

# Többtengelyű kovácsolás virtuális és fizikai szimulációinak összehasonlítása

## Comparison of virtual and physical simulation of multi-axial forging processes

RENKÓ József Bálint<sup>1</sup>, KRÁLLICS György<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszék  
H-1111 Budapest, Magyarország, renko.jozsef@edu.bme.hu

<sup>2</sup>Miskolci Egyetem, Fémteni és Képlékenyalakítási Intézeti Tanszék  
H-3515 Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, femkg@uni-miskolc.hu

### Abstract

*On a Gleeble 3800 thermophysical simulator, multi-axial forging of high-purity copper workpieces was performed. The strain rate during the simulation process was 0.1 s<sup>-1</sup>. The applied force of the MaxStrain unit and the geometric changes of the workpiece as a function of time were continuously recorded. For a deeper understanding of the multi-axial forging process, a finite element model was created in Qform3D. The force-displacement curves of the physical and finite element simulation were compared.*

**Keywords:** multi-axial forging, finite element, simulation, modelling, Gleeble

### Kivonat

*Gleeble 3800 típusú termofizikai szimulátoron nagy tisztaságú réz próbatestek multi-axiális kovácsolását végeztük 0.1 s<sup>-1</sup> alakváltozási sebességgel. A MaxStrain egységen folytatott méréseknél folyamatosan regisztráltuk az alakító erőt és a próbatest geometriai változásait az idő függvényében. A többtengelyű kovácsolási folyamat törvényszerűségeinek megismerése érdekében végelelemes modellt készítettünk Qform3D program segítségével. A QForm3D szoftverben készített végelelemes szimuláció erő-elmozdulás görbéit hasonlítottuk össze a fizikai szimuláció során rögzített adatokkal.*

**Kulcsszavak:** többtengelyű kovácsolás, végelelem, szimuláció, modellezés, Gleeble

## 1. BEVEZETÉS

Az intenzív képlékenyalakítás technológiája az elmúlt 25 évben jelentős fejlődésen ment keresztül. Ennek megvalósítására különböző eljárásokat fejlesztettek ki, mint például a könyöksajtólást [1,3], a nagynyomású csavarást [4,5], a váltakozó extrúziós-kompressziós eljárást [6], vagy a zárt szerszámú, váltakozó irányú kovácsolást [7]. A számos kialakult eljárás közül az egyik az úgynevezett többtengelyű kovácsolás [8–10]. Könnyű szerszámozhatóságnak köszönhetően az egyik legegyszerűbben megvalósítható intenzív képlékenyalakítási technológia. Többtengelyű kovácsolással lehetőség nyílik kilépni a megszokott mérettartományból, és akár 50–100 mm vagy annál nagyobb próbatesteket is alakítani.

A többtengelyű kovácsolás fizikai megvalósításához egy MaxStrain egységgel felszerelt Gleeble 3800 típusú termofizikai szimulátort használtunk. Gleeble rendszer alkalmazásával a szerszámmozgások, az alakítási sebesség, az alakítóerők és a hőmérséklet is nagy pontossággal szabályozható a teljes alakítási folyamat alatt. A rendszerbe beépített kamerával pedig az egyes alakítási lépések során kialakuló geometria is nyomon követhető.

A folyamat mélyebb megértésére az elvégzett fizikai szimulációkat számítógépes végelelemes szimulációban is megalkottuk. A szimulációkat QForm3D programmal készítettük el. A végelelem megfelelő használata ugyanis lehetőséget ad arra, hogy az alakítást folyamatában vizsgálhassuk. Jól előkészített virtuális modellel a valós körülményeket nagy pontossággal szimulálhatók le [11,12].

Célunk az volt, hogy a többtengelyű kovácsolás során végbemenő nem monoton alakváltozás-történetet végelelemben reprodukáljuk, annak megbízhatóságát pedig értékeljük. Munkánk során a QForm3D

szoftverben készített végeselemes szimuláció jellegzetes görbéit hasonlítottuk össze a fizikai szimuláció során rögzített adatokkal.

## 2. KÍSÉRLETI ANYAG ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZER

### 2.1. Kísérleti anyag

A kísérlethez választott anyag szabványos, ipari tisztaságú réz, amelynek összetétele az előírt határokon belül van. Az anyag kémiai összetételét az 1. táblázat mutatja be.

Vizsgálatok alapanyagául szolgáló CuE kémiai összetétele

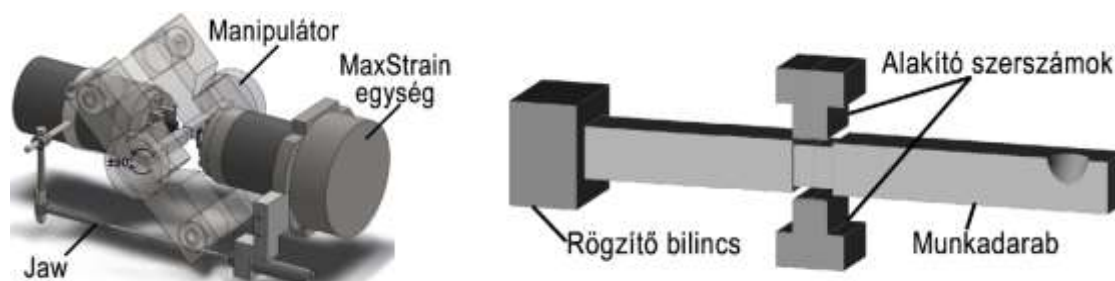
1. Táblázat

Elem	Cu	Fe	Pb	S	Zn	Ni	Sn
Tartalom (atom%)	99.978	0.005	0.004	0.004	0.004	0.002	0.002

A vizsgálatok anyagának olyan képlékeny alakításra alkalmas anyagot kellett választani, amiben az alakváltozást nem akadályozzák kiválások. A CuE az iparban is megtalálható nagy tisztaságú réz, amelyben az ötvözők és a szennyezők minimális aránya ideálissá teszi a választott vizsgálatokra.

### 2.2. Fizikai szimuláció

A többtengelyű kovácsolást a Gleeble 3800-as termofizikai szimulátor MaxStrain egységén végeztük. A munkadarabot tíz lépésben kívántuk készre alakítani úgy, hogy az egyes alakítási lépésekben megvalósított egyenértékű képlékeny alakváltozás 0,4 legyen. A teljes folyamat során így a halmozott alakváltozás mértéke 4. A szimulációban a négyzet keresztmetszetű, hasáb alakú próbatest középső, 12×12×12 mm-es részét alakítottuk sík felületű, 10 mm széles keményfém szerszámmal. A próbatestet az alakítás irányára merőlegesen elhelyezkedő bilincsekkel rögzítettük. A bilincsek egy manipulátorhoz csatlakoznak, lehetőséget adva a munkadarab hossz tengelye mentén történő elforgatására. A kétirányú ciklikus alakváltozást így ugyanaz a szerszám valósítja meg úgy, hogy minden alakítási lépés között a manipulátor 90°-ot forgat a munkadarabon (1. ábra).



1. ábra. MaxStrain berendezés és a munkadarabot rögzítő és forgató manipulátor elvi felépítése.

A szimulátor a beállított 100 Hz mérési frekvencia szerint folyamatosan rögzíti a szerszámok elmozdulását, az erőt és a hőmérsékletet. A szimulátor programozásával az alakítási lépések között lehetőségünk van a munkadarab méreteinek rögzítésére is. A munkadarab méreteinek pontos meghatározásához az alakítási lépések előtt  $0.1 \text{ s}^{-1}$  sebességgel előalakítást végzünk, amely során az egyenértékű képlékeny alakváltozás mértéke 0,1. Erre azért van szükség, mert a főalakítások után a munkadarab szabad felületei hordósodnak. A következő alakítási lépés kezdetén így a munkadarab és a szerszám közötti érintkező felület szabálytalan lenne, aminek hatására hullámzó erőlefutást tapasztalnánk. A jelenség úgy korrigálható, ha a főalakítások előtt a korábban leírt kis mértékű képlékeny alakítással elnyomjuk a próbatest hordósodott felületeit.

### 2.3. Végeselemes szimuláció

A folyamat végeselemes szimulációit QForm3D szoftver 9.0.8-as verziójával készítettük el. A szimulációhoz elkészítettük a munkadarab, az alakító szerszámok és a rögzítő bilincsek CAD modelljét is. A számítási teljesítmény csökkentésére a szimulációban félmodellel dolgoztunk. A próbatest további

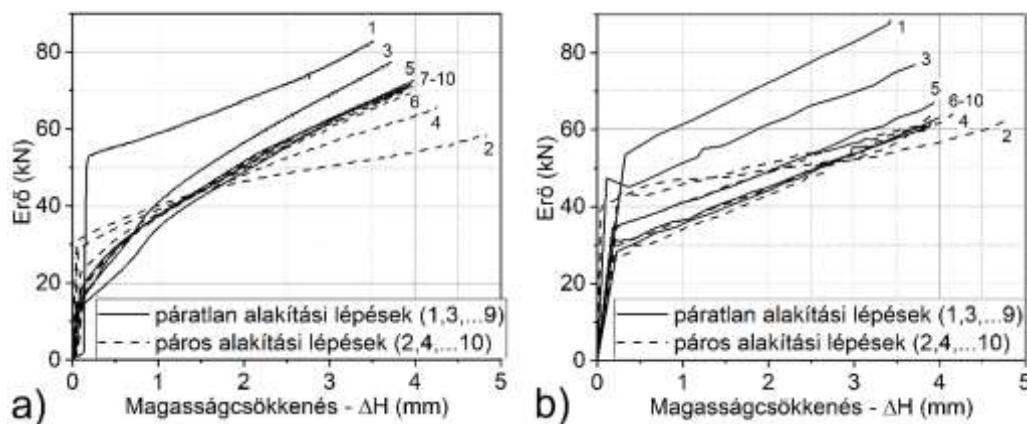
egyszerűsítése, esetleg negyed- vagy nyolcadmodell nem volt alkalmazható a rögzítő bilincsek kialakítása miatt (1. ábra).

A testek hálózását a QForm3D rendszere automatikusan elvégezte a beállított peremfeltételek figyelembevételével. A hálósűrűség a rögzítő bilincs és az alakított térfogat közelében finomabbra, míg a munkadarab szárában durvábbra lett állítva. Ezzel a hálózással sikerült elérni a kívánt mérési pontosságot, miközben a számítási idő nem nőtt jelentősen. A háló frissítése a szimuláció során folyamatos és automatikus volt, megőrizve a peremfeltételeket, valamint tovább sűrítve a hálót a számottevő alakváltozást elszenvedő csomópontok környezetében. A kezdeti csomópontok száma így 6049, míg a kezdeti elemek száma 32213 volt. Az elemek és csomópontok száma az újrahálózással folyamatosan változott. A maximális elemszám 80373, a maximális csomópontok száma 14448 volt.

Elsődleges célunk az volt, hogy megvizsgáljuk az általánosságban monoton alakítási folyamatokhoz használt anyagmodell ciklikus folyamathoz való alkalmazhatóságát. A számításokban alkalmazott, CuE-re vonatkozó rugalmas-képlékeny konstitutív egyenlet anyagjellemzői a szoftver adatbázisában voltak elérhetők. Jelen feladatnál ez az alakítási szilárdság, ami az alakváltozásnak, az alakváltozási sebességnek és a hőmérsékletnek a függvénye. A szimulációban szükségesek a hőfizikai paraméterek, például a fahő vagy a hőtadási tényezők, így a szoftver ezeket is figyelembe veszi. A kezdeti hőmérsékletet a valós mérési körülményekkel megegyezően 30 °C-ra állítottuk be.

### 3. EREDMÉNYEK ÉS DISZKUZZIÓ

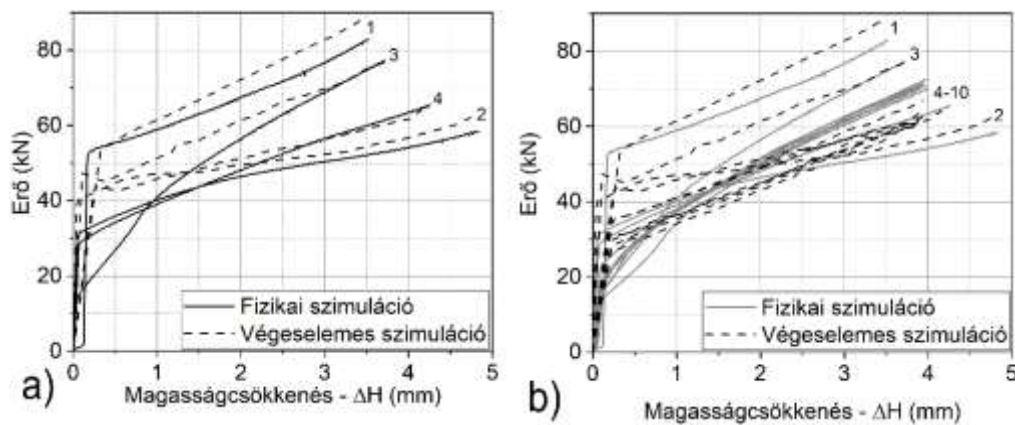
A fizikai szimulátoron rögzített erő-idő-elmozdulás értékeket felhasználva szétbontottuk a teljes mérési adattömböt a tíz alakítási ciklusra. Az egyes főalakítások során észlelt erő-elmozdulás értékpárokat a 2.a. ábra mutatja be. Látható, hogy kezdetben a páratlan alakítási lépések erőszükséglete lényegesen nagyobb volt, mint a páros alakítási lépéseké. Ez arra vezethető vissza, hogy az első alakítási lépésben kialakuló diszlokációs szerkezet más irányból ható igénybevételnek sokkal kevésbé áll ellen [13,14]. A következő alakítási lépésben kialakuló diszlokációs szerkezet az adott alakítási lépésnek megfelelően rendeződik újra. Az alakítási lépések előrehaladtával a szövetszerkezet finomodik, a görbék pedig egyre közelebb kerülnek egymáshoz. A jelenség megegyezik Bereczki és társai által vizsgált alumínium ötvözeteknél tapasztaltakkal [13–15].



2. ábra. Az erőlefutás a munkadarab magasságcsökkenésének függvényében a fizikai (a) és a végeleemes (b) szimulációban.

A végeleemes szimuláció eredményeinek kiértékelésekor rögzítettük az erő-elmozdulás értékpárokat (2.b. ábra). A görbék a fizikai szimuláció erő-elmozdulás görbéihez hasonló jelleget mutattak. A két szimuláció görbéit egymásra illesztve azonban kirajzolódik az egyértelmű különbség (3. ábra).

Az első és a második alakítás során a végeleemes szimuláció azonos magasságcsökkenéshez nagyobb erőértékeket számított, mint a valóságban rögzítettek. A harmadik és negyedik alakítási lépésnél a két szimuláció azonos erőértékekbe konvergál, míg az ötödik alakítási lépéstől a korábban észlelt tendencia megfordul. Innentől a fizikai szimulációhoz megközelítőleg 5 kN-nal nagyobb erőre volt szükséges, mint a végeleemben.



3. ábra. A fizikai és a végeselemes szimuláció első négy alakítási lépésének (a), valamint az összes alakítási lépésének (b) erőlefutása a munkadarab magasságcsökkenésének függvényében.

#### 4. ÖSSZEGZÉS

A vizsgálati eredmények összességüként megállapítható, hogy a megvalósított végeselemes szimuláció jó közelítéssel képes volt reprodukálni a fizikai szimulációt. A hőmérsékletváltozás mindkét folyamat során egy szűk tartományon belül mozgott, így ennek hatása nem okozott érdemi különbségeket. Az erő-elmozdulás görbék mindkét esetben hasonló jelleget mutattak. A mért folyamatnál az első alakítási lépéshez képest a második alakítási lépésnek lényegesen kisebb volt az erőszükséglete. A második alakítási lépés után a görbék az első és a második görbe által határolt tartományban futnak ki, egyre jobban közelítve egymáshoz. A harmadik alakítási lépéstől a páratlan sorszámú erő-elmozdulás görbék felülről, a páros sorszámú görbék pedig alulról közelítik az elméleti, végtelen alakítási ciklushoz tartozó konvergencia-görbét.

Az erő-elmozdulás értékek összehasonlításakor a virtuális környezetben rögzített görbék nagyobb erőszükségletet mutattak a kezdeti alakítási lépésekben. A kumulált alakváltozás növelésével azonban a tendencia megfordult, és azonos mértékű elmozdulásnál kisebb erőértéket mutattak, mint a fizikai szimuláció. Az erő-görbékben tapasztalt eltérések az alkalmazott anyagmodell pontatlanságára voltak visszavezethetők. A halmozott alakváltozás növekedésével a végeselemes modell geometriája is egyre inkább eltért a fizikai szimulátorban tapasztaltaktól. A használt anyagmodell monoton folyamatokra készült és nem volt képes követni az erősen nem-monoton, ciklikus alakváltozást.

A modell továbbfejlesztésével, a ciklikus alakváltozási folyamatok pontosabb leírásával a többtengelyű kovácsozás, és más bonyolult alakítási folyamatok pontosabban leírhatóvá válnak.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikáció az Emberi Erőforrások Minisztériuma NTP-SZKOLL-20-0067 kódszámú Nemzeti Tehetség Program pályázatának támogatásával valósult meg.

#### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] V.M. Segal, V.I. Reznikov, A.E. Drobyshevskij, V.I. Kopylov, Russian Metallurgy, 1, 1981, pp. 115
- [2] V.M. Segal, Mater. Sci. Eng. A197, 1995, pp. 157-164
- [3] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, „Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation”, Progress in Mater. Sci. 45, 2000, pp. 103-189
- [4] A.A. Popov, I.Y. Pyshmintsev, S.I. Demakov, A.G. Illarionov, T.C. Lowe, R.Z. Valiev, „Structural and mechanical properties of nanocrystalline titanium processed by severe plastic deformation processing”, Scr. Mater. 37, 1997, 1089-1094
- [6] A. Korbel, M. Richert, J. Richert, „The effects of very high cumulative deformation on structure and mechanical properties of aluminium”, In: Proc. 2nd Riso Int. Symp. on Metallurgy and Material Science, Roskilde, Denmark, September 14–18, 1981, pp. 445–450
- [7] D. Magalhães, A. Pratti, A. Kliauga, J. Rubert, M. Ferrante, V. Sordi, „Numerical simulation of cryogenic cyclic closed-die forging of Cu: Hardness distribution, strain maps and microstructural stability”, Journal of Materials Research and Technology 8(1), 2018, 333-343
- [8] P. J. Szabó, Bereczki, B. Verő, „The Effect of Multiaxial Forging on the Grain Refinement of Low Alloyed Steel”, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 55(1), 2011, pp. 63-66

- 
- [9] T. S. B. Naser, G. Krállics, „The effect of multiple forging and cold rolling on bending and tensile behavior of Al 7075 alloy”, *Mater. Sci. Forum* 729, 2012, pp.464-469
- [10] M. Tikhonova, V. Dudko, A. Belyakov, R. Kaibyshev, „The Formation of Submicrometer Scale Grains in a Super304H Steel during Multiple Compressions at 700°C”, *Materials Science Forum* 667–669, 2010, pp. 565–570
- [11] J. Li, F. Wu, „Finite Element Analysis on the Precision Forging of the Semimonocoque”, *International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*, Changsha, 2017, pp. 355-357
- [12] J. B. Renkó, D. Kemény, J. Nyirő, D. Kovács, „Comparison of cooling simulations of injection moulding tools created with cutting machining and additive manufacturing”, *Materials Today: Proceedings* 12, 2019, pp. 462-469
- [13] P. Bereczki, V. Szombathelyi, G. Krállics, „Determination of flow curve at large cyclic plastic strain by multiaxial forging on MaxStrain System”, *International Journal of Mechanical Sciences* 84, 2014, pp. 182-188.
- [14] P Bereczki, V Szombathelyi and G Krallics, „Production of ultrafine grained aluminum by cyclic severe plastic deformation at ambient temperature”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 63(012140), 2014
- [15] P. Bereczki, G. Krallics, J. B. Renkó, „The effect of strain rate under multiple forging on the mechanical and microstructural properties”, *Procedia Manufacturing* 37, 2019, pp. 253-260