

# Könyöksajtolással képlékenyen alakított nagy tisztaságú réz újrakristályosodása

## Recrystallization of severely plastically deformed high purity copper

Andrásfalvy Kristóf Péter, dr. Mucsi András

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai kar, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország  
[a.kristof93@gmail.com](mailto:a.kristof93@gmail.com), [mucsi.andras@bgk.uni-obuda.hu](mailto:mucsi.andras@bgk.uni-obuda.hu)

**Összefoglalás** — Nagytisztaságú réz anyag könyöksajtolását (Equal Channel Angular Pressing, ECAP) végeztük  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  és  $70^{\circ}\text{C}$  hőmérsékleteken. Az alkalmazott képlékeny alakító eljárás hatására az anyag mikroszerkezete nagymértékben torzult. Az intenzíven alakított réz minták újrakristályosodását teljesítménykompenzációs differenciális pásztázó kaloriméterrel (DSC), alacsony,  $70^{\circ}\text{C}$  hőmérsékletű klímakamrás hőkezeléssel, valamint  $180^{\circ}\text{C}$ -os kemencés lágyítással vizsgáltuk. A DSC mérések során választott hevítési sebességek 10, 20, 30 és  $40^{\circ}\text{C}/\text{perc}$  voltak, a minták pedig  $50\text{-}400^{\circ}\text{C}$  tartományban lettek hevítve. Az alakítási hőmérsékletek mind hidegalakításra utalnak, de a kísérlet eredményeiből arra következtethetünk, hogy az újrakristályosodás mechanizmusa nagymértékben változhat a  $+25 \pm 45^{\circ}\text{C}$ -os alakítási hőmérséklet tartományban is.

**Kulcsszavak:** réz, ECAP, újrakristályosodás, DSC, hőkezelés

**Abstract** — High purity copper was severely plastically deformed by Equal Channel Angular Pressing at  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  and  $70^{\circ}\text{C}$  temperatures. The applied process resulted in an extremely distorted microstructure. Samples taken from the severely deformed copper rods were subjected to Differential Scanning Calorimetry analysis, low temperature annealing in climate test chamber at  $70^{\circ}\text{C}$  and annealing in furnace at  $180^{\circ}\text{C}$ . During the DSC tests the chosen heating speeds were 10, 20, 30 and  $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , and the samples were heated in  $50\text{-}400^{\circ}\text{C}$  temperature interval. The initially used temperatures during plastic deformation imply cold working conditions yet the experiments show that the recrystallization mechanism can change significantly, even at  $+25 \pm 45^{\circ}\text{C}$  working temperatures.

**Keywords:** copper, ECAP, recrystallization, DSC, heat treatment

### 1 BEVEZETÉS

Az intenzív képlékeny hidegalakító eljárások kiváló eszközei az adott fém szemcseszerkezetének finomítására. Ilyen eljárás a könyöksajtolás is. A képlékeny alakítás következtében az eltorzult mikroszerkezetben megnő a diszlokációsűrűség és az alakításkor beközölt energia egy része eltárolódik az anyagban, ami megfelelő hőmérsékleten, újrakristályosodás esetén felszabadul. A kísérlethez 10 mm átmérőjű nagytisztaságú rézrúdból daraboltunk 60 mm hosszú próbatesteket amelyeket először különböző hőmérsékleteken könyöksajtolunk, majd kemencés, klímakamrás illetve DSC berendezésben

elvégzett lágyítás során elemeztük az újrakristályosodását. A rendelkezésre álló DSC berendezés lehetőséget adott az exotermikus csúcsok, felszabaduló energiamennyiség és hevítési sebesség közötti összefüggések feltárására.

### 2 ANYAG ÉS MÓDSZER

Fémek esetén az anyag abszolút olvadáspontjához képest alacsony hőmérsékleten végzett képlékeny alakítás több területen is megváltoztatja a fémek tulajdonságait. Fizikai tulajdonságait tekintve csökkenhet elektromos-, vagy hővezetőképessége vagy korrózióálló képessége, mechanikai szempontból a szilárdság nő, az alakíthatóság kárára. A tulajdonságbéli változások függenek az alakítás mértékétől és a hőmérséklettől, amelyen az alakítást végzik.

Az alakító erő hatására a szemcsék szerkezete torzul és a nagy mennyiségben létrejövő új vakanciák valamint diszlokációk megnövelik a diszlokációsűrűséget. A magas diszlokációsűrűség miatt a diszlokációk egy idő után egymás mozgását akadályozzák, ez pedig keményedést eredményez, amely nem mindig kívánt állapot, mivel az anyagban törés is létrejöhethet. A torzult kristályrácsban az atomok egymáshoz képest mért távolsága megváltozik, ami energiaszint különbséget eredményez, a változás mértékét pedig az alakítás nagysága határozza meg. A diszlokációk létrejötte és az atomok mozgása miatt a rendszer többletenergiához jut, ez ellentétes a fém céljával, ami a legkisebb energiájú, egyensúlyi állapot fenntartása. Ahhoz, hogy a korábbi állapot visszaállításáért felelős folyamatok elindulhassanak, hőt kell közölnünk a rendszerbe.

Megkülönböztetünk két mechanizmust, amelyek a visszaállításért felelősek. Az első a megújulás, mely során az eltárolt belső energia egy része felszabadul köszönhetően a mozgásba hozott diszlokációknak és megnövekedett diffúciónak. Hevítés során a diszlokációk mozognak, rendeződnek, szemcsén belül új határokat, úgynevezett szubhatárokat hoznak létre. A szubhatárokból további hőközléssel szubszemcsehatárok jönnek létre.

A második az újrakristályosodás és a gyakorlatban is a megújulást követi vagy párhuzamosan zajlik le vele. A megújulás végbe menése után indul meg a csíráképződés, mivel a szemcsék továbbra is relatív magas alakváltozási energia állapotban vannak és a rendszer törekszik az

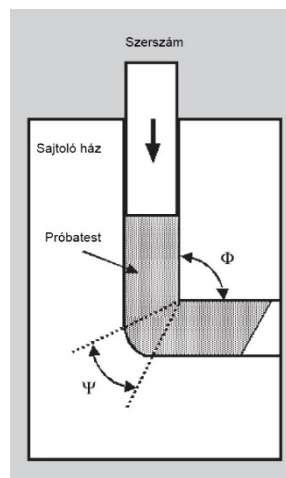
alacsonyabb energiájú, egyensúlyi állapot elérésére. Megfelelően magas hőmérsékleten a korábbi szubszemcsehatárokból új, feszültségmentes, egyforma nagyságú szemcsék alakulnak ki, melyek alacsony diszlokációsűrűséggel és alakítás előtti karakterisztikával rendelkeznek. Az újrakristályosodásnak köszönhetően a fém alakíthatóvá válik, de veszít szilárdságából.

Ahhoz, hogy az újrakristályosodás elkezdődjön az anyagnak megfelelően magas hőmérsékletre van szüksége, ez alatt a folyamat nem megy végbe, ezt nevezzük újrakristályosodási küszöbhőmérsékletnek. Az adott fém olvadáspontjának Kelvinben kifejezett értékének 0,4 része kiadja az általánosított küszöbértéket, valójában azonban a jelenlévő ötvöző vagy szennyező anyagok erősen befolyásolhatják azt. Az újrakristályosodási hőmérséklet fordított arányosságban áll a kritikus alakítási mértékkel, tehát minél alacsonyabb hővel kívánunk újrakristályosodást indítani, annál nagyobb (hideg)alakítást igényel a fém. Az újrakristályosodási hőmérséklet kihatással van az újonnan kialakuló szemcsék átlagos méretére is, minél alacsonyabb a hőmérséklet annál kisebb szemcseméret érhető el, a gyakorlatban pedig legtöbbször a finom szemcseszerkezet a kívánt cél a hőkezelés megfontolásakor. A teljes rekristallizáció utáni hőtartás szemcsedurvulást eredményez, és mivel a nagyobb szemcseméret a szilárdság és szívósság csökkenését eredményezi, az úgy nevezett szekunder újrakristályosodás kerülendő, a hőtartás idejének megválasztására figyelmet kell fordítani.

Az újonnan kialakuló szemcseméret befolyással van az anyag mechanikai és fizikai tulajdonságaira, viselkedésmódjára. Egyértelmű tehát, hogy a kívánt anyagminőség elérése a szemcseszerkezet megtervezésével kezdődhet, mégpedig legtöbbször a szemcseszerkezet nagyfokú finomításával. Az egyik megoldás a finom, vagy újabban „ultra finom szemcseszerkezet” (ultra fine grain, UFG) előállítására az „intenzív képlékeny alakítás” (SPD) elve. Mérnöki szempontból az alakítás módja SPD kategóriájába esik, ha az érintett ömlesztett és szilárd fém magas nyomásnak kitéve méreteiben kiemelkedő mértékben nem változik és képes a szemcseszerkezet jelentős finomítására. A legtöbb ismert nagyfokú képlékeny alakító eljárás kifejtésre került az Acta Metallurgica 1953-as számában, ezen kívül az itt taglalt kísérlethez kötődően Carreker és Hibbard [1] kimutatta, hogy a magas tisztaságú réz folyáshatár értékére nézve nagyon is előnyös a szemcseszerkezet finomodása és ez a pozitív hatás alacsony hőmérsékleteken még inkább érezhető [2]. Akkor nevezhetjük az anyagot UFG szerkezetű anyagnak, ha a polikristályok nagyon kis szemcséjű szerkezetet alkotnak, az átlagos szemcseméret 100-1000 nm közötti tartományba esik, vagy nano SPD alakító technológia (nSPD) alkalmazása esetén 100 nm alatti értéket is felvehet. Tömbi UFG anyagok esetén külön feltétel továbbá a nagyrészt homogén és egyenlő nagyságú mikroszerkezet, ahol a szemcsehatárok jelentős része nagyszögűnek tekinthető.

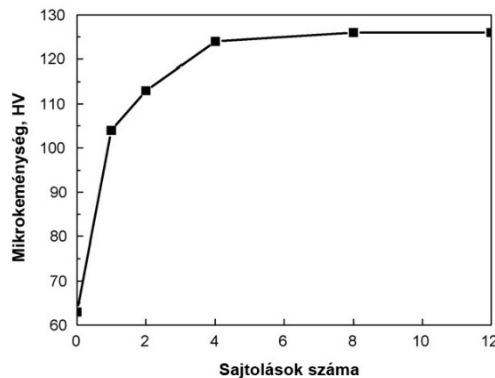
SPD eljárás esetén a szerszámgeometria megakadályozza az anyag szabad folyását így generálva a szükséges hidrosztatikus nyomást, ami elengedhetetlen a

nagyfokú alakváltozás eléréséhez és a sűrű rácshibák kialakulásához, ami nélkül nem következik be a kiemelkedő szemcsefinomodás [3].

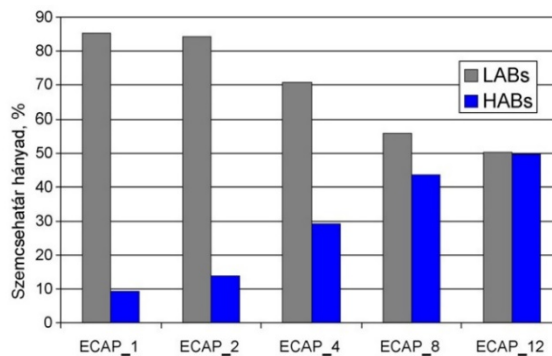


1. ábra: A könyöksajtóási eljárás [3]

Az ECAP (1. ábra), azaz a könyöksajtóási eljárás során egyszerű nyíró alakváltozást szenved el a fém hasáb, ahogy átréselődik az ún. fő nyírási síkon, ahol a két csatorna találkozik [4]. Különböző szögű csatornátalálkozásnál más és más szemcseszerkezet érhető el, ezen kívül többszöri sajtolás esetén hasáb forgatása esetén is módosítani tudjuk a fém mikroszerkezetét és textúráját. A procedura általános laboratóriumi környezetben 10-20mm<sup>2</sup> keresztmetszetű hasábanyagok használatát támogatja [5].



2. ábra: Mikrokeménység változása [6]

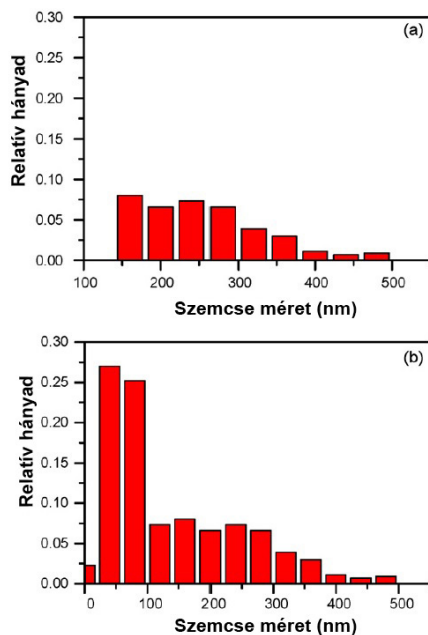


3. ábra: Szemcsehatárok arányának változása [6]

Az alkalmazott nyomások száma jelentősen befolyásolja az anyag mikrokeménységét (2. ábra), bár a legnagyobb keménységnövekedést egyértelműen az első alkalom során nyeri el, továbbá módosítja a jellemző szemcsehatár típusok arányait a szerkezetben (3. ábra), valamint a szemcsék méretét (4. ábra). Határok, melyek  $15^\circ$ -nál kisebb elfordulást mutatnak, kisszögű szemcsehatároknak (LAB),  $15^\circ$ -nál nagyobbakat pedig nagyszögű szemcsehatároknak (HAB) nevezzük.

Az ECAP hozzásegít a nagy tisztaságú réz felkeményedéséhez, de sokat veszít az alakíthatóságából. Megoldások az alakíthatóság javítására, a keménység mérsékelt csökkenése mellett különböző hőkezelések lehetnek, többek között alacsony hőmérsékletű lágyítás vagy részleges rekrisztallizáció, amelyek segítségével elérhető a kívánt bimodális mikroszerkezet.

A különböző hőmérsékleten könyöksajtolt réz anyagokból mintát véve feltérképezhetjük az anyag belső szerkezetét, többek között a képlékeny alakítás során bent rekedt energiát, mindezt a termoanalízis segítségével. Ezekre a kérdésekre a pásztázó differenciálkalorimetria adhat választ (DSC). A DSC a dinamikus kaloriméterek csoportjába tartozik. Az említett eszközök ideális megoldást nyújtanak különböző anyagokban lejátszódó hőeffektussal járó folyamatok vizsgálatára. Az eszközökben két mintatartó található. Az egyik, gyakran üresen hagyott, referencia, a másikba pedig a mérendő minta helyezhető. A vizsgálat alatt, hevítésből kifolyólag a két minta hőmérséklete lineárisan növekszik az idővel. A számítógépről vezérelt műszer folyamatosan méri a minták hőmérsékletét, így, ha a mérendő mintában hőelnyelés vagy hőleadás megy végbe, az azonnal láthatóvá válik a grafikonon. A grafikon csúcsaiból következtethetünk az átalakulások jellegére és a vele kapcsolatos paraméterek értékeire [7].



4. ábra: Szemcse méret változása és eloszlása [8]

Megkülönböztetünk két típusú dinamikus kalorimétert, a teljesítménykompenzációs DSC (power compensated Differential Scanning Calorimeter) és hőfluxus DSC (heat flow Differential Scanning Calorimeter) eszközöket. A hőfluxus DSC esetében a kimenőjel a vizsgált-minta és referencia-minta hőmérséklet különbsége, mert azonos energia közlésével hevítik mindkét mintatartót. A teljesítménykompenzációs DSC esetében viszont a két minta mindig ugyanolyan hőmérsékleten van tartva, így nem alakul ki hőmérséklet különbség. Itt az egységnyi idő alatt bevitt hőenergia különbséget méri a berendezés.

Kísérletünk során a nagy tisztaságú vörösréz anyagot különböző hőmérsékleteken könyöksajtoltuk,  $-20^\circ\text{C}$ ,  $+25^\circ\text{C}$  és  $+70^\circ\text{C}$  hőmérsékleten más és más mikroszerkezetű, 60 mm hosszúságú felkeményedett vörösréz rúdanyagokat eredményezve. Az alkalmazott képlékeny alakító ECAP eljárás paraméterei a következők voltak:  $110^\circ$  könyökszög, 10 mm átmérőjű keresztmetszet. A könyöksajtóláskor generált analóg erő-idő diagramokat GetData nevű program segítségével digitalizáltuk. A könyöksajtolt darabokat hagyományos esztergán hosszsztergáltuk és leszúrtuk kb. 5,9 mm átmérőjű 1-2 mm vastagságú pogácsákra. A pogácsákat jelölés és felületiszólás után Vickers keménységtesztnek vetettük alá Zwick 3212 mikroszkópos keménységmérő műszer segítségével.

A különböző hőmérsékleten könyöksajtolt rézrudakból készített pogácsákat DSC mérésnek vetettük alá. A rendelkezésre álló eszköz a PerkinElmer DSC8000 teljesítménykompenzációs kaloriméter volt. A DSC mérések célja a rekrisztallizációs hőmérséklet, átalakulások aktivációs energiája és az átalakuláskor felszabaduló energiamennyiség megállapítása volt. A minták  $50^\circ\text{C}$ -ra előre felfűtött kemencékben  $400^\circ\text{C}$ -ig lettek hevítve 10, 20, 30 és  $40^\circ\text{C}/\text{min}$  fűtési sebességeken,  $100^\circ\text{C}/\text{min}$  végső hűtéssel. A DSC mérések után a Pyris programból exportált adatokat Microsoft Excel és Fejes Gergő Richárd által fejlesztett MatLab szkriptek [9] igénybevételevel rendszereztük és ábrázoltuk diagramok segítségével.

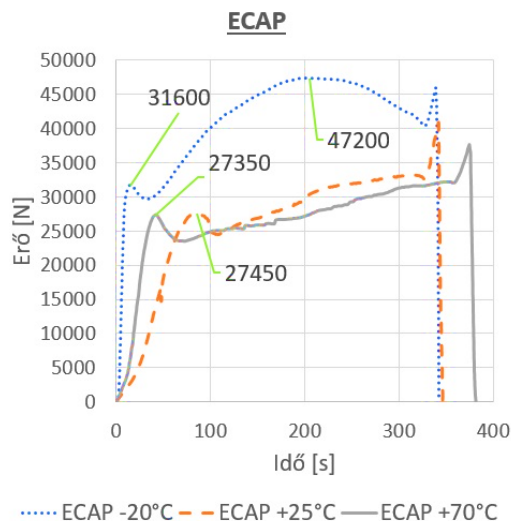
A sajtolt rudakból kinyert pogácsákat  $+70^\circ\text{C}$ -os hosszútávú klímakamrás hőkezelésnek és  $180^\circ\text{C}$ -ra fűtött, kemencés lágyításnak is alávetettük. A rendelkezésre álló berendezések Angelantoni SU16T klímakamra és Kalória Hőtechnikai Kft. által gyártott ellenállás fűtésű laborkemence volt.

### 3 EREDMÉNYEK

A könyöksajtoló eljárás során analóg erő-diagramot digitalizáltuk. A GetData szoftverrel kijelöltük az origót manuálisan és beállítottuk a szükséges koordináta-rendszert. Ezek után nagy sűrűséggel felvettük a görbe pontjait, hogy pontosan követhessük az eredeti diagramot, majd a pontokat a koordináta rendszerben elhelyezve szöveges fájlba exportáltuk. A pontokból álló adathalmazt Excelben beolvasztattuk, rendszereztük és ábrázoltuk.

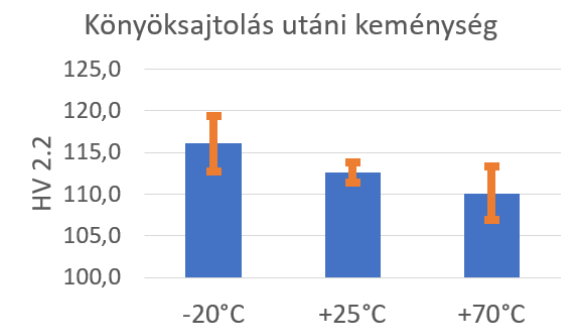
Az 5. ábrán látható, hogy jóval nagyobb erőre van szükség az anyag megfolyásához  $-20^\circ\text{C}$ -os alakítási hőmérsékleten. Az erő különbsége a  $+25^\circ\text{C}$  és  $+70^\circ\text{C}$ -hoz

képest közel 4kN. Ezen kívül a sajtoláskor fellépő maximális erő határozottan magasabb a -20°C-os próbatest esetén; 47kN míg a másik kettőre 32-33kN volt jellemző.



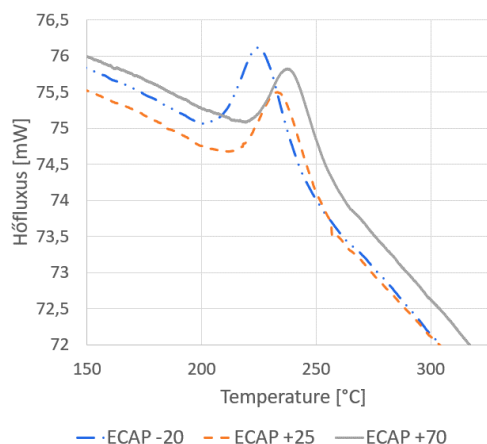
5. ábra: Könyöksajtolás erő-idő diagramja

A sajtolást követően, a kinyert mintákon keménységmérést végeztünk Vickers keménységmérő műszerrel (6. ábra). A legnagyobb keménységet a -20°C-on sajtoló darab érte el, átlagosan 116 HV 2.2 értékkel, a legalacsonyabbat pedig a 70°C-os darab mutatta 110 HV 2.2 értékkel. A 6. ábrán láthatók a mért keménységértékek szórása.



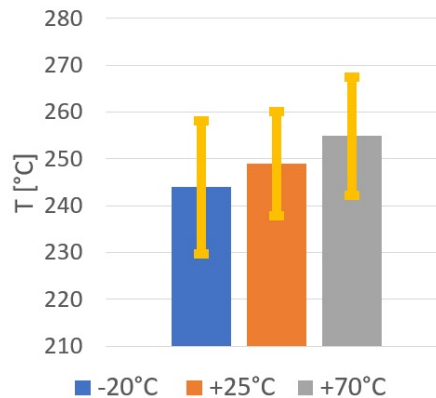
6. ábra: Könyöksajtoló minták keménysége

A hőfluxus – hőmérséklet diagramok adatait PerkinElmer cég Pyris DSC kontrolláló szoftvere generálta, a kapott adatokat pedig Excel segítségével dolgoztuk fel. A hevítési sebességtől függően kategorizált DSC mérések azt mutatják, hogy az alacsonyabb hőmérsékleten könyöksajtoló minták alacsonyabb hőmérsékleten kezdik el az újrakristályosodást és előbb is zajlik le a teljes tárolt hőenergia leadása. A -20°C-os minták az összes esetben vagy elsőként, vagy közel egyszerre kezdik meg az újrakristályosodást a +25°C-on sajtoló mintával. A 7. ábrán láthatók a DSC diagram hőfluxus értékei a különböző hőmérsékleten átsajtoló mintákhoz.



7. ábra: DSC mérés 10°C/perc hevítési sebességgel

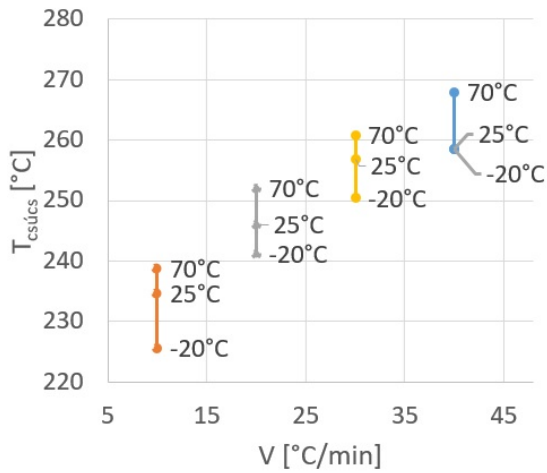
A 8-12. ábrákon látható diagramokhoz szükséges adatokat Fejes Gergő Richárd MatLab szkriptjének segítségével generáltuk, majd Excel segítségével ábrázoltuk őket.



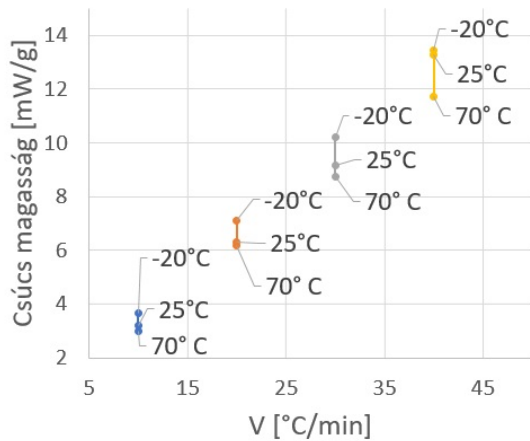
8. ábra: Átlagos csúcshőmérséklet

A csúcshőmérsékleteket átlagoltuk és szórással együtt ábrázoltuk a 8. ábrán. A legalacsonyabb újrakristályosodási hőmérsékleteket a -20°C-on sajtoló darabok képviselték, és bár a három különböző hőmérsékleten sajtoló minták szórása nagyságrendileg megegyezik, érdemes megemlíteni, hogy a -20°C-on sajtoló darabok mutatták a legnagyobb szórást. A csúcshőmérséklet-hevítési sebesség diagramon (9. ábra) jól látható, hogy a hevítési sebesség növelésével együtt növekszik a görbén található csúcsok csúcshőmérséklete, de a különbségek és tartományok egyre zsugorodnak magasabb és magasabb hevítési sebességek esetén, 40°C/perc esetén akár meg is egyezhetnek.

A csúcsmagasság – hevítési sebesség diagram (10. ábra) egyértelművé teszi, hogy magasabb hevítési sebességek alkalmazásakor sokkal hegyesebb csúcsot kapok az energia felszabadulásakor, bár ahogy a 11. ábrán látható, a két attribútum: eltárolt energia és hevítési sebesség között nem egyértelmű az arányosság.

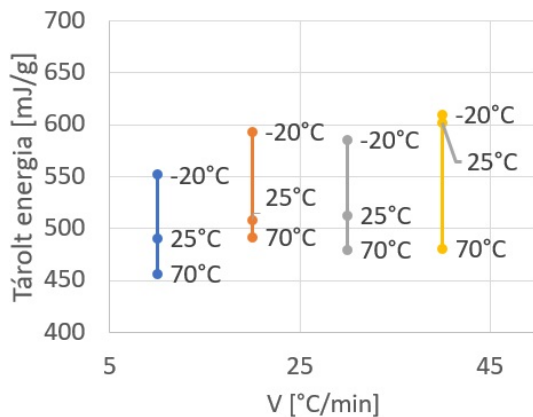


9. ábra: Csúshőmérséklet - hevítési sebesség diagram



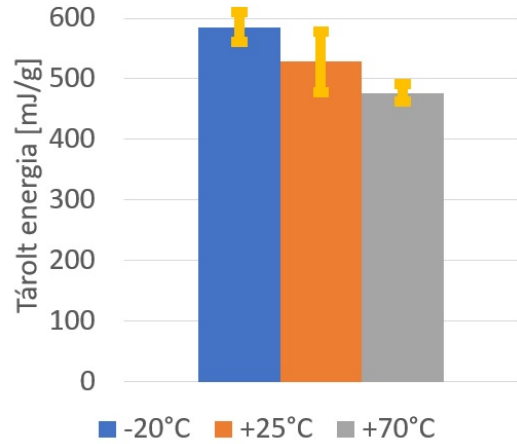
10. ábra: Csúsmagasság - hevítési sebesség diagram

Látható, hogy hevítési sebességtől függetlenül az alacsonyabb hőmérsékleten sajtolt anyag nagyobb mennyiségű energiát tárol el, bár 40°C/min hevítés sebesség alkalmazásakor már elenyésző volt a különbség -20°C és +25°C-on könnyűsajtolt minták felszabaduló energiáinak között.



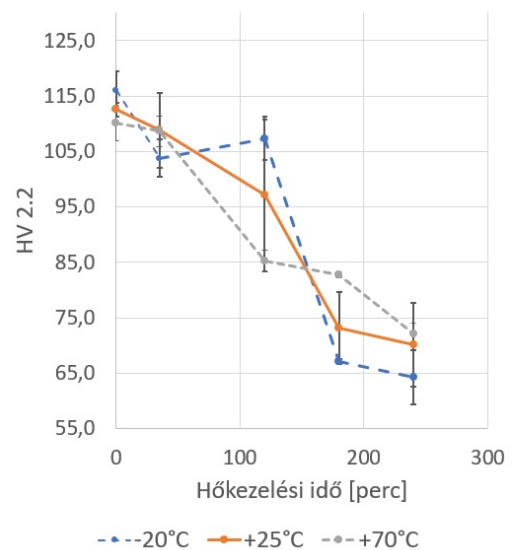
11. ábra: Tárolt energia - hevítési sebesség diagram

A tárolt energia értékeket átlagoltuk és szórással együtt ábrázoltuk a 12. ábrán. A különböző sajtolási hőmérsékletektől függően meglepően nagy eltérést mutatnak a diagramok. A -20°C-on sajtolt darabok a másik kettő típushoz képest mérve 10-22%-kal nagyobb átlagos tárolt energiát mutatnak.



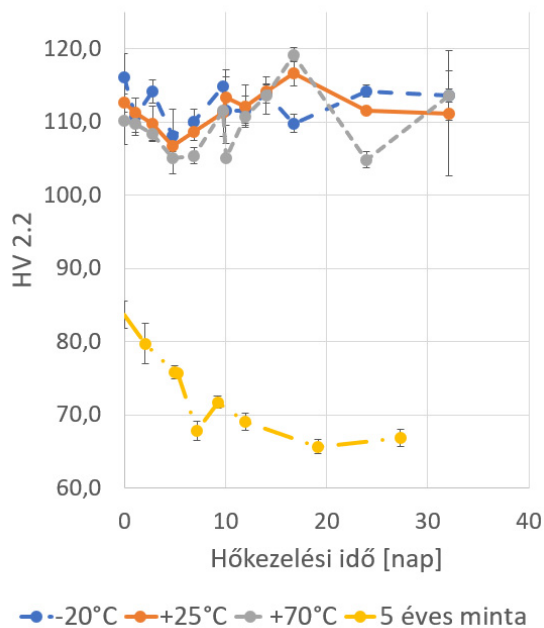
12. ábra: Átlagos tárolt energia

A különböző hőmérsékleteken sajtolt rudakból 1-1 pogácsát 180°C-os hőkezelő kemencébe helyeztünk és rövid időközönként keménységmérést végeztünk. A kapott görbe (13. ábra) nem nevezhető nagy pontosságúnak, mert a használt kemence magas hőmérsékletű hőkezelésekre volt optimalizálva, így a legtöbb esetben a kemence nyitásvisszazárását követően túlfűtött akár 190-191°C-ig és csak 15-20 percet követően állt vissza a kívánt 180°C-os hőmérsékletre. Ennek ellenére jól látható, hogy a hőkezelést elkezdve nagyon hamar lágyulást mutatnak a próbatestek és a -20°C-on könnyűsajtolt darab keménysége jelentősen esik 30 perc után mérve. A +25°C és -20°C-os darabok a legnagyobb változást 2 óra hőkezelési idő után produkálják, HV 97-ről HV 73-ra és HV 107-ről HV 67-re.



13. ábra: ~180°C-os hőkezelés

Mindhárom könyöksajtolt próbatestből kimunkáltunk egy-egy kb. 5,9 mm átmérőjű 1-2 mm vastag mintát, melyeket 70°C-os klímakamrába helyeztünk, és gyakori keménységmérésnek vetettük alá (14. ábra). A negyedik minta egy közel öt éve hidegen hengerelt, szintén nagy tisztaságú réz minta, eredetileg HV 128 keménységgel. Az elmúlt 5 évben szobahőmérsékleten HV 128-ról HV 84-re lágylt. A közel egy hónapos alacsony hőmérsékletű lágylási kísérlet során nem tapasztaltunk jelentős elváltozást a kísérlethez könyöksajtolt minták keménységében, valószínűleg hosszabb időre van szükség az érzékelhető lágylásig.



14. ábra: 70°C-os hőkezelés

#### 4 KÖVETKEZTETÉSEK, ÖSSZEGZÉS

A kísérletünk során könyöksajtolt nagy tisztaságú réz viselkedését vizsgáltuk újrakristályosító hőkezeléssel. A réz rudak 110°-os szerszámmal egyszeri könyöksajtolásnak lettek alávetve, így eredményezve a szükséges torz és kemény mikroszerkezetet. A könyöksajtolást három különböző hőmérsékleten végeztük, -20°C, +25°C és +70°C-on. A kapott felkeményedett rúdanyagokból kinyert, megadott méretre esztergált rézpogácsákat négy különböző hevítési sebességgel DSC mérés közben újrakristályosítottuk és újrakristályosodás során minta hőfelvételét és hőleadását rögzítettük.

Az adatokat a Pyris nevű DSC kontrolláló szoftver rögzítette, melyeket szöveges dokumentumként exportáltuk és Excel, valamint MatLab segítségével elemeztük.

Az eredményül kapott diagramok kiválóan szemléltetik az összefüggéseket. A minták átlagos keménységét tekintve a -20°C-on sajtolt 116±3 HV, a +25°C-on sajtolt 112±1 HV, a 70°C-on sajtolt darabok pedig 110±3 HV keménységet mutattak, így a leghidegebb hőmérsékleteken sajtolt rúd keménysége 3,5-5%-kal magasabb, mint a többi rúdaké. Látszik, hogy a legalacsonyabb (-20°C) hőmérsékleten véghez vitt könyöksajtolás, amely így

legnagyobb mértékben torzult mikroszerkezetet eredményezi, a legkorábban kezdi meg az újrakristályosodást. A 10°C/perc hevítési sebességű DSC adatokat kiemelve 226°C, 234°C és 239°C-on kristályosodtak újra a -20/+25/+70°C-on sajtolt minták, ezek szerint a -20°C-on sajtolt darab 3,5-5,7%-kal alacsonyabb újrakristályosodási hőmérsékletet mutatott. Hevítési sebesség szerint csoportosítva az adatokat, látjuk, hogy magasabb hevítési sebességeknél később kezdődik és zajlik le az újrakristályosodás, valamint magasabb hevítési sebesség alkalmazásakor jelentősen megnövekszik a hőleadáskor megfigyelhető csúcshőmérséklet. Ezen kívül pedig egyértelmű az is, hogy minél alacsonyabb hőmérsékleten végezzük a könyöksajtolási eljárást, annál nagyobb lesz a tárolt energia. Esetünkben a mintákban tárolt energiák különbsége átlagosan 10-22% között volt.


Az átlagos tárolt energiamennyiséget tekintve a -20°C-on sajtolt darab 585±24 mJ/g, a +25°C-on sajtolt 528±50 mJ/g, a +70°C-on sajtolt pedig csak 476±15 mJ/g energiamennyiséget mutatott, ezzel a -20°C-on sajtolt darabok átlagosan 10-22%-kal nagyobb mennyiségű energiát voltak képesek eltárolni.

A 180°C-ra fűtött kemencében a réz minták hamar lágylást mutattak és mindössze 4 óra alatt HV2.2~110-ról HV2.2~70-re csökkent a keménységük.

Az könyöksajtolt, 99,9%-os tisztaságú minták mikrokeménysége nem mutatott jelentős elváltozást a kb. 30 nap hosszú 70°C-os klímakamrában való lágylítás során. Ezzel ellentétben az öt éves, 99,997%-os tisztaságú minta már szobahőmérsékleten nagyfokú lágyláson ment keresztül az öt év alatt és a 70°C-os klímakamrás kezelésre is jól reagált. Meglátásunk szerint a réz próbatestek tisztasága szerepet játszik az újrakristályosodás mechanizmusában, ezért is jelentkezhetett hamar nagymértékű változás a 99,997%-os tisztaságú minták esetében.

Az eredmények arra engednek következtetni, hogy az alakváltozás mechanizmusa különböző az egyes sajtolási hőmérsékletek mellett, a rácshibasűrűség pedig kiemelten nagyobb a -20°C-on történő képlékeny alakításnál, amit a magasabb tárolt energiamennyiségek jeleznek. Továbbá érdemes megjegyezni, hogy a réz abszolút olvadási hőmérsékletét tekintve, az összes alkalmazott alakító hőmérséklet hidegalakító hőmérsékletnek, így hidegalakításnak tekinthető, mégis fontos különbséget tenni az egyes hőmérsékleteken létrehozható mikroszerkezetek között, mert nem csak a diszlokáció sűrűség, valamint a velejárolt energiamennyiség lesz különböző, hanem a keménység és az újrakristályosodási hőmérséklet is.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

 - A cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-2017-1-I. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Carreker, R. P., Hibbard, W. R. (1953). Tensile deformation of high-purity copper as a function of temperature, strain rate, and grain size. *Acta Metallurgica*, 1, 656.
- [2] Estrin, Y., & Vinogradov, A. (2013). Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science. *Acta Materialia*, 61(3), 782-817.
- [3] Valiev, R. Z. & Estrin, Y. & Horita, Z. & Langdon, T. G. & Zehetbauer, M. J. & Zhu, Y. T. (2006). Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *JOM*, 58(4), 33-39.
- [4] Segal, V. M. (1977). USSR Patent No. 575892
- [5] Estrin, Y. & Vinogradov, A. (2013). Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science. *Acta Materialia*, 61(3), 782-817.
- [6] Molodova, X. & Gottstein, G. & Winning, M & Hellmig, R. J. (2007). Thermal stability of ECAP processed pure copper. *Materials Science and Engineering A*, 460-461, 204-213.
- [7] <http://metal.elte.hu/~groma/publications/kalori.pdf> (2017.03.19)
- [8] Lugo, N. & Llorca, N. & Cabrera, J. M. & Horita, Z. (2008). Microstructures and mechanical properties of pure copper deformed by equal-channel angular pressing and high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A*, 477, 366-371.
- [9] Fejes, G. R. (2017). Könyöksajtolt réz próbatetek DSC vizsgálata, TDK dolgozat, ÓE-BGK