



Többtengelyű kovácsolással alakított rézminták mikrokeménységének vizsgálata

Investigation of Microhardness of Multiaxially Forged Copper Samples

Juhász Zsombor,¹ Renkó József Bálint²

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

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

Abstract

In engineering practice, high strength materials attract extraordinary attention. Such materials can be produced by many different methods, from which, multiaxial forging was selected. In this work a sum of four samples were compressed by two-directional multiaxial forging. The achieved logarithmic deformation in each step was 0.8 while the accumulative plastic strain of the workpieces were 0.8, 1.6, 2.4, and 3.2. The hardness of the samples was examined in 200 points of measurement on the surface of the mid-section of each to investigate hardening patterns.

Keywords: *severe plastic deformation, multiaxial forging, microstructural analysis.*

Összefoglalás

Mérnöki alkalmazásban kiemelt figyelmet kapnak a nagy szilárdságú anyagok. Ultrafinomszemcsés anyagok alkalmazásakor a nagy szilárdság kiegészül a durva szemcsés állapotot megközelítő szívóssággal. Ilyen anyagok előállítására több módszer is ismert, jelen munka az intenzív képlékenyalakítást megvalósító eljárások egyikét, az ún. többtengelyű kovácsolást tárgyalja. Kutatásunk során összesen négy próbatest alakítását végeztük el kétutas többtengelyű kovácsolással. Az egy lépésben megvalósított logaritmikus alakváltozás mértéke 0,8 volt, ezáltal a munkadarabok kumulált képlékeny alakváltozása rendre 0,8, 1,6, 2,4, és 3,2. Az ennek hatására fellépő keménységváltozásokat minden minta középső keresztmetszetén 200 mérési ponton keménységtérképekkel vizsgáltuk.

Kulcsszavak: *intenzív képlékenyalakítás, többtengelyű kovácsolás, keménységvizsgálat.*

1. Bevezetés

Az intenzív képlékenyalakítás (IKA) eljárásai a szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságainak, mint a szilárdság, szívósság és a kifáradás elleni ellenállás javítására kiemelten alkalmasak [1, 2]. Az IKA során a tömbi anyagban a nagymértékű képlékeny alakváltozás hatására a diszlokációsűrűség megnövekedésével a diszlokációk feltorlódása következik be, ezáltal nemegyensúlyi szemcsehatárok által körülvett tartományok alakulnak ki, amelyeket diszlokációs celláknak

nevezünk. Az így kialakuló szerkezet lehet nano-szerkezetű, illetve ultrafinomszemcsés (UFSZ) is. A kettő közötti egyik fő különbség, hogy előbbi esetén az egyes diszlokációs cellák között jelentkező orientációkülönbség legfeljebb néhány fokot ér el [3, 4]. UFSZ-szerkezet esetén már nagyszögű egyensúlyi szemcsehatárok által határolt szemcsékről beszélhetünk. Ezek kialakulása a diszlokációsűrűség növekedésével, a szemcsehatáron található diszlokációk egymást történő kioltása után következik be. Ezen túl méretbeli különbség

is megfigyelhető, hiszen a nanoszerkezetű tartományt 10–100 nm-en, míg az UFSZ-tartományt néhány száz nm nagyságtól 1 µm nagyságig értelmezzük [3, 5].

Az IKA eljárásaival célunk jellemzően az UFSZ-szerkezet kialakítása. Korábbi tanulmányok rámutattak, hogy az ilyen szerkezettel rendelkező anyagok a szemcseméret csökkenése által előidézett szilárdságnövekedés mellett az egyszerű, hidegen hengerelt alapanyaghoz képest jóval nagyobb alakváltozásra képesek [6, 7]. Azonos anyagminőség esetén ez akár meg is közelítheti a durva szemcsés állapot alakváltozó képességét, miközben szilárdsága akár többszörösen is meghaladhatja a hidegen hengerelt állapotét [7].

Az IKA több eljárást foglal magába, melyek közül jelen tanulmány a többtengelyű kovácsolással foglalkozik [8].

Korábbi munkák eredményeként egy többtengelyű kovácsolás megvalósítására, illetve UFSZ-szerkezet kialakítására alkalmas szerszám készült el [9]. E szerszámmal alakított próbatetek kisebb keresztmetszetén mikroszerkezeti vizsgálatok valósultak meg, melyek az UFSZ-szerkezet kialakítása mellett egy minden mintára jellemző karakterisztikát mutattak ki, miszerint a minta közepén egy vonalban (a nagyobb alakváltozás hatására) nagyobb keménység volt megfigyelhető, majd ettől a minták széle felé haladva a keménységnövekedés mértéke folyamatosan csökkent. Ez az eltérés a szerszám kialakítása miatt jelentkezett, ugyanis a kisebb alakváltozást szenvedett oldalak mentén a próbatest érintkezett a szerszámlapokkal, így a jó kenés ellenére is fellépő súrlódás gátolta az azonos mértékű alakváltozást [10].

Jelen kutatás során ugyanezen szerszám segítségével alakított próbatetek hosszmeteszetének vizsgálatát tűztük ki célul azonos alakváltozási spektrumon.

2. Kísérletterv

2.1. Vizsgált anyag és előkészítése

A kutatás során felhasznált anyag Cu99,9 anyagminőségű, ipari tisztaságú réz volt. Az anyag kiválasztása során szempont volt, hogy a vizsgálandó anyag korábbi kutatások miatt már rendelkezésre állt, valamint a szerszám méretezése is erre az anyagra történt, ezáltal a mérések során a szerszámot az alakítási keménység okozta, egyre növekvő ellenő nem fogja túlterhelni.

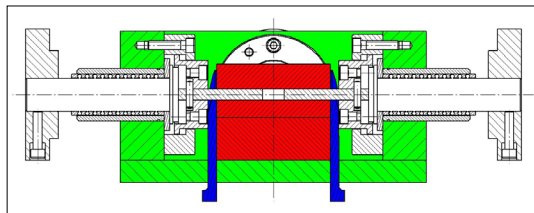
A választott anyagból 4 darab, hasáb alakú próbatestet készítettünk. Ezek befoglaló méretei 10×10×20 mm. Gyártásuk után a munkadarabok

lágító hőkezelésen estek át, amely során 950 °C-ra történő hevítést és 15 perc hőn tartást követően vízben edzettük.

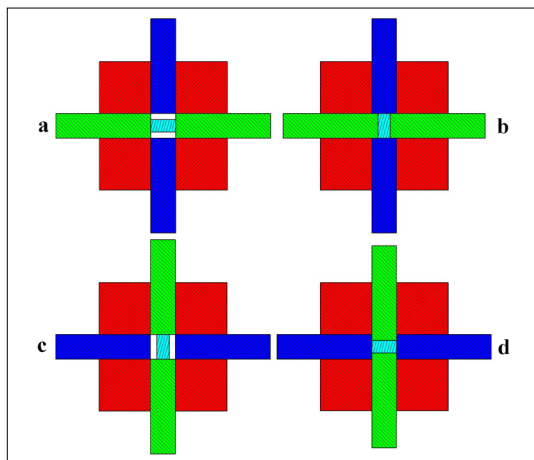
2.2. Alakítószerszám

A kísérletekhez felhasznált zárt üregű, többtengelyű kovácszserszám elvi vázlatát az 1. ábra mutatja. Az eszköz alapvetően három fő részre bontható. Ezek a középső blokk, a szerszámház és a lineáris mozgatóelemek. Az első a próbatest, illetve a bélyegek pozicionálásáért felelős, továbbá egy közdarabon keresztül kapcsolódik a szerszámházhoz. Utóbbi feladata, hogy stabil keretet képezzen a szerszám körül, valamint a szerszám mozgatóelemekben játszik elengedhetetlen szerepet. A lineáris mozgatóelemek fő feladata a bélyegek mozgása és a terhelőerő átvitele.

A szerszámmal történő alakítás a 2. ábrán látható módon valósul meg. Fontos már az elején meg-



1. ábra. Az alakítószerszám vázlata. Piros színnel a középső blokk, zöld színnel a szerszámház, kék színnel pedig a kilövő tüskék vannak jelölve. A színezetlen alkatrészek (a csavarok kivételével) a lineáris mozgatóelemek csoportját képezik



2. ábra. Egy alakítási ciklus bemutatása. A pirossal jelölt alkatrészek pozicionálják a bélyegeket, kék színnel az aktív, míg zöld színnel a passzív bélyegek vannak jelölve. A türkiz színű darab a próbatestet mutatja

jegyezni, hogy a két bélyegpárból mindig csak egy végez alakítást, a másik a reteszelvező kialakítás miatt helyhez rögzítve biztosítja a zárt szerszáműreget (2a. ábra). A lépés lezárásával (2b. ábra) a szerszám 90°-os elforgatását követően a kilökö ékek beütése következik (2c. ábra). Az ékek behelyezése után egy újabb alakítási lépés valósítható meg. Páros számú alakítási lépés zár egy alakítási ciklust (2d. ábra).

2.3. Alakítás és minta-előkészítés

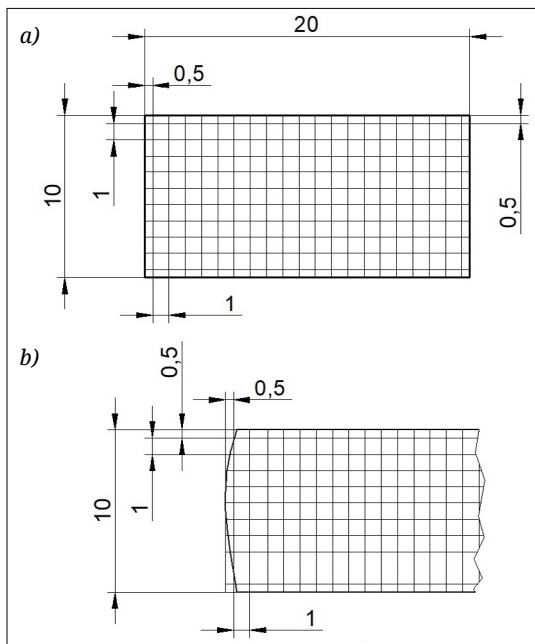
Az elkészült próbatetek alakítása a szerszámon keresztül egy MTS 810 típusú anyagvizsgáló berendezés segítségével történt. Ennek során összesen 4 darab próbatetst többtengelyű kovácsolása valósult meg. Az egyes munkadarabok rendre 0,5, 1, 1,5, illetve 2 alakítási cikluson estek át. A munkadarab geometriájából, valamint a szerszám kialakításából adódóan minden alakítási lépés 0,8 logaritmikus képlékeny alakváltozást realizált, így a kumulált képlékeny alakváltozás mértéke 0,8, 1,6, 2,4, illetve 3,2 volt.

Az alakított próbatetek metallográfiai vizsgálatokra való előkészítéseként először 10×20 mm-es keresztmetszetben, a zárólappal érintkező felületükkel párhuzamosan, középvonaluk mentén elvágtuk. A vágást követően csiszolásuk, illetve polírozásuk Struers Tegramin-30 típusú automata polírozógép segítségével valósult meg. Az utolsó polírozási lépés 1 µm-es gyémánt szuszpenzióval történt 10 N terhelőerő mellett 8 percig.

2.4. Mikrokeménység-mérés

Az alakított próbatetek előkészítését követően azok felületén 200 mérési pontban mikrokeménységmérést végeztünk: Vickers-keménységmérést 4,905 N terheléssel. A vizsgálatot kiegészítettük egy alakítatlan referenciamintával is, amelyen az izotrop szerkezet feltételezése miatt csak 40 mérési pontot vettünk fel. A mért pontok által kirajzolt mátrixot a 3. ábra mutatja. A mátrixok szélső pontjai a minták oldalától 0,5 mm-re helyezkednek el. Az ábra alapján megkülönböztethető az alakítatlan (a) és az alakított (b) mintákra felhelyezett mátrix. Utóbbi esetben a gyantában megvalósult méretek hibát jelentettek, azonban ezek keménységértékük miatt jól kivehetők, a kiértékelésből pedig kizárhatók voltak.

A mérések MCT típusú, programozható keménységmérő műszeren valósultak meg. A műszer az Oliver & Pharr (O&P) módszerrel [11] számolja a keménységértékeket a szűrőszerszám bemélyedése és a terhelés alapján.



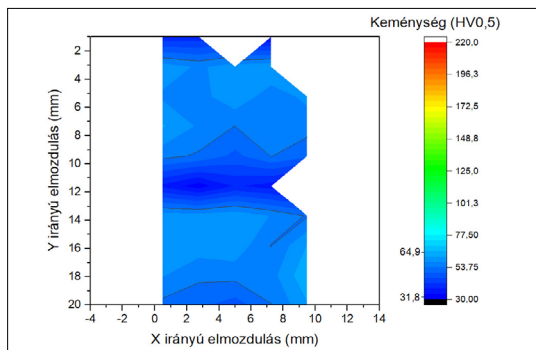
3. ábra. A mérési pontok elhelyezése alakítatlan (a) és alakított (b) mintákon

3. Eredmények

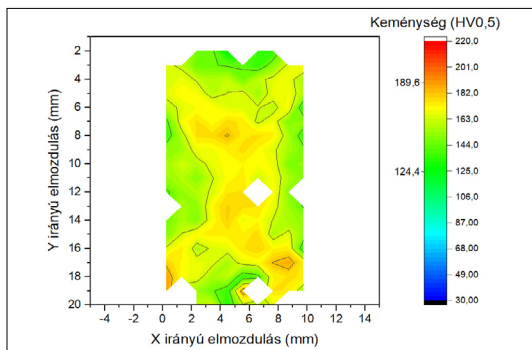
A kovácsolt próbatetekből képzett minták keménységtérképeit a 4–8. ábrák mutatják. Ezeken a hiányos pontoknál a mérést feldolgozó program nem tudta kiszámolni a keménységértéket, vagy a mérési pont a gyantába került. A keménységtérképek összehasonlíthatósága végett a skálák tartományát globálisan határoztuk meg, míg az adott keménységtérképhez tartozó mérési pontok által lefedett tartomány legkisebb, ill. legnagyobb értékét a skála bal oldalán jelzett két szám mutatja.

Ahogy a 4. ábrán is látható, a referenciamintán mért keménységtérkép homogén, a keménységértékek pedig ezen a mintán 32–65 HV0,5 közé esnek (átlag 52,6±8,3 HV0,5). A kapott keménységértékek az ipari gyakorlatban is bevett, kellően szűk tartományon mozognak, így kijelenthető, hogy a csökkentett számú, 40 mérési pont kielégítő, és reprezentatívan képes szemléltetni a minta keménységét. Továbbá, mivel minden minta azonos előkészítésen esett át, azok kiindulási állapotuk izotropnak tekinthető.

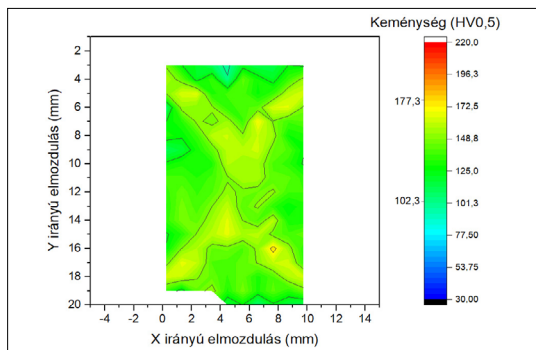
A keménységértékekben a legjelentősebb ugrás az első alakítási lépést követően jelentkezik (5. ábra). Alig láthatóan ugyan, de már ekkor is megmutatkozik a teljes folyamatra később jellemző mintázat: az átlók mentén számottevően na-



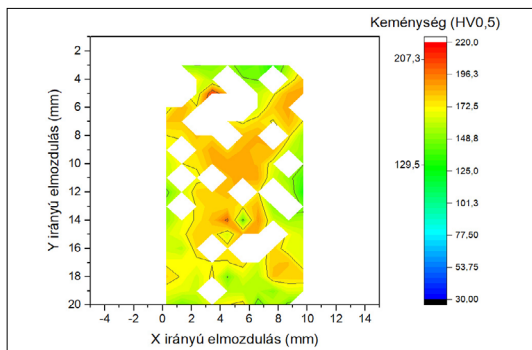
4. ábra. A referenciaminta keménységtérképe



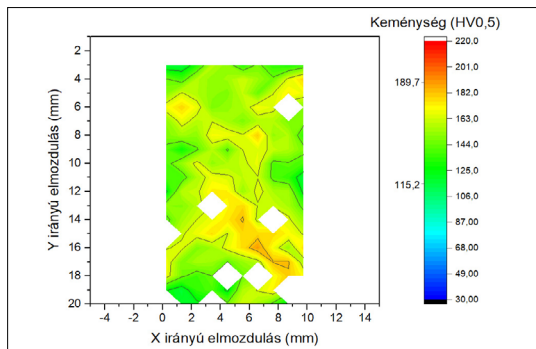
7. ábra. A három alakítási lépésen átesett minta keménységtérképe



5. ábra. Az egy alakítási lépésen átesett minta keménységtérképe



8. ábra. A két alakítási cikluson átesett minta keménységtérképe



6. ábra. Az egy alakítási cikluson átesett minta keménységtérképe

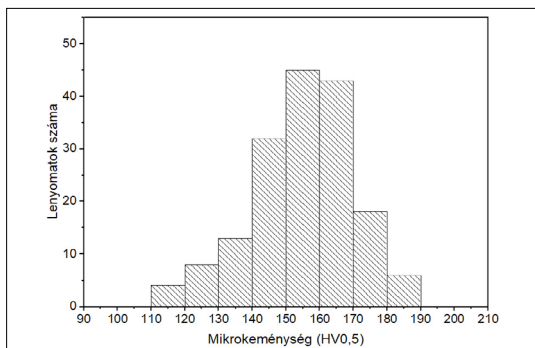
gyobb keménység figyelhető meg, mint az oldalélek mentén [12]. A mikorkeménység ezen a mintán 102,3 és 177,3 HV0,5 közötti értékeket vesz fel.

Az első alakítási ciklus végére a keménységtérkékek tartománya (6. ábra) szélességét megőrizve feljebb mozdul el a skálán, ezen a mintán 115,2 és 189,7 HV0,5 között alakulnak a keménységtérkékek. Jelentkeznek továbbá üres pontok is, amelyek a korábbiakhoz hasonlóan és a későbbiekben is mérési hibát jelentenek.

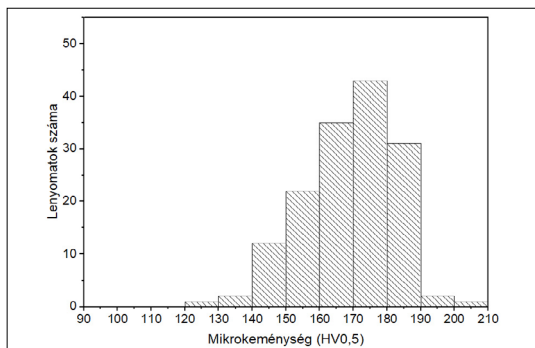
A harmadik alakítási lépésben az intervallum, amelyen a keménységértékek jelentkeznek (7. ábra), szűkül (124,4–189,6 HV0,5), vagyis az oldalélek mentén már érzékelhető keménységnövekedés indul be. Ezzel párhuzamosan a nagyobb keménységű középső tartomány fokozatos kiszélesedése is megfigyelhető. Utóbbi jelenség arra vezethető vissza, hogy az alakítási keménynyedés miatt a nagyobb alakváltozást elszenvedő részek ellenálló-képessége nőni fog, így a korábban kisebb alakváltozáson áteső külső tartományok elkezdnek felzárkózni ehhez.

A második alakítási ciklus végére a keménységtartomány eltolódik és szűkül (8. ábra), így a keménységértékek 129,5 és 207,3 HV0,5 között jelentkeznek. Ez a harmadik alakítási lépéshez képest az átlók mentén is tapasztalható, illetve az ábrák színátmenetein jól látható, hogy a keménység jóval homogénebb, mint eddig. A minta szélein az előző lépéshez hasonlóan elkülönül egy alacsonyabb keménységű zóna.

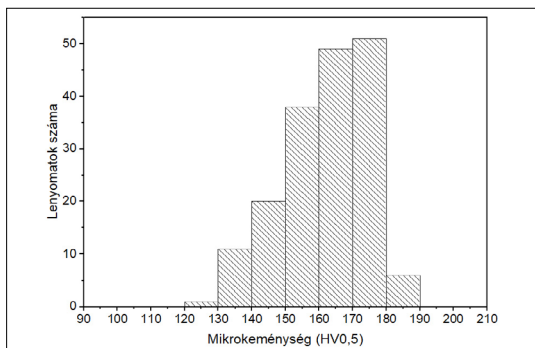
A 9–12. ábrák az egyes alakítási lépések jelentkező keménységek eloszlását mutatják. A harmadik alakítási lépésig a hisztogramok folyamatosan



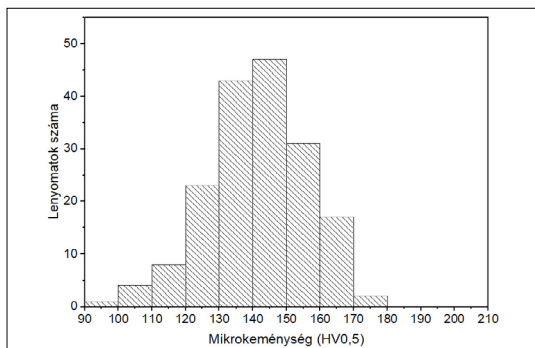
9. ábra. Az első alakítási lépés keménységértékeinek hisztogramja



11. ábra. A harmadik alakítási lépés keménységértékeinek hisztogramja



10. ábra. Az első alakítási ciklus keménységértékeinek hisztogramja



12. ábra. A második alakítási ciklus keménységértékeinek hisztogramja

a nagyobb keménység irányába tolódnak el. A negyedik alakítási ciklusnál a csúcs 170 és 180 HV_{0,5} között marad, azonban a többi értéket mutató tartomány beszűkül, és nem terül el olyan szélesen, mint a harmadik alakítási lépés esetén.

4. Következtetések

Az O&P módszer alkalmazásával egyértelműen több hiba kerül az eredményekbe, mint manuális keménységmérő műszer alkalmazása esetén. A hibák számaért kárpótol, hogy a programozható keménységmérő műszerrel a manuális módszerekkel folytatott mérésekhez szükséges idő alatt az úgy megvalósítható mérések többszöröse mehet végbe.

A jellegzetes kereszt alakú mintázatot a jó kenés ellenére a munkadarab szerszámlapokhoz történő letapadása miatt alakul ki. A súrlódás hatására a munkadarab szerszámlapokkal érintkező részén jóval kisebb lesz az alakváltozás, így itt kialakulnak a „letapadt” zónák, míg az átlók mentén jóval nagyobb deformáció jelentkezik.

A 9–12. ábrák alapján kijelenthetjük, hogy az alakváltozás növekedésével a második alakítási

ciklusig bezárólag folyamatosan növekszik a keménység. Ezt szemlélteti a hisztogramok nagyobb keménységértékek felé történő eltolódása is.

Köszönetnyilvánítás

Jelen munka a Kulturális és Innovációs és Minisztérium ÚNKP-23-2-I-BME-372 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Külön köszönet illeti a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékét, illetve Gépjárműtechnológia Tanszékét a szükséges laborfelszerelés biztosításáért, valamint a Miskolci Egyetem Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézetét a többtengelyű kovácsszerszám működtetéséhez szükséges hely és eszköz biztosításáért.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Langdon T. G.: *The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing*. Materials Science and Engineering A, 462/1–2. (2007) 3–11.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.473>

- [2] 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>
- [3] Siegel R. W.: *Nanophase Materials*. 11. kiadás. VCH Publishers, 1994.
- [4] Mughrabi H.: *Dislocation wall and cell structures and long-range internal stresses in deformed metal crystals*. Acta Metallurgica, 31/9. (1983) 1367–1379.
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(83\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0001-6160(83)90007-X)
- [5] Chang C. P., Sun P. L., Kao P. W.: *Deformation induced grain boundaries in commercially pure aluminium*. Acta Materialia, 48/13. (2000) 3377–3385.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00138-5)
- [6] Bereczki P. et al.: *Production of ultrafine grained aluminum by cyclic severe plastic deformation at ambient temperature*. In: Institute of Physics, Franciaország, Conf. Ser.: 6th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation. (2014) 1–11.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/63/1/012140>
- [7] Valiev R. Z.: *Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation*. Progress in Materials Science, 45/2. (2000) 103–189.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9)
- [8] Sakai T., et al.: *Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions*. Progress in Materials Science, 60. (2014) 130–207.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.002>
- [9] Juhász Zs, Bíró T., Renkó J. B.: *Design and Manufacture of closed die multi-axial forging tool*. In: Institute of Physics, Magyarország, Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1246. (2022) 1–7.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012009>
- [10] Juhász Zs.: *Zárt üregű többtengelyű kovácsolással alakított réz próbatestek mikroszerkezeti vizsgálata*. Szakdolgozat. BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék 2022.
- [11] Oliver W. C., Pharr G. M.: *Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology*. Journal of Materials Research, 19. (2003) 3–20.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>
- [12] Juhász Zs.: *A többtengelyű kovácsolás mikroszerkezeti hatásainak vizsgálata*. TDK-dolgozat. BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 2022.