

## TAYLOR TESZT MODELLEZÉSE A JOHNSON-COOK ANYAGMODELL ALKALMAZÁSÁVAL: A HŐMÉRSÉKLET HATÁSA

### COMPUTATIONAL SIMULATION OF THE TAYLOR IMPACT TEST USING THE JOHNSON-COOK CONSTITUTIVE MODEL: THE EFFECT OF TEMPERATURE

Varga Péter, Gonda Viktor, Rác Pál

Óbudai Egyetem, BGK-AGI, 1081 Budapest, Népszínház u. 8. Telefon / Fax: +31-1-6665402, [varga.peter@bgk.uni-obuda.hu](mailto:varga.peter@bgk.uni-obuda.hu)

#### Abstract

Taylor impact testing is a high strain rate testing method. Although it is easy to execute, the stress state, and the deformation distribution within the specimen is complex. We examined the deformation of the specimen by the finite element method, by using the Johnson-Cook material model. We analyzed the effect of temperature on the deformation of a copper specimen at three different impact velocities.

*Keywords:* Taylor impact test, Johnson-Cook material model, finite element method.

#### Összefoglalás

Az extrém nagy alakváltozási sebességű mechanikai anyagvizsgálat egyik legegyszerűbben végrehajtható módja a Taylor-teszt. Egyszerűsége ellenére igen komplex az alakváltozás lefolyása és eloszlása a próbatestben. A próbatest alakváltozását végeleemes módszerrel vizsgáltuk, ahol anyagmodellnek a Johnson-Cook modellt választottuk. Vizsgáltuk a hőmérséklet hatását egy réz próbatest deformációjára három különböző sebességű becsapódás esetén.

*Kulcsszavak:* Taylor-teszt, Johnson-Cook anyagmodell, végeleemes módszer.

#### 1. Bevezetés

Fémes szerkezeti anyagok nagy sebességű és nagymértékű dinamikus terhelése létrejöhet lövedékek becsapódása-kor, járművek ütközésekor, vagy nagy sebességű képlékeny alakítások pl. robbantásos vagy elektrodinamikus alakítások. Ilyenkor a képlékeny alakváltozási sebesség mértéke  $>10^3 \text{ s}^{-1}$  nagyságrendű is lehet. Az anyag makro deformációját a tömeghatás, az alakítási keményedés, a sebesség-érzékenység, valamint a képlékeny alakváltozás miatt kialakuló hőmérséklet-emelkedéssel járó lágyulás határozza meg. Az ún. Taylor üt-

közési vizsgálattal [1] egy hengeres alakú próbatestet egy falnak lövünk, a deformált geometriából becsülhető a dinamikus alakítási szilárdság. A próbatest alakváltozásának modellezéséhez olyan anyagmodellrel választhatunk, amivel a nagy alakváltozási sebesség tartományban is jól írja le az anyagi viselkedést, pl. az Armstrong–Zerilli modellt [2] vagy a Johnson-Cook modellt [3].

Egy OFHC réz próbatest Taylor tesztjének végeleemes szimulációját hoztuk létre a Johnson-Cook anyagmodellrel felhasználva három becsapódási sebesség esetén, melyek

értékeinél már képlékeny alakváltozás is létrejön, de képlékeny tönkremenetel még nem. Vizsgáltuk a képlékeny alakváltozás hatására kialakuló felhevülés okozta lágyulás hatását a kialakuló deformációra.

## 2. Modellezés

A Taylor teszt végeसेlemes szimulációját az MSC Marcban hoztuk létre. A hengeres próbatest kiinduló átmérője 7,62 mm, a hossza  $l_0 = 25,4$  mm. A tengelyszimmetriát kihasználva síkbeli modellt készítettünk egy sugárnyi szélességgel. A hálót az érintkezési vonal (felület) irányába finomítottuk. A próbatest becsapódási sebessége ( $v$ ): 130 m/s; 144 m/s; vagy 190 m/s volt. A falat merevnek és súrlódásmentesnek tekintettük.

A próbatest anyagára lineárisan rugalmas-képlékeny modellt használtunk. A rugalmassági paraméterek értékei: rugalmassági modulus: 110 GPa; Poisson-tényező: 0,33. A képlékeny anyagmodellre a Johnson-Cook modellt választottuk [1]:

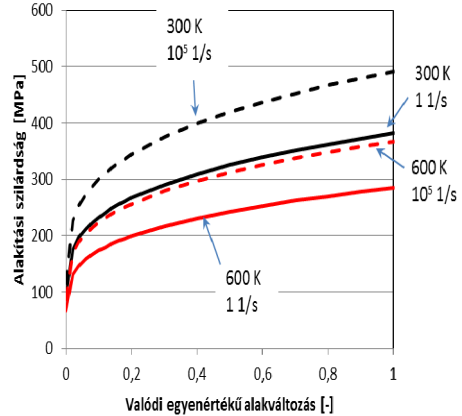
$$k_f = \left( A + B \varepsilon_{eq}^n \right) \left( 1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (1)$$

Ahol  $k_f$  az alakítási szilárdság,  $\varepsilon_{eq}$  az egyenértékű alakváltozás, az az egyenértékű alakváltozási sebesség. Az anyagmodell paraméterei OFHC rézre vonatkozóan:  $A = 90$  MPa;  $B = 292$  MPa;  $n = 0,31$ ;  $C = 0,025$ ;  $m = 1,09$ ;  $\dot{\varepsilon}_0 = 1$  1/s;  $T_r = 300$  K [1]. A modelltől számított folyási görbék 300 K és 600 K hőmérsékleten, valamint 1 1/s és  $10^5$  1/s alakváltozási sebesség értékekhez az 1. ábrán láthatók.

Az OFHC réz további felhasznált fizikai paraméterei: olvadáspont:  $T_m = 1356$  K; sűrűség: 8960 kg/m<sup>3</sup>; fajlagos hőkapacitás: 383 J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>; hővezetési tényező: 401 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>; hőtágulási tényező: 16,6 ppm/K.

A számítási modell csak mechanikai (M), vagy csatolt termo-mechanikai (TM) esetre futtattuk le, dinamikus tranziens (explicit) megoldóval, a single step Houbolt eljárást használva, a nagy alakváltozás op-

ciót beállítva. Az időlépést a modál analízisből kivett 2. sajátfrekvencia értékét felhasználva határoztuk meg, majd ezt finomítottuk,  $10^{-7}$  s körüli értéken.

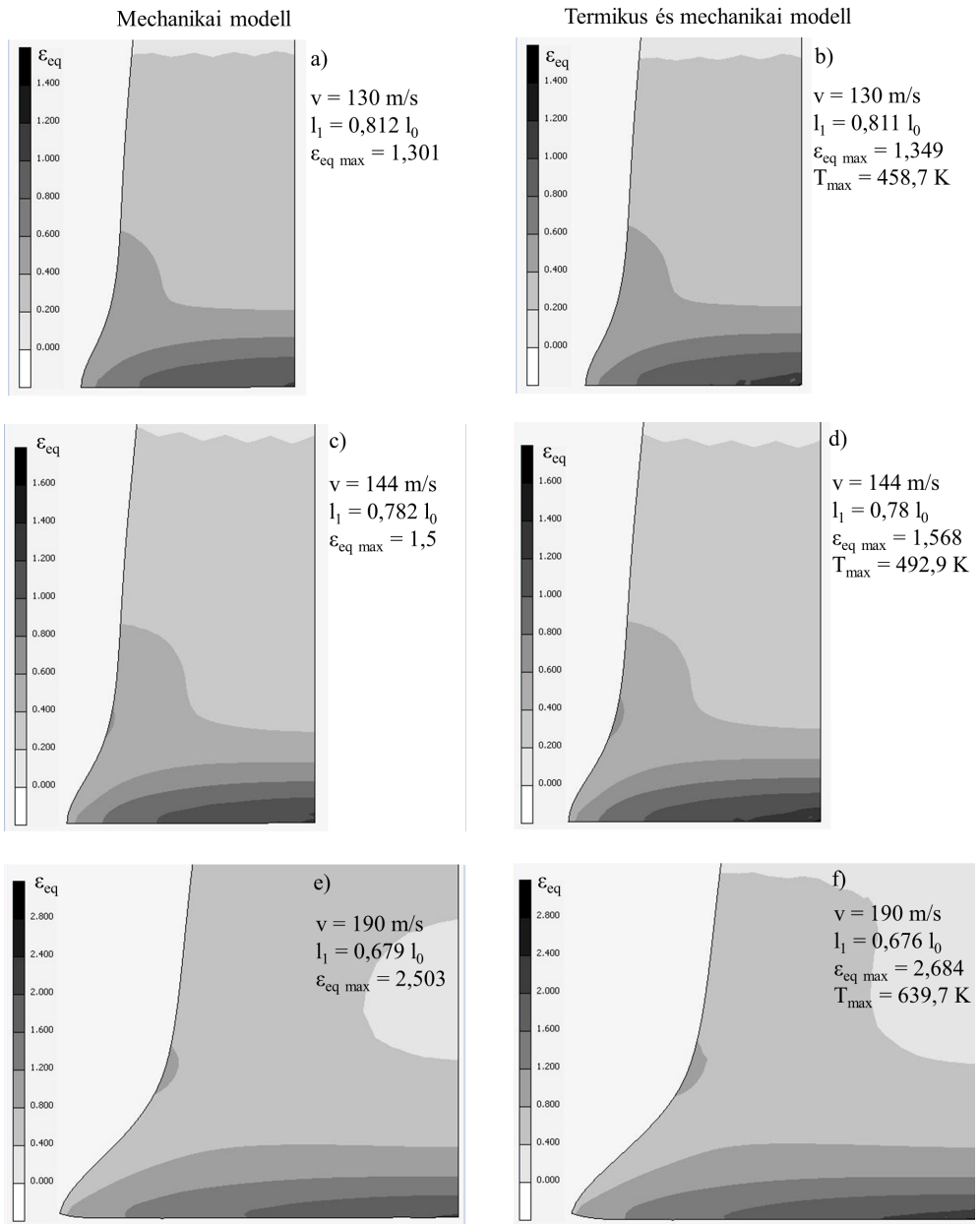


1. ábra. A réz folyási görbéi a Johnson-Cook modelltől számítva.

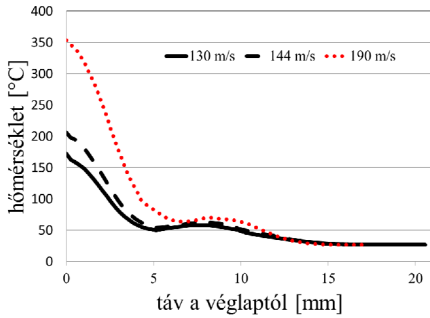
## 3. Eredmények és következtetések

Az alakváltozások eloszlása az ütköző felület közelében a 2. ábrán látható tisztán mechanikai modell esetére (a, c, e) ábra, valamint a képlékeny alakváltozás hatására kialakuló hőmérséklet-növekedést figyelembe véve (b, d, f) ábra. Az alakváltozás eloszlásában nincs jelentős különbség az M és a TM modell között. Az M modellben végig 300 K a hőmérséklet, a TM modellben a létrejövő legnagyobb hőmérséklet a próbatestekben 458,7 K; 492,9 K; illetve 639,7 K a 130; 144; valamint 190 m/s-os becsapódási sebesség-ekhez. A legnagyobb alakváltozás értékeit összehasonlítva az M modellben 1,3; 1,5 és 2,3-as értékeket kapunk a, a TM modellnél a lágyulás miatt a növekedés csak 5% alatti.

A próbatest ütközés utáni és ütközés előtti hosszának arányait tekintve gyakorlatilag ugyanakkora arányokat kapunk (0,81; 0,78; és 0,67) a növekvő becsapódási sebesség-ekhez mindkét modellnél.



**2. ábra.** Az alakváltozások számított eloszlása a mechanikai és a csatolt termikus mechanikai modellnél 130, 144 és 190 m/s becsapódási sebességnél az ütköző felület közelében.



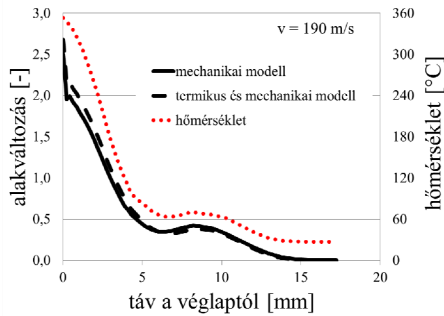
3. ábra. A szimmetriatengelyen számított hőmérséklet 130, 144, és 190 m/s becsapódási sebességekhez.

Ezek az arányok megegyeznek az irodalomban található értékekkel [1].

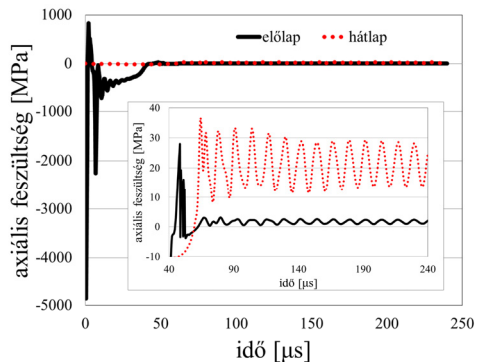
A hőmérséklet eloszlásokat a szimmetriatengelyen vizsgálva a maximális alakváltozás elérésekor (3. ábra) látható, hogy a nagy hőmérsékletnövekedés az ütköző felülethez közeli (kb. 5 mm-es) tartományban alakul ki. A két modellt összevetve a legnagyobb becsapódási sebességnél (4. ábra), az alakváltozások szimmetriatengelyen vett eloszlását összehasonlítva csekély különbség látható a becsapódási felület 5 mm-es közelében. Három deformációs tartomány különböztethető meg: a becsapódáshoz közeli (0-5 mm) nagy alakváltozási rész ( $\epsilon_{eq} > 0,5$ ), kis képlékeny alakváltozó rész ( $\epsilon_{eq} < 0,5$ ) (5-13 mm), valamint a maradó alakváltozást nem szenvedő rész (13 mm felett), itt csak rugalmas alakváltozások jönnek létre. A próbatest két felületén ébredő axiális feszültségek időbeli lefolyását az 5. ábrán láthatjuk. A nagy, képlékeny alakváltozást okozó nyomófeszültség lecsengése után komplex módusú rugalmas lengés alakul ki a próbatestben.

A lokalizált nagy alakváltozású zónában létrejövő kb. 300 K hőmérsékletnövekedés az alakítási szilárdságot nem csökkenti olyan mértékben, hogy nagymértékben nőnének az alakváltozások, ezért a próbatest teljes hosszában sem lesz jelentős a rövidü-

lés a hőmérséklet hatását figyelembe véve a vizsgált becsapódási sebességeknél.



4. ábra. A szimmetriatengelyen számított alakváltozások a mechanikai és csatolt termikus és mechanikai modellre, 190 m/s becsapódási sebességnél. A csatolt modell hőmérsékletei a szimmetria-tengelyen.



5. ábra. A szimmetriatengely két végén számított axiális feszültségek az idő függvényében. Az inertz a rugalmas lengéseket mutatja.

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Taylor, G. I.: *The testing of materials at high rates of loading*, J. Inst. Civil Eng. 26, 1946. 486–519.
- [2] Forde, L. C., Proud, W. G., Walley, S. M.: *Symmetrical Taylor impact studies of copper*, Proc. R. Soc. A 465, 2009. 769–790.
- [3] Johnson, G.R., Cook, W.H.: *A constitutive model and data for metals...*, Proc. 7th Int. symp. on Ballistics, The Netherlands, 1983. 541-547.