

CuE réz többtengelyű kovácsolásának szimulációja

Simulation of CuE Copper Alloy in a Closed-Die Multi-Axial Forging Tool

Bíró Tamás,¹ Juhász Zsombor,² Renkó József Bálint³

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, biro.tamas@edu.bme.hu

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, juhasz.zsombor@edu.bme.hu

³ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, renko.jozsef@edu.bme.hu

Abstract

Two-way multi-axial forging was performed on a newly designed closed-die forging tool. The tool was operated on an MTS 810 material testing system. The connected computer recorded force and cross-head displacement as a function of time during operation. The sample material of the four-step forging experiment was CuE copper alloy. The plastic deformation was 0.8 per step, thus the rate of cumulative equivalent plastic strain was 3.2 by the end of the process. The speed of movement of the active tools during the whole test was 2 mm/min. Finite element simulation was performed with QForm3D software to investigate the force conditions of the process. The necessary flow curve was determined by Watts-Ford test. The force-displacement curves of the physical simulation were compared with the results of the finite element modelling.

Keywords: multi-axial forging, finite element modeling, Watts-Ford test.

Összefoglalás

Kétutas, többtengelyű kovácsolás megvalósítására és a lejártszódó mechanikai folyamatok vizsgálatára egy új tervezésű, zárt üregű, multiaxiális zömítőszerszám készült. A szerszám működtetése MTS 810 típusú anyagvizsgáló berendezéssel történt, amely az alakítási erőt és a keresztfej elmozdulását rögzítette az idő függvényében. A négy alakítási lépésből álló kísérlet alapanyaga lágyított állapotú CuE réz volt. A logaritmikusan alakváltozás mértéke lépésenként 0,8 volt, így a kumulált, egyenértékű alakváltozás a folyamat végére 3,2-re adódott. Az aktív szerszámok mozgási sebessége a teljes vizsgálat alatt 2 mm/min volt. A folyamat erőviszonyainak vizsgálatára végeeselemes szimuláció készült QForm3D szoftverrel, amelyhez a szükséges folyásgörbe felvétele Watts–Ford-méréssel történt.

Kulcsszavak: többtengelyű kovácsolás, végeeselemes modell, Watts–Ford-vizsgálat.

1. Bevezetés

Az elmúlt években az ultrafinom- és nanoszemcsés anyagok témaköre az anyagtudomány igen népszerű és kutatott területévé nőtte ki magát [1]. Mindez a durvaszemcsés anyagokkal szemben felmutatott kedvezőbb mechanikai tulajdonságainak köszönhető, amely a megnövelt szilárdságban, nagyobb kifáradási határban, szívósságban,

valamint a szuperképlékeny-alakíthatóságban nyilvánulhat meg [2–3]. Ilyen anyagok előállítására több lehetőség is adott [4–6]. Azokat a gyártási eljárásokat, amelyek jelentős nyíró igénybevétellel járnak, intenzív képlékenyalakító (IKA) eljárásoknak nevezzük [7–9]. Az IKA egyik legkönnyebben szerszámozható változata a többtengelyű kovácsolás [10–11].

Munkánk előzményeként a kétutas, többtengelyű kovácsolással előállítható anyagok mechanikai tulajdonságainak vizsgálatára egy új tervezésű, zárt alakítóüregű szerszám készült. Célunk kettős volt. Elsőként lágyított állapotú réz alanyon akartuk megvizsgálni az új szerszámmal megvalósított, néglépéses alakítás terheléstörténetét, annak lefolyását az elmozdulás függvényében. Ezt követően végeeselemes modellezéssel rekonstruálni akartuk a korábban megvalósított fizikai szimulációt, majd megvizsgálni, hogy annak eredményei milyen mértékben vehetők össze a valós alakítások során tapasztaltakkal.

2. Kísérletek

2.1. A vizsgált anyag

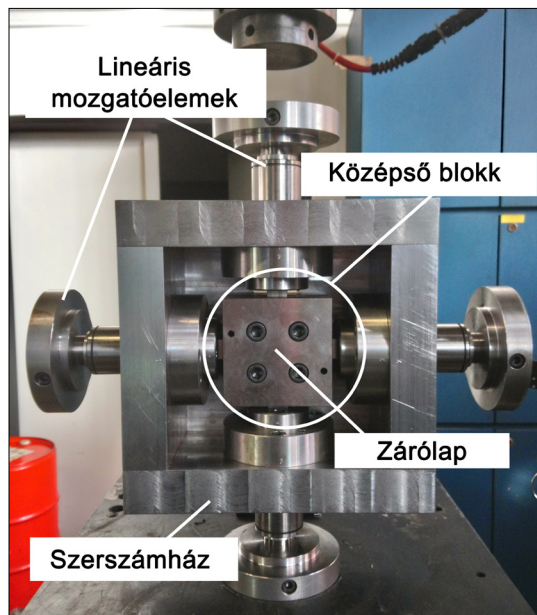
Annak érdekében, hogy az újonnan elkészült szerszám igénybevétele jól kontrollálható szinten tudjuk tartani, a vizsgálatokhoz választott próbatest anyaga ipari tisztaságú réz volt. A CuE anyagminőség kémiai összetételében az EDAX Z2 típusú SEM-EDS rendszer nem tudott számottevő mennyiségű szennyezőt kimutatni.

A $10 \times 10 \times 20$ mm befoglaló méretű próbatestek tömbi anyagból forgácsolással készültek. Az anyag ezt követően lágyító hőkezelésen esett át, így szüntetve meg az öregedésnek, valamint a vizsgálatokat megelőző, számunkra ismeretlen mértékű alakítástörténetnek a hatását [12]. Lágyításhoz a próbatesteket 950 °C-ra előmelegített kemencébe raktuk, majd 15 perc hõn tartást követően a darabokat vízben hûtöttük, így biztosítva a szükséges lehülési sebességet.

2.2. Az alakítószerszám

A fizikai szimulációkhoz használt szerszám, az 1. ábrán látható módon, három részből épül fel. Az első részegység a középső blokk. Ebben található az oldalfalakkal lezárt alakítóüreg, ahol a többtengelyű kovácsolás megvalósul. A második egység a szerszámház, amely keretbe foglalja a többi részegységet, valamint biztosítja az egyes alkatrészek egymáshoz viszonyított helyzetét.

A szerszám harmadik részegységét a lineáris mozgatóelemek képezik, amelyek az alakításhoz szükséges szerszámmozgásokat biztosítják. Az idetartozó négy, önálló mozgásra is képes belyeget a szerszámház úgy kapcsolja össze, hogy az egymással szemben elhelyezkedők mindig együtt mozogjanak, de maximális elmozdulásuk legfeljebb 5-5 mm legyen. Egy alakítási lépés alatt tehát 10 mm a próbatest összenyomódása.



1. ábra. A zárt üregű, többtengelyű kovácsszerszám általános felépítése és főbb részei

A szerszámmozgás megvalósítására és az idő-elmozdulás-erő adatpárok rögzítésére MTS 810 típusú anyagvizsgáló berendezést használtunk. A gép maximális mérés határa 250 kN. Az alakítás során a keresztfej elmozdulási sebessége 4 mm/min volt, így az egyes szerszámok mozgási sebessége 2 mm/min-re adódott.

Mivel a súrlódás csökkentésével a szerszámokat érő terhelés is csökkenni fog, a munkadarab és a szerszámüreg megfelelő kenése elengedhetetlen [13]. Az alakításban részt vevő felületek a vizsgálat előtt cink-sztearát pasztával lettek bevonva. Az alakítóüreg zárt jellegéből következően a kenéshez, valamint a próbatest behelyezéséhez a zárólapot átmenetileg el kell távolítani, majd azt az alakítás előtt ismét rögzíteni kell.

Az alakítás végén a kiemelőtűskék beütésével a szerszám visszaáll kiindulási állapotába. A munkadarab geometriája ekkor megegyezik az eredetivel, ám az térben 90° -kal el van forgatva. A szerszám szimmetrikus kialakításából adódóan egy 90° -os forgatással a szerszám és a próbatest relatív helyzete az anyagvizsgáló berendezéshez képest visszaállítható a kezdeti állapotba, anélkül, hogy a szerszámüreget fel kellene nyitni. A szerszám elforgatása után a következő alakítási lépés következik, amelynek végén a kiemelőtűskéket beütve zárul egy alakítási ciklus.

2.3. Fizikai szimulációk

A mérések során két, egymást követő, kétutas alakítási ciklust valósítottunk meg a keresztfej elmozdulása és a kifejttet erő időbeni regisztrálása mellett. Ennek jellemző lépéseit a **2. ábra** szemlélteti.

Síkalakváltozást feltételezve a 10 mm-es próbatest összenyomódásával előidézett logaritmikus alakváltozás mértéke közelítőleg 0,80:

$$\varphi = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln\left(\frac{H}{h}\right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln\left(\frac{20}{10}\right) = 0,80, \quad (1)$$

ahol φ a logaritmikus alakváltozás, H a munkadarab kiindulási magassága, h pedig a munkadarab alakítás végén mért magassága [14].

A kumulált, egyenértékű, logaritmikus alakváltozást (φ_{kum}) ennek megfelelően az alakítási lépésekhez tartozó logaritmikus alakváltozások összegeként lehet számítani (2). A jelen tanulmányban vizsgált, 4 lépésből álló alakításnál ennek értéke 3,2-re adódik.

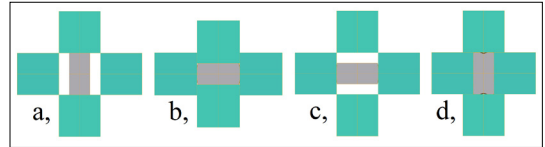
$$\varphi_{kum} = 4 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln\left(\frac{20}{10}\right) = 3,2 \quad (2)$$

2.4. Végeselemes modellezés

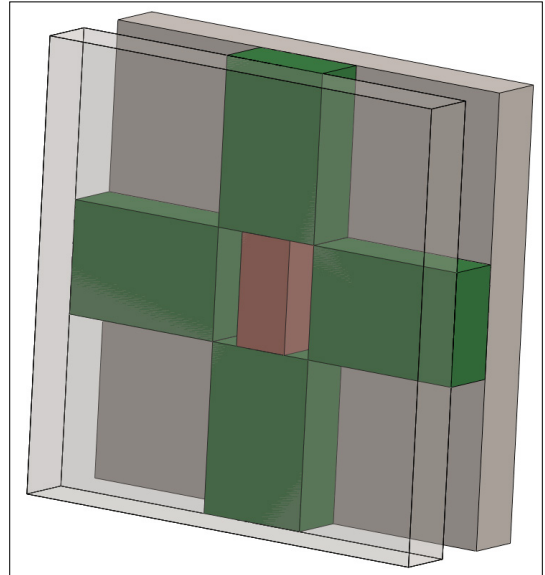
A többtengelyű kovácsolás során lejátszódó alakváltozási folyamatok reprodukálására végeselemes modell készült. A végeselemes modellezéshez QForm3D szoftvert használtunk, amelyben az alakítás pontosabb nyomon követhetőségének érdekében háromdimenziós modellt alkalmaztunk. A modellben a geometriához a szerszám és a munkadarab névleges méreteit, a szerszámmozgásokhoz pedig a fizikai szimulációkban mért elmozdulás-ideő adatsort használtuk. A szerszám elrendezéséből és a szerszámmozgások szimmetriájából adódóan elegendő nyolcadmodellt használni, amivel csökkenthető a maximális elemszám, ebből következően pedig a szükséges számítási kapacitás is [15]. Az összeállított modellt a **3. ábrán** látható.

A végeselemes hálót a szoftver az előzetes beállításoknak megfelelően automatikusan hozza létre, amit minden lépésben újragenerál. A próbatest és a szerszám kontaktzónájában hálófinomítást alkalmaztunk. A szimuláció során tetraéderelemeket használtunk, amelyek száma a kezdeti hálózaskor 29 069-ra adódott. A szimuláció végére a folyamatos hálófinomítás következtében ez 33 748-ra növekedett.

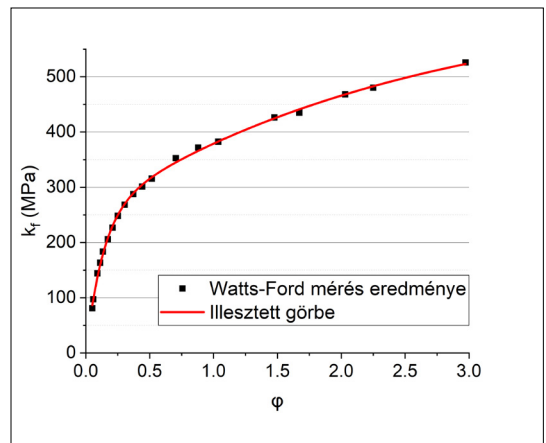
A számításokban használt folyásgörbét Watts-Ford-méréssel határoztuk meg, amit a munkadarabbal megegyező körülmények között előkészített próbatesten végeztünk [16]. Fontos kiemelni,



2. ábra. Egy alakítási ciklus sematikus ábrája a munkadarab (szürke) relatív helyzetét megtartva. Kiinduló helyzet (a), az első alakítás végállapota (b), az alaphelyzet ismételt felvétele (c), második alakítás végállapota (d)



3. ábra. A szimulációban használt háromdimenziós modellek



4. ábra. A Watts-Ford-mérés eredménye, valamint az adatsorra illesztett, majd a végeselemes modellben használt folyásgörbe

hogy itt a maximálisan megvalósított logaritmus alakváltozás mértéke 2,97 volt, így az ezen túli feszültség–alakváltozás értékpárokat a program az illesztett görbe alapján állította elő (4. ábra).

3. Eredmények és kiértékelésük

A fizikai szimuláció során mért terhelőerő–változást az elmozdulás függvényében az 5. ábra mutatja.

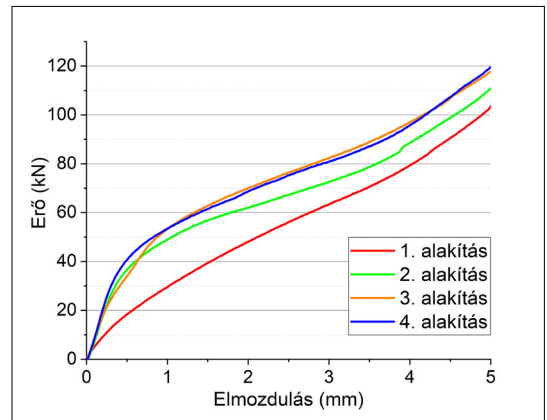
Az egyes alakítási lépéseken belül az erő monoton növekedett, az egyes alakítási lépések erőigénye pedig az alakítási lépések számával nőtt. Az első három lépés végén a lágyított állapotú réz munkadarab alakításakor mért terhelés növekedése közel azonos, 10 kN értékű volt. Ezt követően az erőnövekmény lecsökkent, a negyedik lépéshez már nem volt szükséges számottevően nagyobb terhelőerő. A lágyított állapotú réz diszlokációsűrűsége feltételezhetően a harmadik alakítási lépést követően már nem nő olyan mértékben, hogy az a terhelőerő, így az alakításhoz szükséges feszültség, jelentős növekedését okozza [17].

A végeelemes modell erő–elmozdulás görbéi hasonló tendenciát mutatnak a fizikai szimuláció eredményeivel (6. ábra).

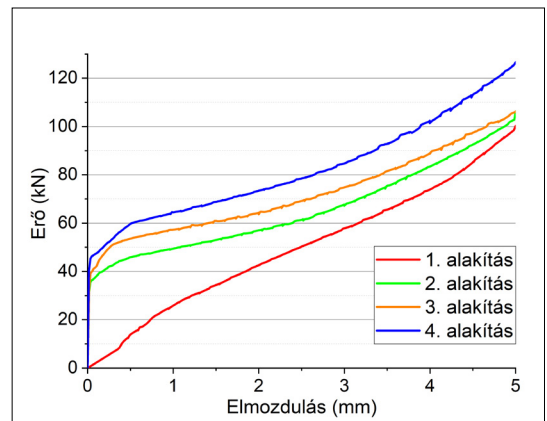
Az alakítási lépések előrehaladtával a terhelőerő itt is lépésről lépésre nő, továbbá adott lépésen belül tartja monoton növekvő jellegét. A fizikai szimulációval ellentétben az első három lépésnél a terhelőerő növekménye az alakítás végére körülbelül 5 kN. A negyedik alakítási lépés végére az alakítóerő drasztikus emelkedésnek indul. Ennek oka, hogy a Watts–Ford-vizsgálattal felvett görbét nem a teljes vizsgálati tartományon mértük; az utolsó lépés második felében az illesztett görbe feltehetően meredekebben emelkedett tovább a valóságnál.

A fizikai és végeelemes szimulációk görbéit egymásra illesztve a fizikai szimuláció görbéi adott alakítási lépésen belül kicsivel a végeelemes szimuláció görbéi alatt helyezkednek el (7. ábra).

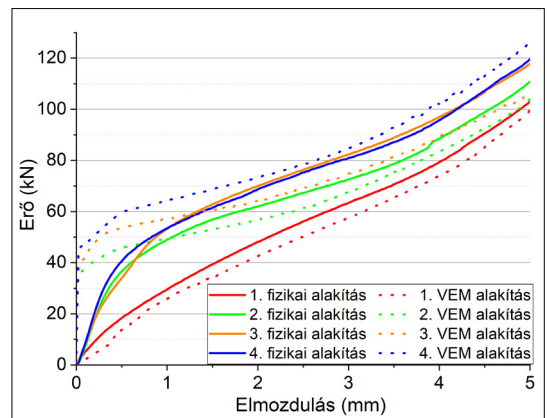
E tendencia alól képez kivételt a negyedik alakításhoz tartozó görbe, ahol a végeelemes modellel kapott erőértékek drasztikusan megugranak. Ez több okra is visszavezethető. Egyrészt feltételezhető, hogy a választott anyagmodell illesztőgörbéje nem lapul le olyan mértékben a vizsgált alakváltozási tartomány elhagyása után, mint az a valóságban történne. Másrészt az eltérés a próbatest anyagának alakítástörténetével is összefüggésben lehet. A vizsgálatokat ugyanis lágyító hőkezelés előzte meg, így az anyag alakváltozása



5. ábra. A fizikai szimulációval meghatározott erő–elmozdulás görbék



6. ábra. A végeelemes modellel meghatározott erő–elmozdulás görbék



7. ábra. A fizikai és végeelemes szimulációkkal meghatározott erő–elmozdulás görbék összehasonlítása

közel izotrop állapotból indulhatott, és a kovácso-
lás során alakulhatott át anizotrop szerkezetűvé.
Ennek a makroszintű tulajdonságokra gyakorolt
hatása feltehetően a harmadik és negyedik alakítási
lépésnél érte el azt a mértéket, hogy az detek-
tálható legyen.

4. Következtetések

A többtengelyű kovácsozás vizsgálatára elké-
szült új, zárt üregű szerszámmal sikeres mérése-
ket valósítottunk meg. A vizsgált négy alakítási lé-
pést az alakítóüreg felnyitása nélkül valósítottuk
meg úgy, hogy az egyes lépések után a szerszámot
90°-kal elforgattuk. A kapott erő–elmozdulás gör-
béket vizsgálva látható, hogy a lágyított állapotú
réz alakításához a terhelőerő lépésről lépésre
nőtt. Ezeket a karakterisztikákat a folyamatról
készült végeelemes modell is alátámasztotta.
A végeelemes modell eltéréseit, főleg a negye-
dik alakítási lépés során tapasztaltakat, a fizikai
szimuláció és a Watts–Ford-mérés vizsgálati tar-
tományainak különbsége okozta. A végeelemes
modell jól közelítette a valóságot, ám az ered-
mény pontosságának javításához az alkalmazott
anyagmodell finomítására van szükség.

Köszönetnyilvánítás

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-
21-2-I-BME-218. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság
Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és In-
novációs Alapból finanszírozott szakmai támogatá-
sával készült.

Az eredmények közzétételéhez anyagi hozzájárulást
nyújtott a Gépészmérnök-képzésért Alapítvány.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Huang Y., Langdon T. G.: *Advances in ultrafine-grained materials*. Materials Today, 16/3. (2013) 85–93.
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.03.004>
- [2] Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V.: *Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation*. Progress in Materials Science, 45. (2000) 103–189.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9)
- [3] Langdon T. G.: *The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing*. Materials Science and Engineering A, 462. (2007) 3–11.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.473>
- [4] Segal V. M., Reznikov V. I., Drobyshchik A. E., Kopylov V. I.: *Plastic Working of Metals by Simple Shear*. Russian Metallurgy, 1. (1981) 99–105.
- [5] Toth L. S., Vu V. Q., Dhinwal S. S., Zhao Y., Massion R., Chen C., Davis C. F., Lowe T. C.: *The mechanics of High Pressure Compressive Shearing with application to ARMCO® steel*. Materials Characterization, 154. (2019) 127–137.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.05.039>
- [6] Szabó P. J., Bereczki P., Verő B.: *The Effect of Multi-axial Forging on the Grain Refinement of Low Alloyed Steel*. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 55/1. (2011) 63–66.
<https://doi.org/10.3311/pp.me.2011-1.09>
- [7] Huang Y., Langdon T. G.: *Advances in ultrafine-grained materials*. Materials Today, 16/3. (2013) 85–93.
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.03.004>
- [8] Jin X., Chena S., Rong L.: *Microstructure modification and mechanical property improvement of reduced activation ferritic/martensitic steel by severe plastic deformation*. Materials Science & Engineering A, 712. (2018) 97–107.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.095>
- [9] Sadasivan N., Balasubramanian M.: *Severe plastic deformation of tubular materials – Process methodology and its influence on mechanical properties – A review*. Materials Today: Proceedings, 46. (2021) 3460–3468.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.859>
- [10] Trivedi P., Nune K. C., Misra R. D. K., Goel S., Jayganthan R., Srinivasan A.: *Grain refinement to submicron regime in multiaxial forged Mg-2Zn2Gd alloy and relationship to mechanical properties*. Material Science and Engineering: A, 668. (2016) 59–65.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.05.050>
- [11] Naser T. S. B., Krállics G.: *The effect of multiple forging and cold rolling on bending and tensile behavior of Al 7075 alloy*. Materials Science Forum, 729. (2012) 464–469.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.729.464>
- [12] Chen X., Zhao G., Xu X., Wang Y.: *Effects of heat treatment on the microstructure, texture and mechanical property anisotropy of extruded 2196 Al Cu Li alloy*. Journal of Alloys and Compounds, 862. (2021) 158102.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158102>
- [13] Wilson W. R. D.: *Friction and Lubrication in Bulk Metal-Forming Processes*. Journal of Applied Metalworking, 1. (1978) 7–19.
- [14] Valberg H. S.: *Applied Metal Forming*. Cambridge University Press, (2010) 53–76.
- [15] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L.: *The Finite Element Method. Solid Mechanics*. 5. kiadás. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000. 1–21.
- [16] Watts A.B., Ford H.: *On the Basic Yield Stress for a Metal*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 169/1. (1955) 1141–1156.
- [17] Shakhova I., Yanushkevich Z., Fedorova I., Belyakov A., Kaibyshev R.: *Grain refinement in a Cu Cr Zr alloy during multidirectional forging*. Material Science and Engineering, 606. (2014) 380–389.