



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Anyagtudomány és Technológia Tanszék

Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola
Anyagtudomány részprogram

**ULTRA-FINOM- ÉS NANOSZEMCSÉS TÖMBI
FÉMÖTVÖZETEK TÖBBTENGELYŰ KOVÁCSOLÁSSAL
TÖRTÉNŐ ELŐÁLLÍTÁSÁNAK FIZIKAI ÉS MECHANIKAI
MODELLEZÉSE**

című PhD értekezés téziszüzet

Írta:

Bereczki Péter
okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. habil. Krállics György
egyetemi docens

Budapest
2015

Az értekezés bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv a későbbiekben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának Dékáni Hivatalában megtekinthetők.

1. A KUTATÁSI TÉMA ISMERTETÉSE, CÉLKITŰZÉSEK

Kutatómunkám a nanoszerkezetű anyagokkal kapcsolatos igen széles és összetett tudományterületbe illeszkedik. Ezeknek a valamely irányban legfeljebb 100nm-es kiterjedésű elemekből felépülő anyagoknak a tulajdonságai jelentősen különböznek az ugyanazon összetételű, de hagyományos szerkezetű anyagokéitól. A kutatások legfőbb hajtóereje ezeknek az anyagoknak a legkülönbözőbb területeken való alkalmazása. A nanocsöveket, a nanokompozitokat, a nagy fajlagos felületű nanokatalizátorokat, a vékonyrétegeket és a nanoméretű funkcionális eszközöket napjainkban már széleskörűen alkalmazzák. A nanoanyagokat felhasználják a mikroelektronikában, az optikában, a szenzorokban, az orvosi eszközökben, az üzemanyagcellákban és a bevonatokban is.

A lehetséges gépészmérnöki alkalmazások szempontjából meghatározóak az ún. tömbi nano-, illetve ultra-finomszemcsés anyagok. Előállításukhoz számos különböző technológiát és kísérleti technikát fejlesztettek ki az elmúlt évtizedekben. Ezek alapvetően két fő csoportba, az ún. „bottom-up” és a „top-down” kategóriákba sorolhatóak. Az első lényegében a valamely eljárással előállított nanoszemcsékből felépített anyagok csoportját jelöli, mint például a porkohászati termékek. A másik esetben például a tömbi, durvaszemcsés fémek szerkezeti anyagok mikroszerkezetét alakítják át ultrafinom vagy nanoméretű kristallitokból felépülő mikrostruktúrává. Az értekezésben bemutatott kutatási tevékenységem során is a tömbi ultra-finom- és nanoszemcsés anyagok, azon belül fémek és ötvözetek előállításával és tulajdonságaik vizsgálatával foglalkoztam.

A tömbi ultra-finom- és nanoszemcsés fémötvözetek előállításához jelenleg alkalmazott eljárások két nagy csoportba sorolhatók. Az egyik kategóriába az ún. korszerű termomechanikus eljárások tartoznak. Ezek különböző fémteni folyamatok aktiválása vagy erősítése révén járulnak hozzá a szemcseméret csökkentéséhez. Az eljárások másik csoportját az ún. intenzív képlékenyalakító technikák képezik. Az elmúlt évtizedekben számos ilyen technológiai megoldást fejlesztettek ki, amelyek közül az egyik a többtengelyű kovácsolás. Az ultra-finom- és nanoszemcsés mikroszerkezet létrehozásához a többtengelyű kovácsolási technikák egyikét, a Gleeble fizikai szimulátor MaxStrain egységével megvalósítható eljárást használtam. A Gleeble berendezéssel végrehajtható többtengelyű kovácsolás folyamatát és az ehhez kapcsolódó legfontosabb kutatások eredményeit a következő fejezetben mutatom be.

Először a többtengelyű kovácsoláshoz, illetve az ultra-finom- és nanoszemcsés tömbi fémötvözetekhez kapcsolódó kutatásaim célkitűzéseit ismertetem. Amint a következő fejezetben lévő szakirodalmi áttekintésből is látható, munkámat leginkább az motiválta, hogy a ciklikusan ismétlődő munkarend szerint végrehajtott többtengelyű kovácsolásra jellemző alakváltozási és feszültségállapot elemzésének kérdéskörével csupán néhány munka foglalkozott. A MaxStrainnal megvalósítható többtengelyű kovácsolással kapcsolatban pedig elmondható, hogy a ciklikusan váltakozó irányú terheléstörténet mellett végbemenő nagymértékű képlékeny alakváltozásra jellemző alakítási szilárdság-képlékeny alakváltozás kapcsolatra vonatkozó ismereteink hiányosak.

A fenti megállapításokból kiindulva, kutatómunkám során az alábbi célkitűzéseket fogalmaztam meg:

- Annak érdekében, hogy az anyagok többtengelyű kovácsolás alatti mechanikai viselkedése modellezhető legyen, a Gleeble szimulátor MaxStrain egységéhez kapott kereskedelmi forgalmú szimulációs programot tovább kellett fejleszteni. Alapvető cél volt egy olyan mérési eljárás és program kidolgozása a többtengelyű kovácsolás fizikai szimulációjára, amellyel szabályozható az egyes alakítási lépésekben megvalósított alakváltozás mértéke és sebessége.
- Az alakítási folyamatra jellemző egyenértékű képlékeny alakváltozás és egyenértékű feszültség közvetlenül, a szimuláció során mért adatokból történő számítása, azaz egy alkalmasan kidolgozott mechanikai modell megalkotása, amellyel az alakítási szilárdság változását leíró folyásgörbék meghatározhatóak. Ehhez a szerszámok között alakváltozó test geometriai méreteinek folytonos nyomonkövetése is szükséges, amely szintén a szimulációs program továbbfejlesztését igényelte.
- A szabályozott kovácsolási szimulációkból származó adatok felhasználásával és a mechanikai modell alkalmazásával a különböző kristályszerkezetű anyagok többtengelyű kovácsolására számított folyásgörbék az alakítási szilárdság ciklikus változását mutatták. Ezeket az adatokat felhasználva, az alakítási szilárdság változásának a leírásához egy olyan matematikai megközelítés kidolgozását céloztam meg, amellyel a ciklikusan változó alakítási szilárdság egy összefüggéssel megadható, és annak határoló görbéi is meghatározhatóak. További célkitűzés egy általános összefüggés kidolgozása volt, amely megadja a ciklikus alakítási szilárdság várható tartományát a lépésenkénti képlékeny alakváltozás (alakváltozási amplitúdó) függvényében.
- A kísérleti anyagok egyes mechanikai tulajdonságainak nyomonkövetése az alakításnak alávetett anyagtérfogatban halmozódó képlékeny alakváltozás függvényében. Ehhez a kovácsolási kísérletek egyéb paramétereit tekintve azonosan, de az alakítási lépések számát illetően egyre növekvő mértékben alakított próbatestek keresztmetszetének keménységét és az alakított darabok szakítóvizsgálatából meghatározható szilárdsági és alakíthatósági mérőszámokat terveztem megvizsgálni.

A MaxStrainnel végrehajtható többirányú kovácsolási technika köré csoportosuló kutatási tevékenységem harmadik meghatározó iránya az alakítási kísérleteimből származó próbatestek mikroszerkezetének kvalitatív és kvantitatív jellemzése. A vizsgálatok egyik célja a többtengelyű kovácsolás eredményeképpen létrejövő finomszerkezet jellemző szemcseméretének, a szemcsék orientációs viszonyainak, valamint a szemcsehatárok egyes tulajdonságainak elemzése és összehasonlítása a kiindulási állapottal. Emellett fontos szempont volt az alakítási folyamat alatt végbemenő szemcsefinomodás nyomonkövetése, illetve a különböző alakváltozási amplitúdóval végrehajtott alakítássorozatok szemcseméretre gyakorolt hatásának vizsgálata.

2. ELŐZMÉNYEK, KUTATÁSI MÓDSZEREK

Kutatómunkám ismertetéséhez szorosan hozzátartozik az intenzív képlékenyalakító eljárások és az általuk elérhető ultra-finom- vagy nanoszemcsés mikroszerkezet legfontosabb tulajdonságainak bemutatása.

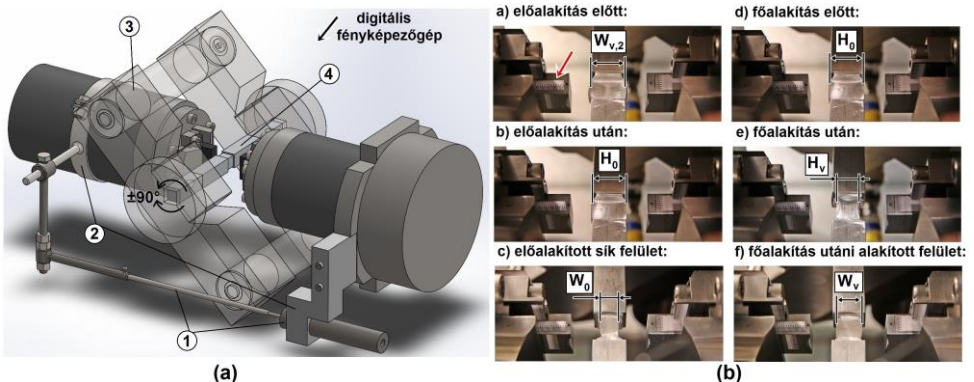
Tömbi fémek anyagoknál nanoszemcsés szerkezetéről abban az esetben beszélhetünk, ha a mátrixot felépítő kristallitok átlagos mérete legfeljebb 100nm. Az ilyen kisméretű szemcséket elválasztó szemcsehatárok lehetnek egyensúlyiak vagy nem-egyensúlyiak. A nem-egyensúlyi, azaz geometriailag szükséges szemcsehatárokkal körülvett tartományokat celláknak, vagy diszlokációs celláknak nevezzük. Jellegzetességük, hogy polikristályos fémekben nagymértékű nyíró alakváltozás hatására jönnek létre, amelyet például az intenzív képlékenyalakító eljárásokkal lehet megvalósítani. Az intenzív képlékenyalakító technikai megoldások egyik közös jellemzője, hogy az alakítási folyamat által megvalósítható képlékeny alakváltozás jóval nagyobb, mint a hagyományos alakító technológiák esetében, elérheti a százas nagyságrendet is. Az anyagszerkezet károsodásának elkerülését nyomó jellegű, közel hidrosztatikus feszültségállapot és nagy, akár néhány GPa-os nyomás biztosításával érik el. Az intenzív képlékenyalakításra jellemző nyíró alakváltozás során a kristallitok eredeti határán rácsdiszlokációk torlódnak fel, és megvastagodott, nagy diszlokációsűrűségű cellafalat alkotnak. A cellás struktúra jellemzően a 0,8-1 mértékű egyenértékű képlékeny alakváltozás elérésével alakul ki. A képlékeny alakváltozás mértékének további növelésével a cellafalakban lévő diszlokációsűrűség elér egy kritikus értéket, majd a diszlokációk részleges megszűnése mellett kialakul a tömbi fémek anyagoknál értelmezett ultra-finomszemcsés mikroszerkezet. Az ilyen anyagokat jellemzően néhány 100nm-től 1 μ m-ig terjedő szemcsék építik fel, amelyeket többnyire egyensúlyi vagy közel egyensúlyi, nagyszögű szemcsehatárok választanak el.

Az ultra-finom- és nanoszemcsés fémek számos fizikai, hőtani, elektromos, mágneses, korróziós és egyéb tulajdonsága mutat jelentős változást, illetve javulást a durvaszemcsés állapothoz képest. A gépészmérnöki gyakorlat szempontjából a mechanikai tulajdonságok változása meghatározó fontosságú. A szemcseméret csökkenésével ugyanis jelentősen növekszik a fémek folyáshatára. A szilárdságnövekedés mellett, a hagyományos hidegalakító technológiákkal összehasonlítva, az intenzív képlékenyalakításon átesett anyagok jobb alakíthatósági tulajdonságokkal rendelkeznek, amely visszavezethető az ultra-finomszemcsés mikroszerkezet említett jellemzőire. Emellett szívóssági tulajdonságaik javulhatnak is a durvaszemcsés állapotukhoz képest, például a térben középpontos kockarácsú fémekre jellemző szívós-rideg átmeneti hőmérséklet csökkenése révén. A fémekre jellemző tulajdonság-együttes ilyen irányú fejlődése az ultra-finom- és nanoszemcsés fémötvözetek fejlesztésének és alkalmazásának fő hajtóereje.

Az utóbbi évtizedekben számos olyan intenzív képlékenyalakító eljárást fejlesztettek ki, amelyekkel a tömbi fémek anyagok mikroszerkezete ultra-finom- vagy nanoszemcsés szerkezetűvé alakítható. Az ezekben a folyamatokban megvalósuló nagymértékű képlékeny alakváltozás nyíró jellege mellett jellemzően nem monoton.

A nem-monotonitás egy széleskörűen elfogadott értelmezése, hogy az alakváltozási sebesség tenzor főirányai nem ugyanazon anyagi szálakkal esnek egybe a teljes alakítási folyamat alatt, ellentétben például az egytengelyű feszültségállapotban végrehajtott húzással vagy tömítéssel, amelyek szigorúan monotonnak tekinthetők. A nagymértékű nyíró alakváltozást biztosító szerszámgeometria mellett a folyamat nem-monotonitását, amely erőteljesen hozzájárul a szemcsefinomodáshoz, úgy fokozzák, hogy a próbatesteket az egyes alakítási lépések között előre meghatározott munkarendek, ún. alakítási utak szerint forgatják.

Az intenzív képlékenyalakító eljárások egyike a többtengelyű kovácsolás, amely jellemzően sík szerszámfelek közötti szabadalakító kovácsolásból vagy zárt üregben végrehajtott zömítések sorozatából áll. Az egyes lépések között ebben az esetben is az alakítás irányának ciklikus ismétlésével forgatják a próbatestet, annak két vagy három tengelye mentén. A többtengelyű kovácsolásra kifejlesztett különböző technikai megoldások közül az alakítási folyamat paramétereinek szabályozhatósága szempontjából kiemelkedik a MaxStrain műveleti egységgel felszerelt Gleeble fizikai szimulátor. A MaxStrain berendezéssel a próbatest középső, hasáb alakú részének kétirányú többtengelyű kovácsolása hajtható végre, az alakítási lépések között a próbatestet annak hossz tengelye mentén 90° -kal oda-vissza forgatva (1(a) ábra). A szimulációk során az alakítást végző keményfém szerszámok mozgása, illetve az ellenállásfűtéssel hevített próbatest hőmérséklete egy program szerint nagy pontossággal szabályozható. A MaxStrain berendezés alkalmazásával kapcsolatos eddigi kutatások egy jelentős része a szabályozott hőmérsékletvezetés és az intenzív képlékenyalakítás együttes szemcsefinomító hatását tanulmányozta különböző fémeken és ötvözeteken. Más kutatók alumíniumötvözeteken, titánon és vörösrézén vizsgálták a szemcsefinomodás mechanizmusát és a mechanikai tulajdonságok alakulását. A modellezést érintő kutatások között a mikroszerkezet egyes jellemzőinek alakulását leíró analitikus, illetve az alakváltozási és feszültségállapotot vizsgáló vége-seleemes modelleket találunk. Az 1(a) ábrán látható a MaxStrain berendezés munkaterének modellje a (3) forgatókengyelbe befogott (4) próbatesttel.



1. ábra (a) A MaxStrain berendezés funkcionális elemeinek 3D-s modellje
(b) Egy kovácsolási lépés jellegzetes elemei

Az eddigi szakirodalmi háttéranyagot tekintve, az elsődleges célkitűzésem a ciklikus, nem monoton és nagymértékű képlékeny alakváltozást megvalósító többtengelyű kovácsolás folyamatára jellemző alakítási szilárdság-képlékeny alakváltozás kapcsolat meghatározása új kutatási irányt jelent. A mechanikai modell felépítéséhez és a folyásgörbék számításához olyan mérési eljárást dolgoztam ki, amellyel a szerszámmozgás irányú egyenértékű logaritmikus alakváltozási mérték és sebesség szabályozható az egyes kovácsolási lépésekben. Továbbá az alakított anyagterefogat szerszámmozgás irányában értelmezett magassági (1(b) ábra – H_0 és H_v) és arra merőleges vastagsági (1(b) ábra – W_0 és W_v) méretei, valamint a próbatest szerszámmal érintkező felületeinek vastagsági mérete (1(b) ábra – $W_{v,2}$) mérhetőek. A szimulációk szabályozottságának növelése és az említett méretek pontosabb meghatározása érdekében az 1(a) ábrán látható (1) induktív útjeladót rögzítettem a (2) munkahengerekhez. A szimuláció során az érintkezőfelületek vastagsági méreteit az 1(b) ábrán látható „b” felvétel szerinti pozícióban készített fényképről számítottam ki a piros nyíllal jelölt milliméterskála segítségével. A program az alakított anyagterefogat ezen méreteit mindenegyes kovácsolási lépés előtt („0” indexű méretek) és után („v” indexű méretek) mérte és regisztrálta, amely alapvető feltétele volt a sebességmező meghatározásának és a modell megalkotásának. A szimulációk alatt a szerszámmozgás irányú alakító erőt is folyamatosan mértem.

Többtengelyű kovácsolási kísérleteimet eltérő kristályszerkezetű fémeken és ötvözeteken, különböző alakváltozási amplitúdóval és sebességgel, valamint szoba- és növelt hőmérsékleten hajtottam végre. Kísérleteimhez az alábbi kémiai összetételű, felületen középpontos kockarácsú EN AW-6082 minőségű alumíniumötvözetet, térben középpontos kockarácsú DD11 minőségű ötvözetlen lágyacélt és a hexagonális kristályszerkezetű Grade2 tisztaságú titánt használtam.

1. táblázat A kovácsolási kísérletekhez használt anyagok kémiai összetétele

	Ötvöző elemek (m/m %)								
	C	Mn	Si	Al	P	S	Cu	Ni	
EN AW-6082		0,51	0,87	maradék					
DD11	0,05	0,22	0,013	0,025	0,006	0,008	0,02	0,01	
Grade2 Ti									
	Cr	Ti	V	Mo	Nb	Mg	Zn	Fe	
EN AW-6082						0,60	0,02	0,21	
DD11	0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001			maradék	
Grade2 Ti		>99,90							

Az alumínium próbatestek alapanyaga 25×25mm-es, négyzet keresztmetszetű extrudált rúd volt, amelyet lágyított állapotban használtam a kísérletekhez. A lágyacélon és a titánon egyaránt a melegen hengerelt szállítási állapotban végeztem el a kovácsolási szimulációkat. A három anyaggal elvégzett kovácsolási kísérletek egyik alapvető célja a kifejlesztett mechanikai modell alkalmazásának vizsgálata volt. Emellett a célkitűzéseknél említett kiértékelési és vizsgálati tevékenységekhez szükséges különböző állapotú és alakítottágú mintákat állítottam elő az egyes kísérleti anyagokból.

A következőkben azoknak a kovácsolási kísérleteknek a legfontosabb paramétereit ismertetem, amelyek a megfogalmazott tézisekhez kapcsolódnak. Az alumíniumon és a lágyacélon azonos lépésenkénti alakváltozási amplitúdóval ($\Delta\varphi = 0,4$) és egyenértékű logaritmikus alakváltozási sebességgel ($\bar{\xi} = 0,1s^{-1}$), de próbatestenként növekvő kovácsolási lépésszámmal ($n = 1..10$) végrehajtott szobahőmérsékletű alakítási kísérletek a mechanikai és mikroszerkezeti tulajdonságok változásának nyomon követését célozták. Az alumíniumötvözetben azonos egyenértékű logaritmikus alakváltozási sebességgel ($\bar{\xi} = 0,1s^{-1}$), de eltérő lépésenkénti alakváltozási amplitúdóval ($\Delta\varphi = 0,2; 0,285; 0,4$) végrehajtott szobahőmérsékletű kísérletekkel a terhelési ciklusok alakváltozási amplitúdójának alakítási szilárdságra gyakorolt hatását elemeztem. Egy 40 alakítási lépést megvalósító kovácsolási szimuláció végrehajtásával az alakítási szilárdság változását tanulmányoztam a valóban nagymértékű képlékeny alakváltozások tartományában. A 10 lépésben, 400°C -on és $\Delta\varphi = 0,4$ mértékű alakváltozási amplitúdóval titánon végrehajtott szimulációt, az acél és az alumínium mellett, mint a mechanikai modell érvényességét vizsgáló alapkísérletet végeztem el.

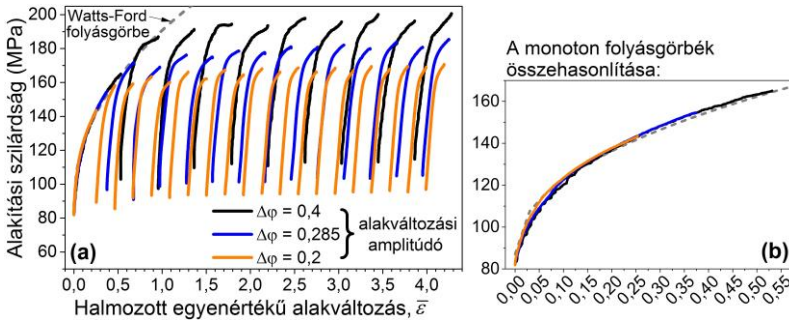
A mechanikai anyagvizsgálatokat során a különböző számú kovácsolási lépésen átesett alumínium próbatestek keresztmetszeti keménységtérképét Vickers mikrokeménység méréssel vettem fel, míg szakítóvizsgálatukat a hosszirányú, lemezalakú szakító próbatestek kimunkálását követően nyúlásmérővel ellátott univerzális szakítógépen hajtottam végre. A különböző mértékben és alakváltozási amplitúdóval alakított alumínium minták mikroszerkezetét egy Philips CM20 típusú transzmissziós elektronmikroszkóppal, míg a lágyacél próbatestekét egy HKL típusú EBSD detektorral felszerelt Jeol JSM 6500 F pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk meg.

3. A KUTATÓMUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA ÉS A TÉZISEK ISMERTETÉSE

Felhasználva az alakított anyagtérfogat szimuláció során regisztrált méreteit és azt, hogy az alakított anyagtérfogat harmadik, a próbatest hossz tengelyének irányába eső mérete állandó – ugyanis az azonos az alakító szerszám szélességével –, meghatároztam a kinematikailag lehetséges sebességmezők komponenseit, valamint a H-M-H elmélet szerinti $\bar{\xi}$ egyenértékű alakváltozási sebességet és $\bar{\varepsilon}$ egyenértékű alakváltozási mértéket. A lehetséges sebességmezők felírásánál az a_0 variációs paraméterrel definiáltam az alakváltozási sebesség tenzor egyes elemei közötti kapcsolatot. Ezt követően a virtuális sebességek elvét alkalmazva, a képlékenységtan energetikai alapegyenletét a kinematikailag lehetséges alakváltozási sebességmezőkkel írtam fel, amely így az alakítási folyamathoz szükséges teljesítmény egy variációs funkcionálja. A valós sebességmező minimalizálja ezt a funkcionált és az a_0 variációs paraméter értéke – ezáltal a valós sebességmező is – a mért méretek, mint geometriai peremfeltételek alkalmazásával meghatározható. Ezeket felhasználva a próbatest szárában ébredő ismeretlen nagyságú nyomóerő kifejezhető az alakítási szilárdság függvényében. A számítást az egyes kovácsolási lépések minden egyes időlépésében végrehajtva és

figyelembe véve, hogy az alakításhoz szükséges teljesítmény ideális esetben egyenlő a pillanatnyi alakító erőből számított kívülről közölt teljesítménnyel, az alakítási szilárdság értéke számítható. A modellben az anyag izotróp és összenyomhatatlan, és az alakítási szilárdság az egyes időlépések között a teljes alakított térfogaton állandónak feltételezett.

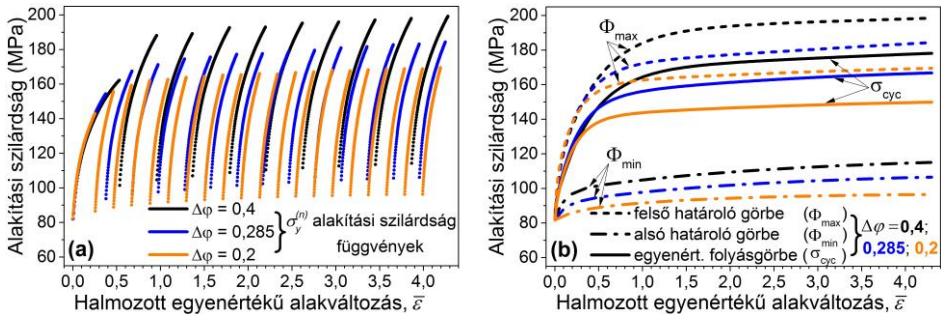
A kapott alakítási szilárdság értékeket a hozzájuk tartozó egyenértékű képlékeny alakváltozás függvényében ábrázolva, megkapjuk az alakítási szilárdság változását leíró folyásgörbéket. A 2(a) ábrán az alumíniumötvözetben különböző alakváltozási amplitúdóval elvégzett kovácsolási kísérletekre számított folyásgörbéket láthatjuk. A 2(b) ábrán az első, monotonnak tekinthető kovácsolási lépések folyásgörbéit ábrázoltam. Látható, hogy ezek mind egymással, mind pedig a szintén monoton Watts-Ford vizsgálatból meghatározott referencia-folyásgörbével, jó közelítéssel együtt futnak. A mechanikai modell ellenőrzése céljából a többi kísérleti anyagra is felvettem monoton alakváltozási viszonyok melletti folyásgörbéket, amelyek ehhez hasonló egyezést mutattak az első kovácsolási lépésre számított folyásgörbékkel.



2. ábra (a) A különböző alakváltozási amplitúdóval végrehajtott többtengelyű kovácsolási szimulációk folyásgörbéi és (b) az első lépések kinagyított folyásgörbéi

A ciklikus, nem monoton képlékeny alakváltozást jellemző alakítási szilárdság a monoton terhelési esetre meghatározott folyásgörbe alatt halad. Emellett az egyes alakváltozási amplitúdókhoz meghatározott folyásgörbék az alakítási szilárdság ciklikus változását mutatják, amely a terhelés irányának megváltozásakor tapasztalható nagymértékű feszültségsökkenésben jelentkezik. Ezek a jelenségek a másik két kísérleti anyagnál is megfigyelhetők voltak. A kiértékelés következő fázisában egy olyan matematikai leírást és a hozzá tartozó számítási algoritmust dolgoztam ki, amellyel a többtengelyű kovácsolásra jellemző ciklikus alakítási szilárdság egy összefüggéssel megadható. A ciklikus kis képlékeny alakváltozásokra vonatkozó Masing-féle általánosított egyenletből kiindulva, a monoton terhelési esetre meghatározott folyásgörbe és három paraméter (α , β és γ) felhasználásával előállítható a monoton folyásgörbe egy olyan transzformációja, amely jó közelítéssel leírja a ciklikus alakítási szilárdságot. Emellett a β paraméter kvantitatív módon jellemzi a terhelés irányának megváltozásakor jelentkező Baushinger jellegű effektust. Értékeit tekintve megállapítottam, hogy a vizsgált alumíniumötvözet szobahőmérsékletű kovácsolásakor az említett effektus mértéke független az alakváltozási amplitúdótól, annak $\Delta\varphi = [0, 2 \dots 0, 4]$ intervallumán.

Az alakítási szilárdság változását különböző alakváltozási amplitúdó mellett leíró függvények által kirajzolt folyásgörbék a 3(a) ábrán láthatóak.

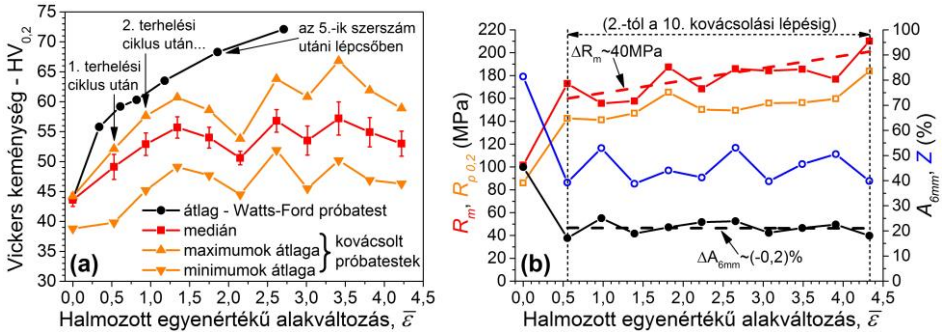


3. ábra (a) A különböző alakváltozási amplitúdójú kovácsolást kísérő ciklikus alakítási szilárdságot leíró függvények folyásgörbéi és (b) az alakítási szilárdság határoló és egyenértékű folyásgörbéi

Az előbbi számítási eljárás keretében a mechanikai modellel számított és a képlékeny alakváltozás tartományában értelmezett folyásgörbék kezdő és végpontjait felhasználva, illesztéssel meghatároztam az alakítási szilárdság tartományát kijelölő Φ_{min} alsó és Φ_{max} felső határoló görbéket. Definiáltam a ciklikus alakítási folyamatra jellemző σ_{cyc} egyenértékű folyásgörbét, amelyet a felső határoló görbe arányos transzformációjával állítottam elő úgy, hogy az a teljes alakítási folyamat képlékeny alakváltozási munkájával egyenlő nagyságú munkát fejezzon ki. A 3(b) ábrán látható, hogy az alakváltozási amplitúdó növekedésével a határoló görbék is növekednek, azaz a folyás egyre nagyobb feszültség szinten indul meg a terhelési ciklusok kezdetén, és az alakítási szilárdság maximális értéke is növekszik. Az amplitúdó függvényében az alsó és a felső határoló görbék függvényeinek együtthatói is monoton változnak. Ezt felhasználva határoztam meg azt az összefüggést, amely megadja az alakítási szilárdság várható tartományát az alakváltozási amplitúdó függvényében, annak $\Delta\phi = [0, 2 \dots 0, 4]$ intervallumán.

A mechanikai tulajdonságok intenzív képlékenyalakítás alatti változását azonos amplitúdóval, hőmérsékleten és alakváltozási sebességgel, de különböző mértékben kovácsolt alumínium próbatesteken vizsgáltam. A négyzet-hálószerű kiosztásban pozícionált Vickers típusú mikrokeménység méréseket az alakított anyagrészek és egy alakítatlan próbatest azon középkeresztmetszetén végeztem el, amely a próbatest hossz tengelyére merőleges. A próbatestenkénti 120-150 keménységértéket statisztikai kiértékelésnek vettem alá. A 3-paraméteres, folytonos Weibull valószínűség-eloszlást használva meghatároztam az egyes adathalmazok mediánját, móduszát és szórását. Az egyes kovácsolási lépéseket követő állapotokra jellemző keménységi mérőszámokat, valamint a monoton terhelésnek alávetett Watts-Ford próbatest egyes lépcsőiben mért keménységértékek átlagát közös grafikonban mutatja be a 4(a) ábra a halmazott egyenértékű képlékeny alakváltozás függvényében. Az ugyanilyen beállításokkal kovácsolt újabb tíz próbatestből azok hossz tengelye mentén lemezalakú, míg az alapanyagból hengeres szakító próbatesteket munkáltam ki.

A szobahőmérsékletű szakítóvizsgálatokból meghatározott mechanikai mérőszámokat szintén a halmazott egyenértékű képlékeny alakváltozás függvényében ábrázoltam (4(b) ábra). Az $\bar{\varepsilon} = 0$ egyenértékű képlékeny alakváltozáshoz tartozó értékek mindkét esetben az alakítatlan alapanyagra vonatkoznak.



4. ábra Az EN AW-6082-es alumíniumötvözet (a) keménységének és (b) mechanikai mérőszámainak változása a többtengelyű kovácsolás során

A kiindulási állapotban közel azonos keménység a monoton alakváltozás során nagyobb mértékben növekszik, mint a nem monoton terhelési menetrend alatt. Monoton alakváltozás során a keménység folytonosan növekszik, míg a többtengelyű kovácsolásnál csak az első három alakítási lépésben monoton a keménységnövekedés, ezt követően rendszertelenül váltakozva növekszik, illetve csökken a keménység. Az alakított próbatestek szakítószilárdsága és folyáshatára jellegét tekintve folytonosan növekszik, míg az alakíthatóságot jellemző szakadási nyúlása az első alakítási lépést követő szakaszban egy közel állandó szinten stabilizálódik.

A keménységmérésnek alávetett alumínium próbatestek másik felén a mikroszerkezet kovácsolási folyamat alatti változását tanulmányoztam transzmissziós elektronmikroszkópia segítségével. A mikrostruktúrában egyaránt megtalálhatóak a blokkokba rendeződött, megvastagodott diszlokációs falakat tartalmazó cellás szerkezetek, valamint a relaxált, közel egyensúlyi szemcsehatárokkal körülvett ultra-finomszemcsés területek. A különböző alakváltozási amplitúdóval, ugyanakkora halmazott képlékeny alakváltozásig alakított próbatestek átlagos szemcsemérete az amplitúdó növekedésével monoton csökken, és eléri a $0,45\mu\text{m}$ -t.

A különböző mértékben, de azonos alakváltozási amplitúdóval és sebességgel szobahőmérsékleten kovácsolt lágyacél próbatestek mikroszerkezetének változását EBSD képalkotó eljárással nyomonkövetve azt tapasztaltam, hogy a terhelési ciklusok számának növekedésével az átlagos szemcseméret exponenciálisan csökken és eléri a $0,8...1,1\mu\text{m}$ -es tartományt. A kiindulási állapotban főleg nagyszögű szemcsehatárokat tartalmazó anyagban a második alakítási lépés után jelentős mennyiségű kisszögű határ található. Ennek mennyisége azonban a további alakítások során folytonosan csökken, míg a nagyszögű határok hányada monoton növekszik. A mikroszerkezet ilyen irányú változása és a szemcseméret $1\mu\text{m}$ körüli nagyságrendje az alumíniumnál tapasztaltakhoz hasonlóan, ultra-finomszemcsés mikrostruktúra kialakulására utal.

4. TÉZISEK

A Gleeble termomechanikus szimulátor MaxStrain egységével két, egymásra merőleges irányból, ciklikusan ismétlődő terhelési menetrenddel hajtható végre a többtengelyű kovácsolás fizikai szimulációja. Az alakítási folyamatra jellemző ciklikus, nem monoton képlékeny alakváltozás mechanikai modellezéséhez kidolgoztam egy olyan vezérlő programot és mérési elrendezést, amellyel az egyes alakítási lépésekben megvalósított egyenértékű logaritmikus alakváltozási mérték és egyenértékű alakváltozási sebesség szabályozható, valamint alkalmas a szerszámok között alakváltozó anyagterfogat jellemző méreteinek mérésére. Az alakítási szilárdság ciklikus terheléstörténet alatti változását és a mikroszerkezet különböző jellemzőinek alakulását eltérő kristályszerkezetű – felületen és térben középpontos kockarácsú, illetve hexagonális rácsszerkezetű – fémekkel és ötvözetekkel végrehajtott alakítási kísérleteken keresztül tanulmányoztam, amelyek alapján az alábbi tudományos eredményeket fogalmaztam meg:

1. A többtengelyű kovácsolás folyamatára jellemző anyagi viselkedés leírására kidolgozott merev-képlékeny mechanikai modell, a képlékenységtan energetikai alapegyenletére alkalmazott virtuális sebességek elvének segítségével, az alakító erő és az alakított anyagterfogat méreteinek felhasználásával megadja az egyenértékű képlékeny alakváltozás és az egyenértékű feszültség kapcsolatát leíró folyásgörbéket az egyes terhelési ciklusokon belül jellemző monoton alakváltozási viszonyok között [S1], [S4], [S6], [S7].
2. A ciklikus kis képlékeny alakváltozás Masing-féle általánosított egyenletét nagy képlékeny alakváltozásokra kiterjesztő, általam kidolgozott számítási eljárás három paraméter és a vizsgált anyag monoton folyásgörbéjének felhasználásával leírja a többtengelyű kovácsolásra jellemző ciklikus alakítási szilárdság és a halmozott egyenértékű képlékeny alakváltozás kapcsolatát. A terhelés irányának megváltozásakor csökkenő alakítási szilárdság jellemzésére bevezetett β tényező értéke az EN AW-6082 minőségű alumíniumötvözetben, $\bar{\xi} = 0,1s^{-1}$ egyenértékű alakváltozási sebességgel és különböző alakváltozási amplitúdóval elvégzett szobahőmérsékletű kovácsolási kísérleteknél az alakítási folyamat előrehaladásával a [0,55...0,6] intervallumban stabilizálódik. A ciklikus képlékeny alakváltozás folyamatát kísérő Baushinger jellegű effektus tehát független az alakváltozási amplitúdó nagyságától, annak $\Delta\varphi = [0,2...0,4]$ intervallumán [S2], [S8].

$$\beta\left(\bar{\varepsilon}_{\max}^{(n-1)}\right) = \frac{\sigma_{y_0}^{(n)}}{\sigma_{y_{\max}}^{(n-1)}}, \quad n > 1$$

- ahol: $\bar{\varepsilon}_{\max}^{(n-1)}$ az $(n-1)$ -edik terhelési ciklus végére az alakított anyagterfogatban akkumulálódott egyenértékű képlékeny alakváltozás;
- $\sigma_{y_0}^{(n)}$ az n -edik terhelési ciklusban a folyás megindulásához szükséges kezdeti alakítási szilárdság (MPa);
- $\sigma_{y_{\max}}^{(n-1)}$ az $(n-1)$ -edik terhelési ciklus végén kialakult alakítási szilárdság (MPa);
- n a terhelési ciklusok száma.

3. Az EN AW-6082 minőségű alumíniumötvözetben, $\bar{\xi} = 0,1s^{-1}$ egyenértékű alakváltozási sebességgel és különböző alakváltozási amplitúdóval elvégzett szobahőmérsékletű kovácsolási kísérletek folyásgörbéi szerint az alakváltozási amplitúdó növekedésével a folyás megindulásához szükséges feszültség, a képlékeny alakváltozási munka ekvivalenciáján alapuló egyenértékű feszültség és a terhelési ciklusok végén kialakult alakítási szilárdság egyaránt folytonosan növekszik. Az alakítási szilárdság egyes terhelési ciklusokban vett szélsőértékei és a halmozott egyenértékű képlékeny alakváltozás közötti kapcsolat leírására kidolgozott számítási eljárás a $\Delta\varphi = [0, 2 \dots 0, 4]$ intervallumon tetszőleges alakváltozási amplitúdóhoz megadja a ciklikus alakítási szilárdság $\Phi_{\min}(\Delta\varphi)$ alsó és $\Phi_{\max}(\Delta\varphi)$ felső határoló görbéjét, azaz az alakítási szilárdság alábbi összefüggés szerinti $\Delta\sigma_y(\Delta\varphi)$ tartományát [S2], [S5], [S8].

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_y(\Delta\varphi) &= \Phi_{\max}(\Delta\varphi) - \Phi_{\min}(\Delta\varphi) = \\ &= \left[f_r^{(0)}(\Delta\varphi) - f_p^{(0)}(\Delta\varphi) \right] + \sum_{k=1}^3 \left[f_r^{(2k-1)}(\Delta\varphi) - f_p^{(2k-1)}(\Delta\varphi) \right] - \\ &- \sum_{k=1}^3 \left[f_r^{(2k-1)}(\Delta\varphi) \cdot e^{-\bar{\varepsilon} f_r^{(2k)}(\Delta\varphi)} - f_p^{(2k-1)}(\Delta\varphi) \cdot e^{-\bar{\varepsilon} f_p^{(2k)}(\Delta\varphi)} \right] \end{aligned}$$

- ahol: $f_{p/r}^{(i)}(\Delta\varphi)$ a ciklikus alakítási szilárdság alsó (p index) és felső (r index) határoló görbéinek leírására használt Lademo függvények együtthatóinak ($i=1 \dots 7$) alakváltozási amplitúdótól való függését leíró exponenciális függvények;
- $\Delta\varphi$ az alakváltozási amplitúdó;
- k a Lademo függvények együtthatóinak jelölésére használt páros és páratlan i indexek szétválasztására bevezetett szegédindex.

4. Az azonos terhelési irányban elvégzett mikrokeménység mérések és szakítóvizsgálatok kísérleti eredményei szerint a $\Delta\varphi = 0,4$ mértékű alakváltozási amplitúdóval és $\bar{\xi} = 0,1s^{-1}$ egyenértékű alakváltozási sebességgel szobahőmérsékleten végrehajtott többtengelyű kovácsolási kísérletek során az EN AW-6082 minőségű alumíniumötvözet keménysége a halmozott egyenértékű képlékeny alakváltozás közös tartományában a monoton alakváltozási viszonyokat jellemző keménységnél kisebb, és a képlékeny alakváltozás halmozódásával nem monoton változik. Az anyag szakítószilárdsága jellegét tekintve folytonosan növekszik 101MPa-ról 210MPa-ra, míg az intenzív képlékenyalakítás tartományában, azaz a másodiktól a tizedik alakítási lépésig, az alakíthatóságát jellemző szakadási nyúlása $21\pm 4\%$ körül stabilizálódik. A mérési eredmények szerint a többtengelyű kovácsoláskor megvalósuló ciklikus, nem monoton képlékeny alakváltozás során, a szobahőmérsékletű monoton képlékenyalakításnál általánosan tapasztaltakkal ellentétben, a szilárdságnövekedés nem jár együtt a keménység folytonos növekedésével [S5].

5 A különböző alakváltozási amplitúdóval és $\bar{\xi} = 0,1s^{-1}$ egyenértékű alakváltozási sebességgel végrehajtott szobahőmérsékletű többtengelyű kovácsolási kísérletek eredményeképpen az EN AW-6082 minőségű alumíniumötvözet és a DD11 minőségű lágyacél durvaszemcsés mikroszerkezete az $\bar{\varepsilon} \cong 4$ mértékű halmozott egyenértékű képlékeny alakváltozás elérésével ultra-finomszemcsés struktúrává formálódik. Az ultra-finomszemcsés mikroszerkezetet felépítő szemcsék átlagos mérete kristályszerkezettől függetlenül, mindkét anyagminőségénél a $0,5...1,1\mu\text{m}$ -es tartományba esik. Az ilyen feltételek mellett létrejött ultra-finomszemcsés struktúrára és annak kialakulására az alábbi tulajdonságok jellemzőek [S2], [S3], [S5], [S9]:

- A $\Delta\varphi = 0,4$ mértékű alakváltozási amplitúdóval, 2, 4, 6, 8 és 10 lépésben kovácsolt, majd EBSD eljárással vizsgált DD11 minőségű lágyacél próbatestek 5° és 15° feletti orientációkülönbségű nagyszögű szemcsehatárokkal határolt kristallitjainak mérete az alakítási folyamat előrehaladásával folytonosan csökken, az $\bar{\varepsilon} \cong 4$ mértékű halmozott egyenértékű képlékeny alakváltozásnál eléri a $0,8$ illetve az $1,1\mu\text{m}$ -es átlagos szemcseméretet. A terhelési ciklusok számának növekedésével az 5° alatti orientációkülönbségű kisszögű szemcsehatárok hányada $28,5\%$ -ról $11,2\%$ -ra csökken, míg az 5° feletti orientációkülönbségű nagyszögű szemcsehatárok hányada $71,5\%$ -ról $88,8\%$ -ra növekszik.
- Az egyformán $\bar{\varepsilon} \cong 4$ mértékű halmozott egyenértékű képlékeny alakváltozásig, de eltérő alakváltozási amplitúdóval kovácsolt, TEM eljárással vizsgált EN AW-6082 minőségű alumínium próbatestek mikroszerkezete egyaránt ultra-finomszemcsés struktúrát mutat, azonban az alakváltozási amplitúdó növekedésével az átlagos szemcseméret $1,05\mu\text{m}$ -ről $0,45\mu\text{m}$ -re csökken, emellett a szemcseméret-eloszlás szórása, azaz a mikroszerkezet inhomogenitása is kisebb lesz.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S1] P. Berezki, V. Szombathelyi, G. Krállics, *Determination of flow curve at large cyclic plastic strain by multiaxial forging on MaxStrain System*, International Journal of Mechanical Sciences Vol. 84 (2014) pp. 182-188
- [S2] P. Berezki, G. Krállics, *Flow Curve Evolution during Cyclic Processing of Ultrafine Grained Aluminum Alloy by Multiaxial Forging*, Advanced Engineering Materials, DOI: 10.1002/adem.201400588 (online megjelent)
- [S3] P. J. Szabó, P. Berezki, B. Verő, *The Effect of Multiaxial Forging on the Grain Refinement of Low Alloyed Steel*, Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering Vol. 55/1 (2011) pp. 63-69
- [S4] P. Berezki, B. Fekete, V. Szombathelyi and F. Misjak, *Different Applications of the Gleeble® Thermal-Mechanical Simulator in Material Testing, Technology Optimization and Process Modelling*, ASTM International Journal on Materials Performance and Characterization, DOI: 10.1520/MPC20150006 (online megjelent)
- [S5] P. Berezki, V. Szombathelyi and G. Krállics, *Production of ultrafine grained aluminum by cyclic severe plastic deformation at ambient temperature*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Vol. 63 (2014) 012140
- [S6] P. Berezki, B. Verő, Zs. Csepeli, B. Fekete, *Thermomechanical process simulations with Gleeble 3800 physical simulator at College of Dunaujváros, XXXIII. Verformungskundliches Kolloquium, Zauchensee, Austria, 15.3-18.3.2014*, pp. 18-23., ISBN 978-3-902078-19-3
- [S7] Berezki P., Verő B., Janó V., *Többtengelyű hidegalakítási kísérletek*, Bányászati és Kohászati Lapok, 146. évf. (2013/2) pp. 31-37
- [S8] Berezki P., Krállics Gy., *Ciklikus folyási feszültség meghatározása alumínium többtengelyű kovácsolásakor*, Bányászati és Kohászati Lapok, 147. évf. (2014/5-6) pp. 6-10
- [S9] Szabó P. J., Berezki P., *Intenzív alakítási és hőkezelési folyamatok mikroszerkezetre gyakorolt hatásának értelmezése visszaszórtelektron-diffrakcióval*, Bányászati és Kohászati Lapok, 146. évf. (2013/3) pp. 42-47