felülettel dolgozik, nem annak változását szemléli, hanem az érintősíkok összességét (ezek burkolják a folyási, terhelési felületet). Mindegyik síkhoz egy csúszási állapot tartozik. Az Iljuszin féle feszültségi deviátor térben értelmezett feszültségvektor jellemzi a feszültség állapotot. A folyási feltétel teljesülésekor (csúszás aktivizálódásakor) a feszültségvektor eltolja a végén található síkokat. Ezáltal egy megváltozott burkolófelületet kapunk. A plasztikus alakváltozás megjelenése a korábban már említett H_N síktávolsággal jellemezhető. Tehát, ha $\mathbf{S} \cdot \mathbf{N} = H_N$ -el akkor létrejött a plasztikus alakváltozás, ha $\mathbf{S} \cdot \mathbf{N} < H_N$, akkor nem. Az így kapott felületet a terhelési felület, (lásd 3.6, 3.7 ábra, tézisek 12. ábra).

Megjegyzés 4: Általános esetben (pl. síkfeszültségi állapotban lévő testnél) hogyan tudjuk meghatározni az $\mathbf{N}$ vektort? A (3.6.1)-(3.6.4) alattiak már a folyási feltétel teljesülésekor állnak fenn. Ha $\mathbf{S} \cdot \mathbf{N} < H_N$, akkor még növelni kell a terhelést.

A maradó (képlékeny) alakváltozás növekményét φ_N alakváltozási intenzitási függvényen keresztül fejezi ki az elmélet, figyelembevéve, hogy az alakváltozási növekmény vektora párhuzamos az $\mathbf{N}$ vektorral, azaz merőleges az érintő síkra és a nagyságát a pont környezetének elemi térfogata határozza meg, hisz ebben a térfogatban zajlanak le a maradó alakváltozást okozó csúszások. A teljes képlékeny alakváltozást az S^3 térben vett térfogati integrál szolgáltatja. A dV elemi térfogatot a $\cos \beta d\alpha d\beta d\lambda$ szorzat jelenti.

Külön alfejezet foglalkozik a micro szinten lezajló képlékeny alakváltozással. Fontos szerep jut a keményedő anyagot jellemző az érintő sík távolságát befolyásoló függvényeknek. Bevezetésre kerül a ψ_N hibaintenzitás, az I_N sebesség integrál, továbbá a nullához tartozó terhelési sebességnek megfelelő S_p folyáshatár (kúszási határ).

A síktávolságot lineárisan ill. négyzetes módon közelíti: $H_N = S_p + I_N + \psi_N$,
 $H_N^2 = S_p^2 + I_N^2 + \psi_N$.

Az $I_N = B \int_0^t \frac{d\mathbf{S}}{ds} \cdot \mathbf{N} \exp(-p(t-s)) ds$ integrállal számolható, ahol B, p anyagállandók.

Megjegyzés 5: A (3.8.6) alatti képletben az $(\dot{\mathbf{S}} \cdot \mathbf{N})$ szorzatot a $t = t_M$ időnél kell venni.

Megjegyzés 6: Miért azonos a p értéke a $t \in [0, t_M]$ és a $t > t_M$ tartományban? Ezt kísérletek is igazolják?

A micro szinten lezajló alakváltozásra a (3.8.7) differenciálegyenlet szolgál. A hibaintenzitás növekménye az alakváltozás intenzitás növekményével arányos továbbá az idő hatása a hibaintenzitással arányos, azaz $d\psi_N = r d\varphi_N - K\psi_N dt$. A K paraméter az S hosszától és a hőmérséklettől függ. Az első tag az alakváltozás fejlődéséből, a második tag az időbeli lágyulásból (relaxáció) adódik. Ezen differenciálegyenlet aleteit tárgyalja a 3.9 alfejezet.

A *negyedik fejezetben* kerül sor az első kutatandó téma részletezésére, nevezetesen egy a húzásnak kitett testnél a terhelés hirtelen csökkentése miatt előálló negatív képlékeny alakváltozási növekmény, a negatív kúszás és a kúszási késedelem meghatározására. A sikeres vizsgálathoz szükség volt a negatív N vektor értelmezésre, az ebből adódó érintő sík távolság, a hibaintenzitás és a hibaintegrál meghatározására.

Megjegyzés 7: A (4.1.14) alattiak milyen megfontolásból származnak? Az összefüggéseket másképp felírva, $\cos \alpha_0 = \frac{S_s}{S_1}$, $\cos \beta_0 = \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}$, $\cos \lambda_0 = \frac{\cos \beta_0}{\cos \beta}$. Ha az $\alpha_0, \beta_0, \lambda_0$ szélsőérték, akkor hogyan szerepelhet a képletben a változó α, β ?

Hasonló a helyzet a (4.1.32-33), a (4.1.50), a (4.1.60), sőt a (4.2.7) és a (4.2.15) alatti összefüggéseknél is. A (4.1.33) a $t = t_2$ időponthoz tartozik?

Megjegyzés 8: Kérem részletezni a (4.1.19)-ből levezetett (4.1.20)-(4.1.23) összefüggéseket!

Megjegyzés 9: Az 54. oldalon $\pi - \beta_0 \leq |\alpha| \leq \pi$ helyett $\pi - \beta_0 \leq |\beta| \leq \pi$.

Megjegyzés 10: Az 59. oldalon a (4.1.42) képletnél, mit jelent: $\cdot$ and $I_N = 0$?

Lényeges alfejezet a 4.1.8, amelyben a szintézis elmélet módosításával nyert modell által kapott eredmények kísérletekkel történő összehasonlítása van összefoglalva. A számított és a kísérleti mért eredmények kicsiny eltérései a modell jóságáról tanúskodnak.

A 4.2 alfejezetben az előzetes hőkezelés hatásait vizsgálja a disszertáció.

Képlékeny alakváltozást szenvedett próbatestet T_a nagyságú hőmérsékletre melegítik. A melegítés időtartama úgyszintén adott, t_a . Ezt követően a próbatest kúszás alatti viselkedését tanulmányozza a jelölt. Ez a kúszás az ún. szekunder kúszás. A hőkezelés erősen befolyásolja a kristályos szerkezetben fellépő diszlokációkat, azok megoszlását, a kialakuló kristályhibákat. A kísérlet szerint a kialakuló kúszási sebesség meglehetősen bonyolultan változik a fajlagos nyúlás függvényében (tézisek 3. ábra). Ennek analitikus leírása a fő feladat. A szintézis elmélet

szerint az alakváltozás $\dot{\varphi}_N$ sebességére jelentős befolyással van a ψ_N hibaintenzitás. Ennek értéke azonban függ a csúszási sík kezdeti, ill. a hőkezelés során kialakult távolságtól. Az állandósult kúszási sebességet háromféle mennyiség függvényeként vizsgálja, / (4.2.1)-(4.2.3) egyenletek/. A hibaintenzitásnál a siktávolságok négyzetétől való függését tételezi fel (4.2.17). Minthogy az időbeli lefutást a K (K_M) tényező erőteljesen befolyásolja, ezeknek megadása az egyik jelentős momentum az elmélet kidolgozásában, /lásd. (4.2.21-22), (4.2.35), (4.2.38) alatti összefüggéseket./ Fontos az ezekben szereplő anyagállandók meghatározása.

Megjegyzés 11: A kísérletek és a számítások révén milyen hibaelv felhasználásával kerültek kiszámításra a szóban forgó állandók? Hányfajta kísérletet kell elvégezni, és azokat milyen körülmények között?

Megjegyzés 12: A (4.2.24) képletben az $|\mathbf{S}|$ -nál a pont felesleges.

A következő 4.3 alfejezetben az ultrahang hatásait vizsgálja a disszertáció, egytengelyű feszültségállapotban lévő húzott testeknél.

Itt jelentős szerep jut az ultrahang okozta kristályrács hibáinak intenzitását megadó új függvény, a ψ_{Nu} bevezetésének, az $\mathbf{S}_{u0}$ feszültségi deviátor vektornak, amelynél az ultrahang a kristályrács hibáinak fejlődését elindítja. A U speciális alakja, a benne szereplő v_i anyagállandók eredeti ötletéről tesznek tanúbizonyságot. Az ultrahanggal kezelt anyag keményedő, és lágyuló tulajdonsága is megfigyelhető.

Megjegyzés 13: Itt is probléma az anyagállandók meghatározásra szóló elv megadásának hiánya.

Megjegyzés 14: A 4.29-es diagram szerint a mért és számított értékek közötti eltérés nem jelentéktelen. Milyen eszközökkel lehetne a számításra felépített modellt pontosítani? Van erre vonatkozó javaslata?

Az értekezéstartalmát érintően, az irodalomjegyzék megadása előtti két oldal a munka főbb értékeit ill. további kutatások lehetőségét foglalja össze.

*

A disszertáció olyan kérdéseket tárgyal, amelyek a szokásos klasszikus megfontolásokkal, eljárásokkal nem magyarázhatók meg. A jelölt eredményei a képlékenységtan elméletének szélesítéséhez, azok megalapozásához való hozzájárulás tekintetében jelentősek. Maga a szintézis elmélet, annak alkalmazási lehetősége, napjainkig a hétköznapi életben kevésbé ismert. Kidolgozott modelljei ennek feloldását segítik.

A disszertáció gondosan elkészített, csak néhány apróbb elírást találtam. A felvetett megjegyzésekre adott reménybeli, részletes válaszok minden bizonnyal elősegítenek a leírtak pontosabb megértésében.

Tézisekkel kapcsolatban a **Megjegyzés 7,8**-ra adott válaszoktól függően tudom majd kialakítani álláspontomat a tézisek elfogadásáról.

Végezetül egy általános, a jövő kutatásait is inspiráló megjegyzéssel zárom véleményemet.

Megjegyzés 15: Mint a numerikus számításokkal foglalkozó kutató, jó volna, ha kapnék utalásokat arra vonatkozóan, hogyan lehetne tetszőleges alakú és terhelésű síkbeli testekre a fenti, analitikus megoldásokat kiterjeszteni és alkalmazni. Jó volna összefoglalni egy nagy táblázatba, milyen anyagállandók szükségesek a számításokhoz? Mi van ha, olyan terheléssel találkozunk, aminek anyagállandói pontosan nem ismertek, hogyan interpolálunk? Hogyan lehetne egy szokványos végeelem programba beépíteni a szintézis elméletet, milyen lényeges változtatásokat kellene végrehajtani? A folyási felület helyett az érintősíkokkal hogyan lehetne dolgozni, stb?

Összefoglalva, az értekezés igényes munkát takar, az egyes kérdéseket sokoldalúan elemzi, értékeli. Analitikus megoldásokat magas szintű matematikai ismereteivel, azok biztos kezelésével érte el. A bemutatott eredményei hitelesek, azokat rangos folyóiratokban is publikálta. A Springer kiadónál társszerzővel megjelent könyv, úgyszintén tanúskodik a jelölt széleskörű, mély ismereteiről.

A doktori művet a nyilvános vitára alkalmasnak tartom és így a nyilvános védés kitűzését javaslom.

Miskolc, 2018. június 7.

Páczelt István
az MTA rendes tagja