

A könyöksajtolás elmélete és gyakorlata

A dolgozat átfogó képet ad a könyöksajtolás (ECAP – Equal Channel Angular Pressing) elméletéről és gyakorlatáról. A színes plasztillennel, plexiüvegből készült szerszámban végzett modellkísérletek alapján a könyöksajtolás közben lejátszódó alakváltozás jellege válik érthetővé. A folyamat analitikus (matematikai) szimulációja tökéletesen visszaadja a plasztillines kísérletek eredményeit. A folyamat végeselemes szimulációja az alakváltozási mechanizmus mélyebb megértését szolgálja. Ismertetjük a 90°-os és a 110°-os sajtoló szerszám kialakítását és méretezési szempontjait. Az OFHC-rézrel végzett kísérletek eredményeinek bemutatása a fejlesztés sikerességének jó bizonyítéka.

Bevezetés

A könyöksajtolás (ECAP – Equal Channel Angular Pressing) a nagy nyomáson végzett csavarás mellett (HPT – High Pressure Torsion) a leggyakrabban alkalmazott intenzív képlékeny alakító eljárás, amely mintegy 30 éve áll a kutatók érdeklődésének középpontjában. A mind a mai napig tartó, sőt egyre fokozódó érdeklődésnek minden bizonnyal az az egyik oka, hogy ezekkel az eljárásokkal ultrafinom és/vagy nanoszemcsés tömbi fém anyagok (munkadarabok) állíthatók elő.

Az ultrafinom és/vagy nanoszemcsés állapothoz vezető folyamatok, illetve magának ennek az állapotnak a kutatása képezte a Dunaújvárosi Főiskola TÁMOP-4.2.2-08/1/2008-0016 „A régió és a Dunaújvárosi Főiskola választai az anyagtudomány és technológia új kihívásaira” projektjének egyik kutatási részterületét, amelynek címe „Ultrafinom és nanoszerkezetű tömbi anyagok szemcseszerkezete és tulajdonságai közötti kapcsolat, továbbá a domináns hatásmechanizmusok kutatása” volt. Ebben a dolgozatban ennek a kutatási tevékenységnek egyik szegmensével, a könyöksajtolás elméleti hátte-

rével és gyakorlati megvalósításával foglalkozunk.

A dolgozat a következő részekre bontható:

- modellanyaggal végzett demonstrációs könyöksajtóási kísérletek;
- a könyöksajtolás közben lejátszódó alakváltozás mechanikája analitikus és VEM-es megközelítésben;
- a könyökrészekben bontható könyöksajtoló szerszám tervezése és megvalósítása;
- a könyöksajtolás technikai megvalósítása;
- OFHC-réz könyöksajtóása szobahőmérsékleten, az alakított minták vizsgálati eredményei;
- a könyöksajtolt rézmintákban lejátszódó újrakristályosodási folyamatok egyes részleteinek kísérleti vizsgálata.

1. A könyöksajtolás, mint egy intenzív képlékeny alakító eljárás

A nanokristályos anyagok iránti érdeklődés elsősorban a szerkezetük egyedülálló fizikai és mechanikai tulajdonságainak köszönhető. Elő-

Dr. Molnár László 1997-ben szerzett okleveles gépészmérnöki diplomát a BME Gépészmérnöki Karán matematikus-mérnök szakon. Ugyanott 2002-ben PhD-fokozatot szerzett. Kutatási területe a szilikon anyagú fémmechanikai elemek és szerkezetek modellezése. 2000–2010-ig a BME Gépészmérnöki Karán a Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék oktatója, egyetemi docense. 2011 őszétől a Dunaújvárosi Főiskola tudományos munkatársa. A Dunaújvárosi Főiskolán futó TÁMOP 4.2.2. projektben, mint kutató munkacsoport tagként vett részt. Feladata a projekt számítógépes szimulációval történő támogatása. Közel 50 publikáció szerzője és társszerzője.

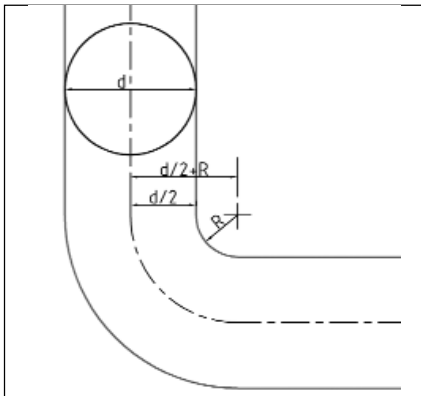
Dr. Gonda Viktor 1997-ben szerzett gépészmérnöki diplomát a Dunaújvárosi Főiskolán, majd 2001-ben egyetemi oklevelet a BME Gépészmérnöki Karán. 2002-től a Philipsnél kutatómérnökként elektronikai anyagok termomechanikai

modellezésével foglalkozik. 2008-ban doktorált a Delfti Műszaki Egyetemen, témája lézeres felületi hőkezelés. 2009-től dolgozik a Dunaújvárosi Főiskola Műszaki Intézetében főiskolai docensként. Jelenlegi kutatási témája fémek intenzív képlékenyalakítása könyöksajtóással.

Valenta László 1994-ben szerzett gépészmérnök diplomát a BME-n. 1998-tól 2005-ig a BME-n egyetemi tanársegéd, majd adjunktus, 2005-től a Dunaújvárosi Főiskola oktatója. Itt főiskolai docensként először a Gépészeti, majd az Anyagtudományi és Gépészeti, jelenleg pedig a Gépészeti Intézet igazgatója. Az intézeti elfoglaltságai mellett először a DuRATT menedzser-igazgató helyettese, majd később menedzser igazgatója. Több, a Dunaújvárosi Főiskolához köthető TÁMOP és TIOP projekt részvevője. 2010-től a Magyar Anyagtudományi Egyesület és a GTE tagja. PhD-témájának címe „Finommechanikai szerkezetek és nyúlásmérő

szenzor szilikon elasztomer felhasználásával”. Mintegy 80 publikáció, 4 könyv, és több szabadalom szerzője, társszerzője.

Bodnár Viktória 2003-ban szerzett anyagmérnöki diplomát a Veszprémi Egyetem Mérnöki Karán. 2003-tól a Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológia Intézet tudományos munkatársa. 2011. szeptembere óta a Dunaújvárosi Főiskola oktatója. 2011. decemberében a BME Gépészmérnöki Kar Gépészeti tudományok tudományág, műszaki tudományok tudományokon PhD-pályázatát elfogadták, melynek témája: „Fém-kerámia nano- és mikrokompózit rétegek in situ előállítása lézersugaras technológiával”. A Dunaújvárosi Főiskolán futó TÁMOP 4.2.2. projektben, mint kutató munkacsoport tagként vett részt, elsősorban az intenzív képlékeny alakításon átesett anyagok metallográfai vizsgálatával foglalkozott. Mintegy 20 publikáció szerzője és társszerzője.



■ **1. ábra.** A két, egymással 90°-ot bezáró csatorna adott R belső görbületű sugárral való kialakításának módja

állításukra többféle módszer született, pl. amorf anyagok kristályosítása, elektrokémiai leválasztás, nanoporok tömörítése stb. Nagy térfogatú nanokristályos anyagok előállításának egy igen hatékony módja a tömbi anyag nagymértékű képlékeny alakítása (angolul: SPD – Severe Plastic Deformation). Az SPD előnye pl. a porkohászati eljárásokhoz képest, hogy nincs maradó porozitás és a kiindulási por őrléséből származó szennyeződés. Az így előállított fémek nagy térfogatuk következtében közvetlenül felhasználhatók pl. alkatrészek gyártására.

Az SPD módszereknél alkalmazott deformáció akár több száz százalékos, így annak eredményeként a mikroszerkezet ún. ultrafinom szemcsés lesz. Az ilyen finomszerkezet kialakítására alkalmas SPD eljárás egyike a könyöksajtolás.

A könyöksajtolást az 1980-as évek első felétől alkalmazzák. A módszert Segal és munkatársai [1, 2] fejlesztették ki. A céljuk az volt, hogy a minta keresztmetszetének megváltoztatása nélkül képlékeny deformációt hozzanak létre a fémekben, és a folyamat periodikusan ismételhető legyen. Az 1990-es évek elején továbbfejlesztették a módszert és SPD eljárásként kezdték alkalmazni mikrométer alatti, ill. nanométeres méretű szemcsékből álló szövetszerkezetek előállítására [3]. A sajtolandó mintákat kör vagy négyzet keresztmetszetű rudakból vágják le, hosszúságuk 50-100 mm közötti, és átmérőjük ill. átlójuk nem több 20 mm-nél. Az ECAP során a rúd alakú mintát egy speciális könyökszövön nyomják át, ahol a könyök bejövő és kimenő ágai azo-

nos keresztmetszetűek (1. ábra). Mivel a minta keresztmetszete megegyezik a csövekével, ezért a deformáció a két cső metszetsíkjában tiszta nyírással történik.

Bár a könyöksajtolással foglalkozó cikkek között található egy olyan dolgozat [4], amely pasztillinnel mint modellanyaggal végzett kísérletekről számol be, célszerűnek tartottuk olyan pasztillines modellkísérletek megtervezését és végrehajtását, amelyek egyértelműen bizonyítják a könyöksajtolás közben lejáráó alakváltozás tiszta nyírás jellegét. A következőkben ezt a modellkísérletet ismertetjük a KFKI-MFA által kiírt nanotechnológiai demonstrációs ötletpályázatra benyújtott és ott díjazott pályaművünk alapján [5].

1.1. A kísérlet pontos leírása

A könyöksajtoló szerszámot 20 mm vastagságú plexiüvegből készítettük el. A két félből álló szerszámba egymással 90°-ot bezáró, 10 mm átmérőjű csatornát alakítottunk ki, mégpedig úgy, hogy a csatorna keresztmetszete ne változzék, vagyis a csatorna középvonalára merőleges csatorna metszetek minden szelvényében 10-es átmérőjű körök legyenek. A szerszám két felét 15 db csavarral szorítottuk össze, hogy megakadályozzuk a modellanyagnak a két szerszámfél közé való „kiszajtolódását”. A csatorna kialakítására különös gondot fordítottunk. A csatorna egyenes szakaszainak kimunkálása nem okozott gondot. A két csatorna csatlakozását úgy oldottuk meg, hogy a gömbmaró középpontját egy $d/2+R$ sugarú körív mentén vittük végig a 1. ábra vázlatának megfelelően. A könyöksajtolási demonstrációs kísérletekhez a plexiüvegből készült sajtoló szerszámhoz nyomótüskére is szükség volt.

A könyöksajtoló szerszámmal végzett demonstrációs kísérletet színes pasztillinnel hajtottuk végre [5]. A célnak megfelelő hengeres próbatestek elkészítéséhez segédeszközöket kellett gyártanunk. Mivel a könyöksajtolás közben az anyag – legyen az modell, vagy valamilyen tényleges kísérleti anyag – lényegében intenzív nyírás deformációt szenved el, a modellanyagból kétféle próbatestet kel-

lett a jelenség demonstrálására készítenünk:

A típusú: olyan 10 mm átmérőjű, mintegy 60-70 mm hosszúságú hengeres próbatestet, amelynek tengelyvonalában kb. 3 mm átmérőjű, a próbatest többi részétől elütő színű, de azzal megegyező minőségű mag van.

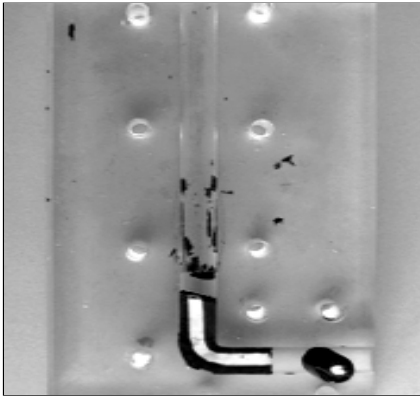
B típusú: olyan modellanyagból készült próbatestet, amely több, legalább 5-6 egymást követő, elütő színű, 10 mm hosszúságú darabból áll. A modellanyagból készült minta külső átmérője a plexiüveg szerszám csatornaátmérőjéhez illeszkedik.

Az előzőekben jellemzett próbatestek elkészítéséhez saválló lemezből készítettünk egy kb. 1 mm vastagságú peremmel ellátott „gyűrődeshkát”, és egy, kb. 30 mm átmérőjű ugyancsak saválló acélból készült hengert, illetve egy, a peremes „gyűrődeshkával” megegyező anyagi minőségű és méretű kis táblát.

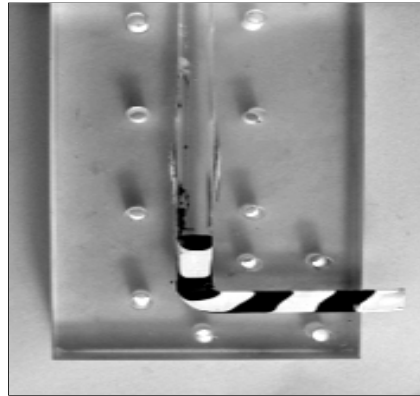
Az **A típusú** mintát úgy készítettük, hogy először – pl. a szintelen (fehér) pasztillinnél – 3 mm átmérőjű rudacskát hengereltünk, a peremes és a sima „deszka” segítségével. Ezután a peremes deszkára helyeztünk egy kézzel már egyenletesen elvékonyított pasztillindarabot – amely a jelen esetben barna színű volt – és a saválló hengerrel addig nyújtottuk, míg a további alakítást, nyújtást a perem már nem engedte.

Ezután a kb. 1 mm vastagságú barna színű pasztillinlemez egyik végét orvosi szikével vagy zsilippengével egyenesre vágtuk, majd erre a szélre helyeztük a fehér pasztillinnél készült 3 mm átmérőjű rudacskát. Ezután ezt a rudacskát a hozzátapadó pasztillinlemezrel együtt felgöngyöltítettük, mégpedig úgy, hogy a mintadarab külső átmérője a szerszám csatornájának átmérőjénél kisebb legyen. A próbatestet ezután a két saválló lemez között addig „hengereltük”, míg külső átmérője 10 mm nem lett.

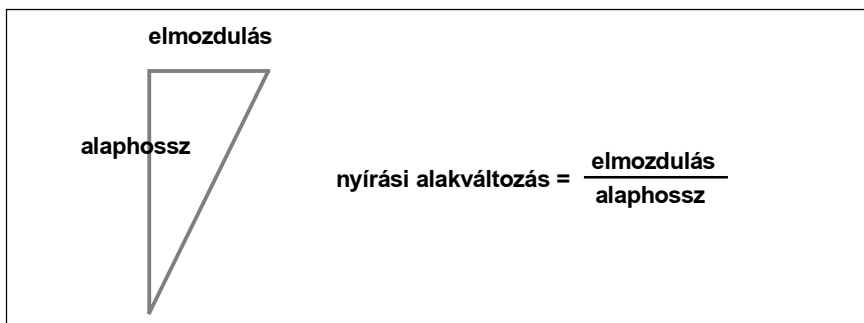
A **B típusú** próbatest elkészítése sokkal egyszerűbb volt. Két, egymástól eltérő színű pasztillinnél a saválló lemezek között 10 mm átmérőjű, 40-50 mm hosszúságú hengeres teste- ket hengereltünk, amelyeket lehűtött állapotban 10 mm hosszúságú dara-



■ **2. ábra.** Az 1. demonstrációs kísérletből származó A típusú minta hosszmet-szete



■ **3. ábra.** A 2. demonstrációs kísérlet B típusú mintájának hosszmet-szetéről készült felvétel



■ **4. ábra.** A nyírási alakváltozás meghatározása

bokra vágunk orvosi szikével vagy zsilippengével, ügyelve arra, hogy a vágási felület környezete ne deformálódjék.

A próbatest végül is már a szer-számban alakul ki, amikor a szer-szám hosszabb csatornájába juttatott, váltakozó színű darabok a sajtolóerő hatására összetapadnak

Az 1. demonstrációs kísérlet

Az 1. demonstrációs kísérletet az **A típusú**, belső maggal készített próba-**testtel** hajtottuk végre. A szer-számban kialakított csatornát a kísérlet megkezdése előtt szilikonzsírral bekentük, megakadályozandó a plexiüveg és a plasztilin közötti tapadást. A szer-szám két felét összeszorító csavarok meghúzása előtt a csatorna mindkét ágába annak átmérőjével megegyező átmérőjű, köszörült felületű rudat helyeztünk el, a két szer-számfél pontos illeszkedése érdekében. Az így előkészített ECAP szer-számba óvatosan belenyomtuk a modellanyagból készített mintát, majd a minta tetejére a szer-számcsatornába szorosan illeszkedő műanyagkorongot tettünk, a modellanyag sajtolás

közbeni visszaáramlásának elkerülése érdekében.

A sajtolás előtt a szer-számot a mintával együtt kb. 5 °C-ra hűtöttük. Ezután a hűtőszekrényből kivett szer-számot talpára állítva helyeztük a hidraulikus kézisajtó alaplapjára, majd a tüske behelyezése után elvégeztük a sajtolást úgy, hogy a mintának kb. 30-40 mm hosszúságú darabja jusson a vízszintes csatornába. A sajtolás közben a minta felületét a plexiüvegen keresztül megfigyelhettük, de azon semmilyen változást nem lehetett tapasztalni.

Az ECAP szer-számmal végzett sajtolás után a szer-számot kettévettük, ügyelve arra, hogy a próbatest a szer-szám egyik felében maradjon. Ezután a mintát egy – előzetesen szilikonzsírral bekent – zsilippengével a szer-szám belső felületének síkjában végigvagtuk, amikor is az **2. ábra** szerinti helyzetet figyelhettük meg.

A felvételen rögzített helyzet csak úgy képzelhető el, ha a minta csak nyíró alakváltozást szenvedett el, hiszen a belső mag centrikus elhelyezkedése szemmel láthatóan nem változott.

A 2. demonstrációs kísérlet

A kísérletet az 1. demonstrációs kísérlet ismertetésekor leírtak szerint hajtottuk végre. A modellanyagból készített próbatest ebben a kísérletben mintegy 12 mm hosszúságú, eltérő színű (fekete/fehér) plasztilindarabokból állt, amelyek a tengelyükre merőleges felületek mentén illeszkedtek egymáshoz. Az ECAP könnyősajtolás művelet közben a plexiüvegen keresztül meg lehetett figyelni ezeknek az eredetileg sík felületeknek a „megdőlést”, miközben a modellanyag áthaladt a szerszám merőleges illeszkedésű szakaszán.

A sajtolás után hossztenge-lyen mentén kettévágott próbatest a **3. ábra** szerinti képet mutatja.

A metszeti képen jól megfigyelhető, hogy a próbatest tengelyére eredetileg merőleges síkok megdőltek, az adott esetben kb. 45°-kal. Ez a helyzet csak úgy alakulhatott ki, hogy a csatorna belső oldalához közeli modellanyag a külső rész anyagához képest előresietett, vagy ez utóbbi hátra maradt a másikhoz viszonyítva. A modellanyagnak a két egymásra merőleges csatornaszakaszak a találkozásánál tapasztalt viselkedése szemléletes magyarázatot ad az ECAP során kialakuló, elnyújtott réteges szerkezet megjelenésének módjára [6]. A dőlésszögből egyszerű geometriai megfontolások alapján a nyírási és ebből az ún. egyenértékű alakváltozás is becsülhető [7].

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a plexiüvegből készült szer-számban modellanyaggal végzett demonstrációs kísérletek nagymértékben hozzájárultak az ECAP során lejátszódó alakváltozási mechanizmusok tisztázásához.

A modellkísérletek során tapasztalt jelenségek kvantitatív leírására a 2. fejezetben térünk vissza.

2. Az ECAP során létrejövő alakváltozás analitikus és véges elemes meghatározása (Dr. Gonda V.)

A könnyősajtolás közben lejátszódó folyamatok mechanikai elemzését Gonda V. [8] nyomán ismertetjük.

A könnyősajtolás során nagy mértékű nyíró alakváltozás jön létre a próbatestben. Ebben a fejezetben elő-

ször definiáljuk a nyíró és az egyenértékű alakváltozást. Bemutatjuk az alakváltozás meghatározását analitikus és vége-selemes módszerrel. Az elméleti számítások eredményeinek gyurmás modellkísérlettel való összehasonlítása után utalunk az alakváltozás mértékének és a szilárdságtani paramétereknek a kapcsolatára.

2.1. A nyírási alakváltozás és az egyenértékű alakváltozás definiálása

A nyírási alakváltozást az alaphosszra merőleges deformáció és az alaphossz hányadosaként definiáljuk (4. ábra), ha az alakváltozás kizárólag a nyírásból adódó torzulás.

Ha egy szilárd testen az x, y, z koordinátarendszerben $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ elmozdulásmező adott, akkor a nyírási alakváltozás a mérnöki jelöléssel az xy síkon a test egy pontjában az alábbi alakban adható meg:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

Az alakváltozás tenzoros írásmódjánál egyszerűbb a jelölés, ha ennek a felével definiáljuk a nyírási alakváltozást. Az nyírási alakváltozás tenzoros jelöléssel:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2)$$

Egy test alakváltozása nyírási (torzulási) és térfogati összetevőkből állhat. Az alakváltozási tenzor felírható a térfogati (volumetrikus) és a torzulási (deviációs) alakváltozások összegéként:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{vol} + \boldsymbol{\varepsilon}_{dev} \quad (3)$$

Ezt átrendezve, valamint a volumetrikus alakváltozást kibontva, a deviációs alakváltozási tenzor kifejezhető:

$$\varepsilon_{dev} = \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{1}{3} A_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ahol A_1 az alakváltozási tenzor első skalár invariánsa, mely a fő alakváltozások összege:

$$A_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (5)$$

Az egyenértékűség fogalmát

könnyebb először a feszültségekkel meghatározni: egy általános feszültségállapot és egy egytengelyű (húzásnak megfelelő) feszültségállapot akkor egyenértékű, ha ugyanolyan határállapotba juttatja az anyagot. A Mohr elmélet szerint, ez az összes terheléshez tartozó Mohr-körhöz berajzolt burkológörbe. Mivel ez a burkológörbe fémeknél a feszültségtengellyel párhuzamos egyenes, ezért az egyenértékű feszültséget a Mohr-kör átmérője adja (egytengelyű húzásnál ez egyenlő a maximális húzófeszültséggel). A párhuzamosságból következően az az állítás is megfogalmazható, hogy két feszültségállapot akkor egyenértékű, ha a legnagyobb csúszatófeszültség ugyanakkora (ez a Mohr kör sugara).

A Huber–Mises–Hencky (HMH) elmélet arra a megfigyelésre alapoz, hogy alakítható anyagoknál nagy hidrosztatikus nyomásnál sem jön létre károsodási határállapot, vagyis a térfogati alakváltozási munka nem játszik szerepet. Tehát a különböző feszültségi állapotok közül azok egyenértékűek, melyeknek a torzítási energiasűrűsége egyenlő. Ugyanezt az alakváltozásokra értelmezve: két alakváltozási állapot akkor egyenértékű, ha ugyanakkora a torzítási energiasűrűsége.

A HMH egyenértékű alakváltozás a deviációs alakváltozási tenzor segítségével felírható az alábbi alakban képlekeny állapotra térfogatállandóság esetén:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{dev} : \varepsilon_{dev}} \quad (6)$$

Ezt kibontva az egyenértékű alakváltozás megadható az alakváltozási összetevőkkel:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{xy}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{yz}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{zx}^2 \right)} \quad (7)$$

vagy a fő alakváltozásokkal is:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{1}{9} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (8)$$

Rugalmas esetre, ha az anyag összenyomható (a Poisson-tényező: $\nu < 0,5$):

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{\frac{1}{2} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (9)$$

Sík alakváltozás esetén ($\varepsilon_3 = 0$) az alábbi alakot kapjuk:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1^2]} = \sqrt{\frac{4}{9} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2)} \quad (10)$$

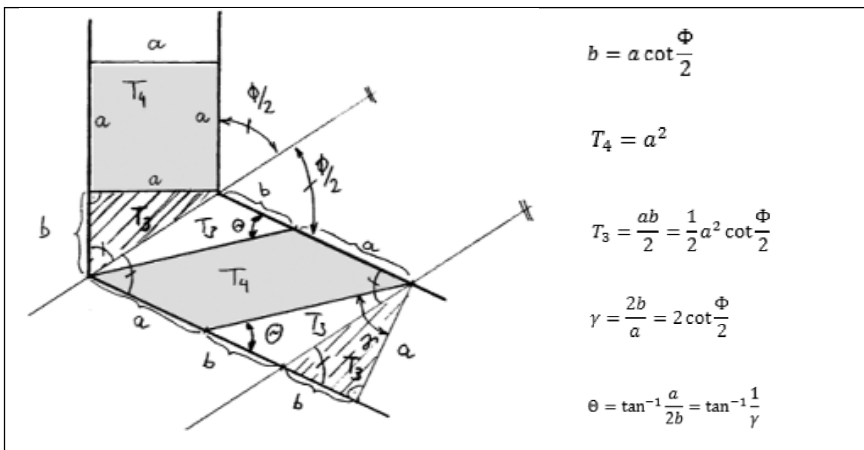
2.2. Különböző könyökgeometriákhoz tartozó alakváltozás mértéke

Az éles könyök geometriája

Könyöksajtolásnál az anyagot olyan szerszámon sajtoljuk át, mely két azonos keresztmetszetű csatornája Φ szög alatt metsződik. A Φ szög a csatornaszög.

Az 5. ábrán látható egy lekerekítés nélküli, „éles” könyök sematikus keresztmetszeti rajza, a csatorna szélessége a . Az átnyomás során a könyök előtti részen a szürke színnel kiemelt a oldalhosszúságú T_4 területű négyzet alakú anyagrészt a könyök fő nyírási síkja után a kilépő oldalon látható rombuszá torzul, melynek alapja és magassága is a méretű, így területe ugyancsak T_4 . A rombusz dőlt oldala a csatornával Θ szöget zár be, ez a dőlésszög. Amikor a belépő oldalon a négyzet alakú anyagrészt csatorna belső oldalán levő sarka eléri a könyököt, akkor a külső oldali sarkok még b távolságra van attól. Az ab befogójú derékszögű háromszög területe T_3 -mal jelölt. A könyökön éppen teljesen átsajtolt rombuszá torzult anyagrészt egyik külső oldali sarka még épp a könyökben van, az ezen az oldalon levő belső oldali sarkok a könyöktől b távolságra kell legyen, mivel az anyagáramlás állandó. A fő nyírási síkkal párhuzamos húzva a rombusz kilépő oldali sarkánál, egy ab befogójú derékszögű háromszög található, ennek területe T_3 . Egyszerűen bizonyítható a geometriából, hogy az a

alapú rombuszt ab alapú és a nyírási síkkal párhuzamos oldalú Φ szögű rombuszá kiegészítő háromszögek területe szintén T_3 , de ugyanennek következnie kell a térfogatállandóságából is. A nyírási alakváltozás a $2b$ és α befogójú háromszögben definiálható, amit az ábrán γ -val jelöltünk.



■ 5. ábra. Éles könyökben a jellegzetes hosszak, szögek és területek

A bevezetett geometriai adatok, a nyírási alakváltozás és dőlésszög a 5. ábra jobb oldalán található képletekkel számolhatók. A nyírási alakváltozást először [Segal, 1981] publikálta.

2.2.1. Az egyenértékű alakváltozás becslése könyöksajtolásnál Iwashashi-módszerével

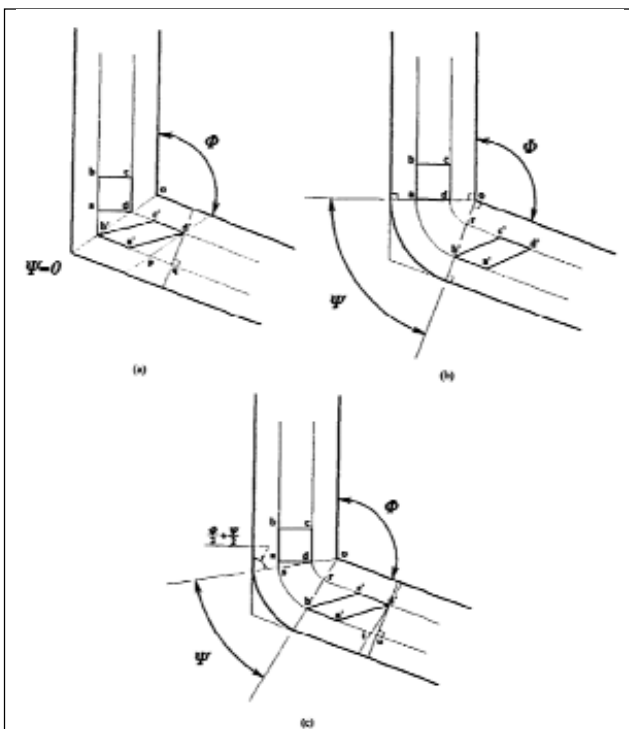
A könyöksajtolás az egyik legegyszerűbb intenzív képlékenyalakításon alapuló technika, amivel nagymértékű szemcsefinomodás létrehozható. A szemcsefinomodás, és ezáltal a szilárdságnövekedés, az átsajtolás so-

rán létrejövő nyomás alatti nagy mértékű nyírási alakváltozás következménye. A létrejövő egyenértékű alakváltozás becslését [9] publikálta, ez a megoldás az egyik legelfogadottabb manapság.

A könyöksajtolás alapelve sematikusán a 5. ábrán látható: két azonos keresztmetszetű csatorna középvonala egy adott Φ szög alatt metsződik, ez a csatomszög. Az átsajtolás elvégezhető „éles” könyök esetén, lásd. 6(a) ábra, vagy olyan elrendezésben, ahol a könyök külső oldala lekerekített, ami a 6(b) és 6(c) ábrákon látható. Ha külső oldalon a lekerekítés szögét Ψ -vel jelöljük (könyökszög), akkor a könyökszög határértékei az éles könyöknél az 6(a) ábrán: $\Psi = 0$, teljesen lekerekítettél pedig a 6(b) ábrán: $\Psi = \pi - \Phi$, az 6(c) ábrán pedig egy közbelső állapotot látunk, ahol a könyökszög a két határérték között helyezkedik el.

A továbbiakban az alakváltozás meghatározásához ezt a három esetet vizsgáljuk, valamint feltételezzük, hogy az átsajtolásnál a csatorna kent, így a súrlódás elhanyagolható.

A továbbiakban az alakváltozás meghatározásához ezt a három esetet vizsgáljuk, valamint feltételezzük, hogy az átsajtolásnál a csatorna kent, így a súrlódás elhanyagolható.



■ 6. ábra. A könyöksajtolás sematikus vázlata: Φ a csatomszög, Ψ a könyökszög.
(a): $\Psi = 0$, (b): $\Psi = \pi - \Phi$, (c): $0 < \Psi < \pi - \Phi$.

Éles könyök

A 6(a) ábra, $\Psi = 0$, a minta egy kezdetben négyzet alakú elemét $abcd$ -vel jelöltük, az átnyomás után az elnyírt alak $a'b'c'd'$ -vel jelölt.

A 6(a) ábra jelöléseit használva a nyírási alakváltozás, γ , a következő alakban írható fel:

$$\gamma = \frac{a'q}{qa'} \quad (11)$$

ahol:

- $qd' = ad$ vagyis a folyási irányra merőleges méret nem változik,
- $a'q$ meghatározása pedig a geometriai vizsgálatból történhet:
o $ab' = dc'$, az áramlási sebesség állandó az egyes szálaikon, ez tovább egyenlő
o $ab' = dc' = a'p = pq = ad \cot(\Phi/2)$, az $ab'd$ háromszög és a pqd' háromszög hasonlóságából, ezt átrendezve:
o $a'q = 2ad \cot(\Phi/2)$.

Visszahelyettesítve a $\Psi = 0$ esetre a nyírási alakváltozásra megkapjuk a Segal-megoldást [2]:

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2}\right) \quad (12)$$

Teljesen lekerekített könyök

A 6(b) ábrán, ahol $\Psi = \pi - \Phi$, a nyírási alakváltozás a következőképpen írható fel:

$$\gamma = \frac{rc'}{rb'} \quad (13)$$

ahol:

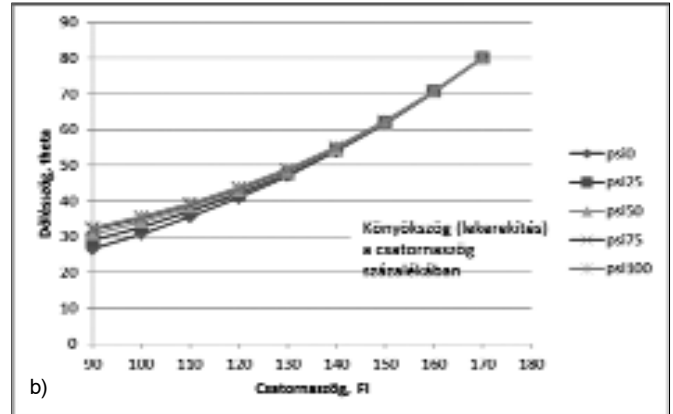
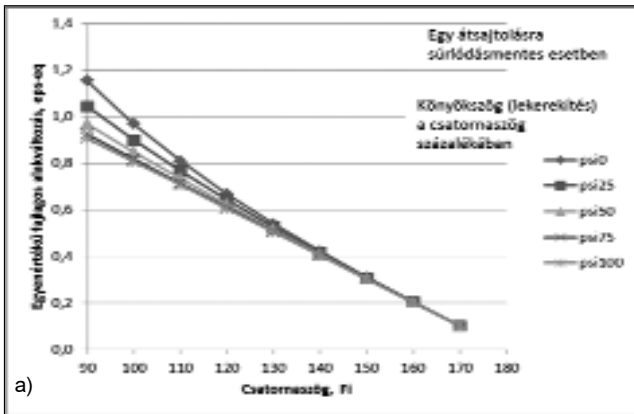
- $rb' = da = (oa - od)$ vagyis a folyási irányra merőleges méret nem változik,
- $a'q$ meghatározása pedig a geometriai vizsgálatból történhet:
o $ab' = dc'$, az áramlási sebesség állandó az egyes szálaikon,
o $ab' = oa \cdot \Psi = (rc' + od \cdot \Psi)$, az egyes szálaikon az ívhossz, ezt átrendezve:
o $rc' = (oa - od)\Psi$.

Visszahelyettesítve, a nyírási alakváltozás:

$$\gamma = \Psi \quad (14)$$

Nem teljesen lekerekített könyök

Az 6(c) ábrán, ahol $0 < \Psi < \pi - \Phi$, a



■ 7. ábra. Az egyenértékű alakváltozás (a) és az átnyomás utáni dőlésszög (b) a csatornaszög és a könyökszög függvényében, egy átnyomás esetére.

nyírási alakváltozás a következőképpen írható fel:

$$\gamma = \frac{a'u}{d'u} \quad (15)$$

ahol:

- $d'u = ad$, vagyis a folyási irányra merőleges méret nem változik,
- $a'u$ meghatározása pedig a geometriai vizsgálatból történhet:
 - o $a'u = a't + tu = rc' + as$, az áramlási sebesség állandó az egyes szakakon,
 - o az egyes szakakon az utak:
 - $as = ad \cot(\Phi/2 + \Psi/2)$
 - $ab' = dc' = as + od \cdot \Psi$
 - $os - od = ad \operatorname{cosec}(\Phi/2 + \Psi/2)$, visszahelyettesítve:
 - o $a'u = 2ad \cot(\Phi/2 + \Psi/2) + \Psi ad \operatorname{cosec}(\Phi/2 + \Psi/2)$.

Visszahelyettesítve, a nyírási alakváltozás általános alakban:

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \quad (16)$$

Ez az egyenlet általánosan használható, az éles és teljesen lekerekített könyök peremfeltételeivel az ott levezetett nyírási alakváltozást megkapjuk.

Az egyenértékű alakváltozás, ε_{eq} egy átnyomás esetén meghatározható az 7. egyenlet alapján, ez az Iwahashi-képlet:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \quad (17)$$

Többszöri, n számú átsajtolás esetén:

$$\varepsilon_n = n \varepsilon_{eq} \quad (18)$$

Az egyenértékű alakváltozás egy átnyomásnál értelmezhető a nyomtűske által bevitt felületi nyomás, P és az anyag folyáshatárának, Y hányadosaként:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{P}{Y} \quad (19)$$

Az egyenértékű alakváltozást az 1. táblázatban szereplő szögekre számítottuk ki. Az eredményeket a 7a ábrán ábrázoltuk a csatornaszög függvényében egy átsajtolásra. Minél kisebb a csatorna szöge, annál nagyobb alakváltozás érhető el egy lépésben. Derékszög esetén az elérhető egyenértékű alakváltozás 0,9 teljesen lekerekített könyöknél, és közel 1,2 éles könyöknél.

A dőlésszöget, θ -t a kilépő oldalon az átnyomott próbatestnek a vízszintes csatornafallal bezárt szögével értelmezzük és a

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1}{\gamma} \quad (20)$$

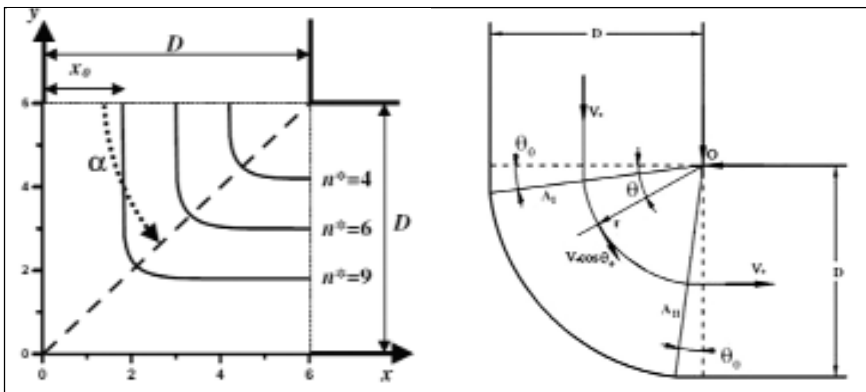
képlettel számoltuk, és a 7b ábrán látható a csatornaszög függvényében. Derékszögű csatornában a létrejövő dőlés 27-32 fok a könyökszög függvényében.

1. táblázat. Az egyenértékű alakváltozás számításához használt csatorna- és könyökszög fokban (a), egy átsajtolás esetén az egyenértékű alakváltozás (mértékegység nélkül) (b) és a létrejövő dőlésszög fokban (c).

szögek	csatorna	90	100	110	120	130	140	150	160	170
könyök	ps0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ps25	22.50	20.00	17.50	15.00	12.50	10.00	7.50	5.00	2.50
	ps50	45.00	40.00	35.00	30.00	25.00	20.00	15.00	10.00	5.00
	ps75	67.50	60.00	52.50	45.00	37.50	30.00	22.50	15.00	7.50
	ps100	90.00	80.00	70.00	60.00	50.00	40.00	30.00	20.00	10.00

eps-eq	90	100	110	120	130	140	150	160	170
ps0	1.1547	0.9689	0.8085	0.6667	0.5384	0.4203	0.3094	0.2036	0.1010
ps25	1.0442	0.8994	0.7661	0.6419	0.5250	0.4137	0.3067	0.2028	0.1009
ps50	0.9691	0.8492	0.7339	0.6224	0.5140	0.4082	0.3045	0.2022	0.1008
ps75	0.9232	0.8175	0.7130	0.6094	0.5066	0.4045	0.3029	0.2017	0.1008
ps100	0.9069	0.8061	0.7054	0.6046	0.5038	0.4031	0.3023	0.2015	0.1008

dőlésszög	90	100	110	120	130	140	150	160	170
ps0	26.57	30.79	35.53	40.89	47.00	53.95	61.81	70.57	80.08
ps25	28.94	32.70	37.00	41.97	47.72	54.38	62.02	70.64	80.08
ps50	30.78	34.21	38.19	42.85	48.32	54.74	62.19	70.70	80.09
ps75	32.02	35.23	39.00	43.45	48.73	54.99	62.32	70.74	80.10
ps100	32.48	35.61	39.30	43.68	48.89	55.08	62.36	70.76	80.10



■ 8. ábra. A könyöksajtolás vázlatja és a sebességmező Tóth (a) és Eivani (b) szerint

Lekerekített könyök belső rádiusszal

Az előző megoldásokban a belső rádiusz mindig zérus volt, azonban érdemes megvizsgálni azt az esetet, ha a csatorna belső oldalán is lekerekítés található, ugyanis ha a csatorna kimunkálása marással történik, akkor ez a geometria adódik, amit azt a modellkísérlet plexi szerszámánál is láttunk. Ennek megfelelően azt az esetet vizsgáljuk, amikor a belső rádiusz r_b , és a csatorna keresztmetszetének mérete a , így a külső rádiusz $r_b + a$. A nyírási alakváltozás meghatározásához meg kell határozunk, hogy a belső oldalon mennyivel „siet” az anyag, ezt az előzőekben b -vel jelöltük. Ezt számíthatjuk a könyök belső és külső oldalán az ívhosszak különbségével. Derékszögű csatornák esetén a belső és a külső oldalon az ívhossz:

$$i_b = r_b \frac{\pi}{2} \quad (21)$$

$$i_k = (r_b + a) \frac{\pi}{2} \quad (22)$$

Az ívhosszak különbsége felírható az alábbi alakban:

$$i_k - i_b = (r_b + a - r_b) \frac{\pi}{2} = a \frac{\pi}{2}, \quad (23)$$

amiből látszik, hogy az független a belső átmérőtől, így a nyírási alakváltozás

$$\gamma = \frac{i_k - i_b}{a} = \frac{a \frac{\pi}{2}}{a} = \frac{\pi}{2}$$

is független attól, és ennek mértéke megegyezik a belső rádiusz nélküli teljesen lekerekített csatornában létrejövő alakváltozás mértékével, vala-

mint a dőlésszögek is megegyeznek:

$$\tan \theta = \frac{a}{a \frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi} \Rightarrow \theta = 32,48^\circ \quad (24)$$

2.3. A könyöksajtolás áramlási modellje és nem monotonitás foka

Több alakítási technológiát, köztük a könyöksajtolást is vizsgálta Bobor Kristóf [10] nem monotonitás szempontjából. A nem monotonitás foka (DNM) azt mutatja meg, hogy mennyire erőteljes a nyírási alakváltozás egy technológiában. A DNM számításához szükséges az anyagáramlási mező meghatározása, mely történhet analitikus vagy véges elemes módszerrel. Az elemzésből a könyöksajtolásról szóló részt mutatjuk be, a technológia áramlástani leírását kiemelve, hogy az egyenértékű alakváltozás az áramlási sebességekkel is kifejezhető.

Az könyökgeometriákat a 6. ábrán mutattunk be az előzőekben. Az áramlási modellt éles és lekerekített 90 fokos csatorna esetére írjuk fel két féle módon. A [11] és az [12] modellben alkalmazott jelölések az 8. ábra vázlatán láthatók. Részletes elemzést az Eivani esetre mutatunk be.

A bemenő és kimenő csatornában az anyag áramlási sebessége v_0 . A HMH elmélet szerinti egyenértékű alakváltozás a tangenciális és normál irányú sebességek hányadosával megadható az alábbi alakban

$$\varepsilon_{\text{eq}} = \frac{\Delta v_t}{\sqrt{3} v_n} \quad (25)$$

ahol $\Delta v_t = v_0 \sin \theta_0$ és $v_n = v_0 \cos \theta_0$.

A DNM paraméter, μ , ugyancsak megadható a sebességmező ismeretében [10]:

$$\mu = \frac{\Delta v_t}{2 v_n} \quad (26)$$

Az egyenértékű alakváltozás a DNM paraméter között a

$$\mu = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_{\text{eq}} \quad (27)$$

összefüggés áll fenn, a teljes folyamat során az alakváltozás nyíró jellegű, az egyszerű nyírással megegyező mértékben tér el a monoton alakváltozástól.

A könyökben, a könyökszög alatti tartományban a sebesség az 8. ábrán látható módon írható fel hengerkoordináta-rendszerben Eivani szerint. A be- és kilépésnél az A_I és A_{II} szakadó felületeken való átlépéskor az alakváltozás felírható:

$$\varepsilon_{\text{eq}}^{A_{II}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \tan \theta_0 \quad (28)$$

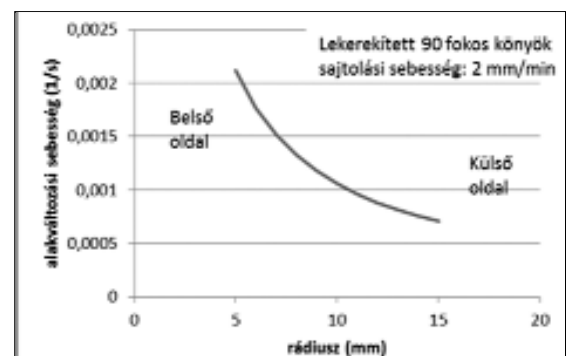
A két szakadó felület közötti deformációs zónában az alakváltozás:

$$\varepsilon_{\text{eq}}^{\text{cs}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\pi}{2} - 2\theta_0 \right) \quad (29)$$

Az alakváltozás mértéke független attól, hogy a keresztmetszet melyik pontját vizsgáljuk, tehát az alakítás mértéke egyenletes az egész keresztmetszetben.

Az A_I felületen történő belépéstől az A_{II} felületen történő kilépésig teljes alakváltozás egy átnyomáskor:

$$\varepsilon_{\text{eq}} = \varepsilon_{\text{eq}}^{A_I} + \varepsilon_{\text{eq}}^{\text{cs}} + \varepsilon_{\text{eq}}^{A_{II}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\pi}{4} + \tan \theta_0 - \theta_0 \right) \quad (30)$$



■ 9. ábra. Az alakváltozási sebesség a rádiusz függvényében lekerekített könyök esetén

A DNM paraméter értéke ekkor:

$$\mu = \frac{\pi}{4} + \tan \theta_0 - \theta_0 \quad (31)$$

Az alakváltozási sebesség becslése

Az alakváltozási sebesség az alakváltozás mértéke és végbemeneteléhez szükséges idő hányadosaként definiált:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \quad (32)$$

A könyöksajtolásnál az alakváltozás mértéke az előzőekben levezetett egyenértékű alakváltozás, amely állandó:

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{sq} = \text{const} \quad (33)$$

Ezen kívül az átsajtolási sebesség is állandó:

$$v = \text{const} \quad (34)$$

Lekerekített könyök esetén az alakváltozás a könyök legyező alakú részében játszódik le, a szükséges idő az ívhossztól függ:

$$\Delta t = \frac{i}{v} = \frac{r\Phi}{v} \quad (35)$$

Ebből az alakváltozási sebesség felírható:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \varepsilon_{sq} v \frac{1}{r\Phi} \quad (36)$$

Lekerekített könyök esetén az alakváltozási sebesség a keresztmetszetben belülről kifelé haladva csökken, a jellege hiperbolikus (9.

ábra). A gyakorlatban a súrlódás hatásától kívül eső részen 2-3-szoros alakváltozási sebesség különbség van.

Éles könyök esetén az alakváltozás a fő nyírási síkban játszódik le, amelynek kiterjedése az áramlási irányra merőlegesen zérus, ebből az következne, hogy az alakváltozási sebesség végtelen nagy, másrészt az is megállapítható, hogy az alakváltozási sebesség a keresztmetszetben állandó.

Végeselemes modellezéssel megmutatható, hogy az alakváltozási zóna kiterjedése mekkora, durva közelítéssel ez vehető a csatornaméret 20%-ának. Tipikusan az éles könyökben kb. 5-ször nagyobb a létrejövő alakváltozási sebesség, mint a teljesen lekerekített könyökben. A 110 fokos éles könyökben 2 mm-es alakváltozási zónát feltételezve 0,013 1/s.

2.4. A könyöksajtolás kétdimenziós végelelemes modellje

A könyöksajtolás végelelemes modellezésével a kiindulási alaphoz használt analitikus modellnél a valósághoz jobban közelítő mechanikai modellt hozunk létre, melynek használatával két fontos mechanikai paraméter, a fajlagos alakváltozás mező és a fajlagos alakváltozási sebesség mező kialakulását és lefolyását vizsgáljuk különböző könyökgeometriák esetén az alábbi feladatok megoldásával:

1. A könyöksajtolás kontinuummechanikai analíziséből meghatározzuk a 110 fokos éles és 90 fokos lekerekített könyökgeometria

esetén az egyenértékű fajlagos alakváltozás nagyságát, valamint megbecsüljük az átlagos fajlagos alakváltozási sebesség nagyságát. A mechanikai modell ideálisan képlékeny, a súrlódás hatásától eltekintünk.

2. A könyöksajtolás végelelemes modelljét az említett két könyökgeometriához hozzuk létre súrlódásmentes és súrlódásos esetben, és vizsgáljuk a létrejövő teljes deformációt a munkadarabon ideálisan rugalmas, képlékenykeményedő anyagmodell esetén. A fajlagos alakváltozási mezőt számítjuk, ami az elérhető intenzív képlékeny alakítás mértékét mutatja, valamint a fajlagos alakváltozási sebesség mezőt vizsgáljuk, ami az intenzív képlékeny alakítás helyét mutatja.

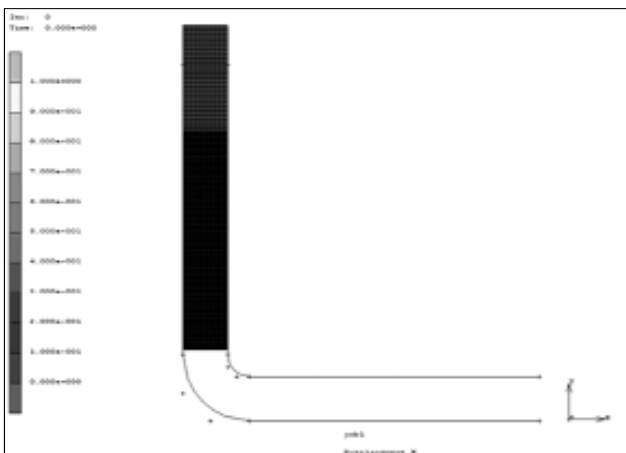
2.4.1. A modellezés folyamata

Kétféle csatorna geometriát modelleztünk, az egyik 90°-os csatornaszögű, teljesen lekerekített (10. ábra), a másik 110°-os csatornaszögű éles könyök (11. ábra). A csatornaméret mindkét esetben 10 mm.

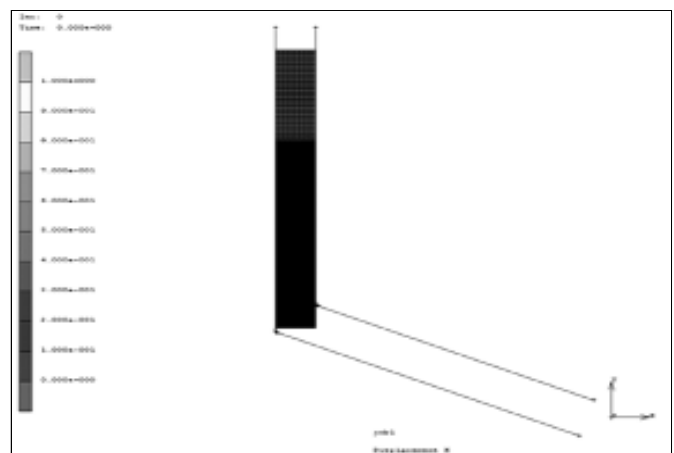
Az éles könyök modelljében, a könyökben 1 mm-es lekerekítést (12. ábra) kellett alkalmazni a szimuláció stabil futása érdekében.

A valós próbatest 10 mm-es átmérőjű, 80 mm hosszú, aminek a keresztmetszetét modelleztük síkalakváltozás esetére. A modell hálózása a 13. ábrán látható.

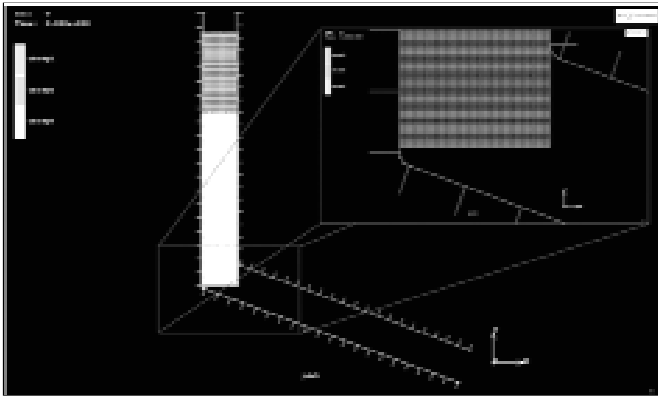
A sajtoló csatornát merev testként modelleztük, azaz a csatorna maga nem deformálódhat, a csatorna sík-



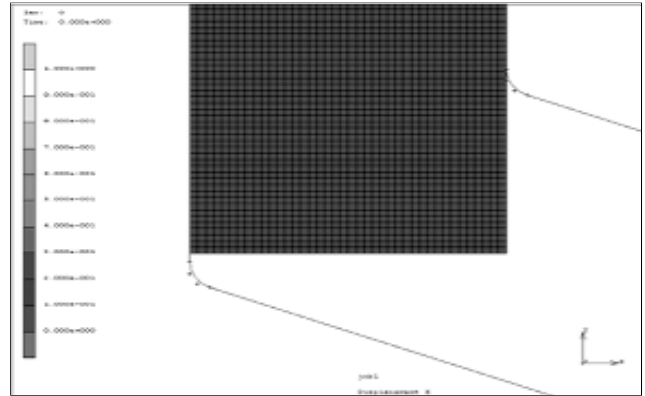
■ 10. ábra. 90°-os, teljesen lekerekített könyök kialakítás



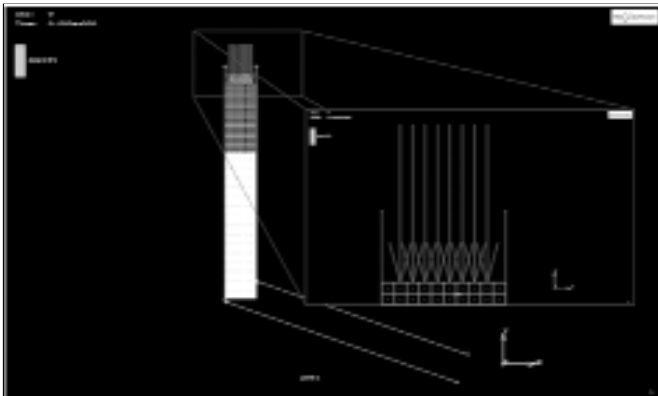
■ 11. ábra. 110°-os, éles könyök kialakítás



■ 12. ábra. 1 mm-es lekerekítés a stabil futás érdekében



■ 13. ábra. Rácsos felosztás



■ 14. ábra. 2 mm/perc előtolás a próbatest felső csomópontjaira

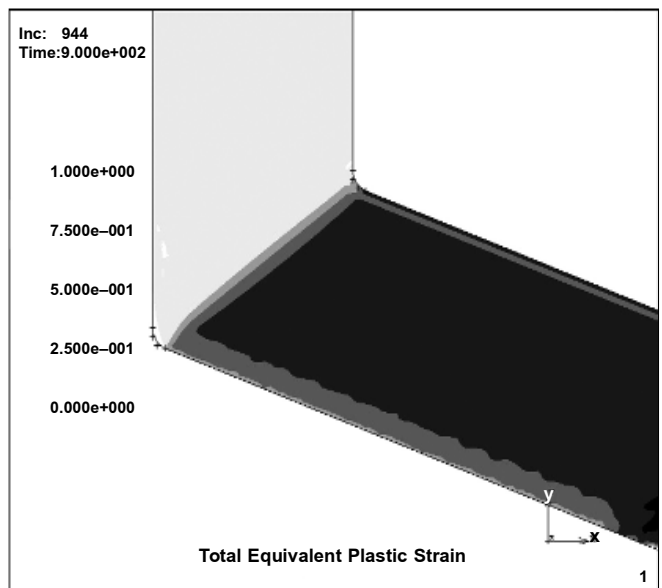
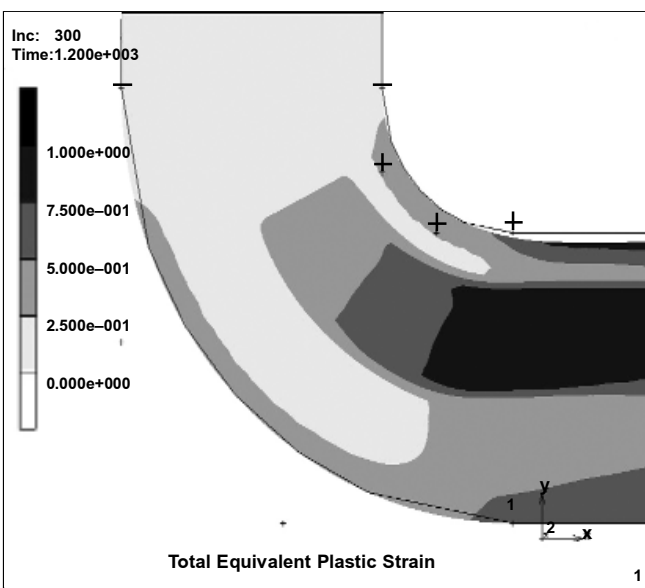
beli metszetét a külső és belső oldalon egy-egy görbével rajzoltuk be. A 90°-os csatorna belső oldalán a lekerekítési sugár 5 mm, a külső oldalon 15 mm. A próbatest anyagát ideálisan rugalmas, ideálisan keményedő, alakváltozási sebesség érzéketlen anyagmodellel írtuk le. A rézre vonatkozó anyagjellemzőket használtuk:

teke 2 mm/perc. Ezt az előtolást a próbatest bemenő csatorna felőli végének felületén elhelyezkedő csomópontokra időben változó eltoládként alkalmaztuk. A szimulációban összesen maximum 40 mm-nyi átsajtolást futtatunk, az ehhez tartozó időtartam 1200 másodperc. A szimulációt az egyenértékű alak-

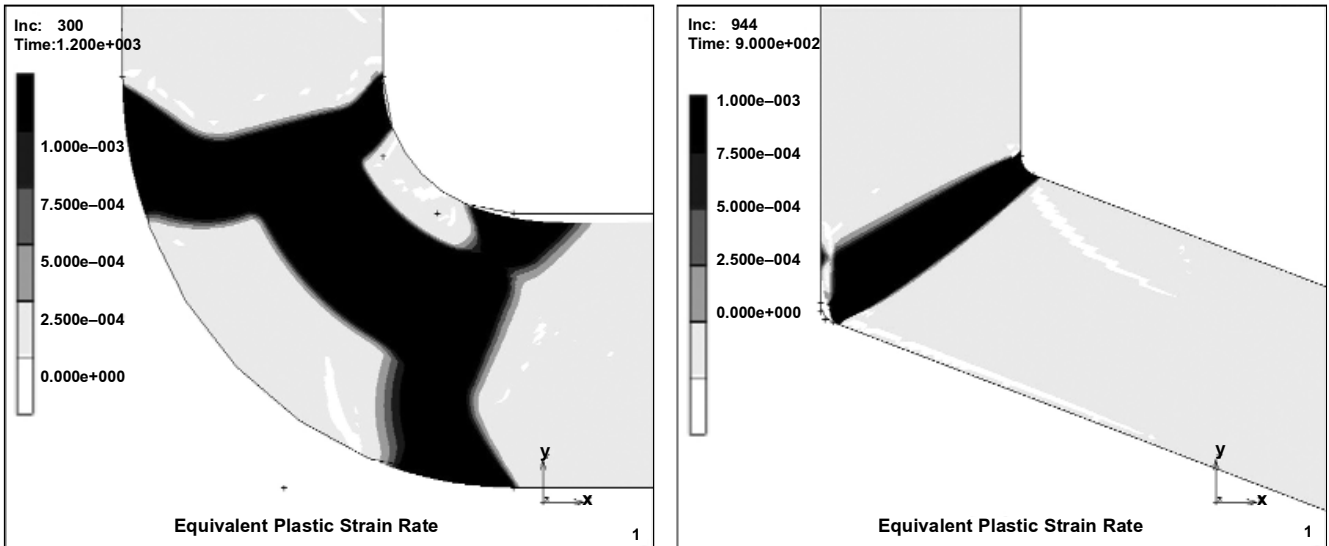
változási mező és az egyenértékű alakváltozási sebesség mező kiértékeléséhez futtatjuk.

2.4.2. Az egyenértékű alakváltozási mező és az egyenértékű alakváltozási sebesség kiértékelése

A szimuláció sikeres futtatása után először az egyenértékű alakváltozási mezőt vizsgáltuk mindkét csatornakialakítás esetén. Sűrűdásmentes esetben (15. ábra) az éles könyökkialakításnál az alakváltozás eloszlás egyenletesebb, a lekerekített könyök-nél helyenként változó, ugyanis éles könyök esetén az ECAP során a két csatorna keresztvezési síkjának megfelelő fő nyírási síkban (MSP) erőteljes, egyszerű nyírás játszódik le (15.b ábra), lekerekített könyök esetén a nyírási sík egy legyezőszerű felületté nyílik (15.a ábra). Az egyszerű mechanikai modellel végzett számítá-



■ 15. ábra. Egyenértékű alakváltozás mező (a) lekerekített és (b) éles könyök esetén sűrűdásmentes esetben



■ 16. ábra. Egyenértékű alakváltozási sebesség mező (a) lekerekített és (b) éles könyök esetén súrlódásmentes esetben

sok alapján a 110 fokos éles könyökben egyszeri átnyomás esetén az alakváltozás mértéke 0,8, a 90 fokos lekerekített könyökben pedig egyszeri átnyomás esetén 0,9-re adódik. A szimuláció eredményei ezt nagyon jól visszaigazolják. Lekerekített könyökkel százados nagyságrendű eltéréseket tapasztalhatunk, mivel itt az alakváltozás nem egyenletes, mint éles könyökkel, éles könyök használatakor viszont ezredes pontosságú eredményeket kaptunk. Ezt követően az egyenértékű alakváltozási sebesség eredményeit értékeljük. Az alakváltozási sebesség az éles, 110 fokos könyökben a belső oldaltól a külső oldalig állandó és körülbelül 0,016 1/s-nek becsültük (16.b ábra). A leke-

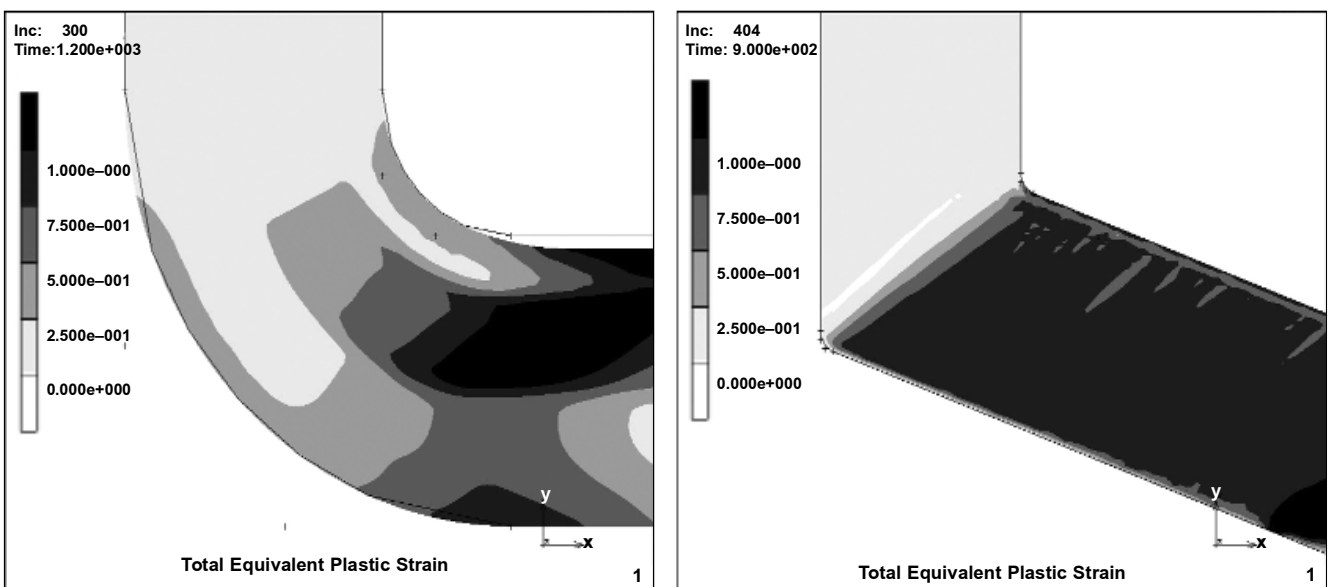
rekített 90 fokos kialakítás esetén az alakváltozási sebesség a belső oldalról a külső oldal felé csökken nagyságrendileg az éles könyökben számított érték 1/10-e körül (16.a ábra). A súrlódásos esetekre vonatkozó számítások eredményei a 17. és a 18. ábrán láthatók.

A végeelemes modellezésből az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

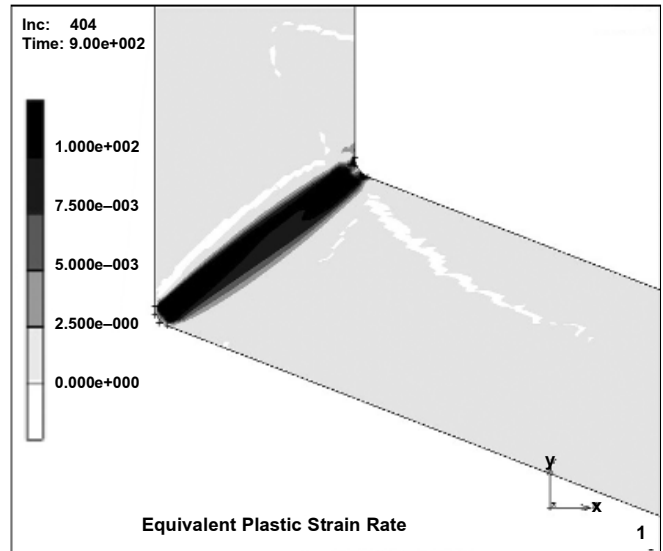
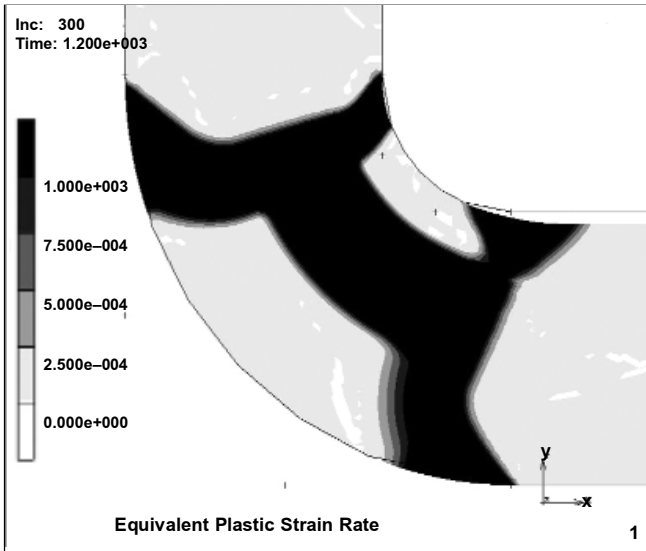
- a deformációra vonatkozóan: éles könyöknél súrlódásmentes esetben a könyök külső oldalát nem tölti ki teljesen a munkadarab, a súrlódásos esetben igen, ez utóbbi a reális; lekerekített könyök esetén súrlódástól függetlenül a kimenő csatornánál a belső oldalon van üreg a nagy lekerekítési sugár miatt, ez a kísér-

letekben is igazolódott;

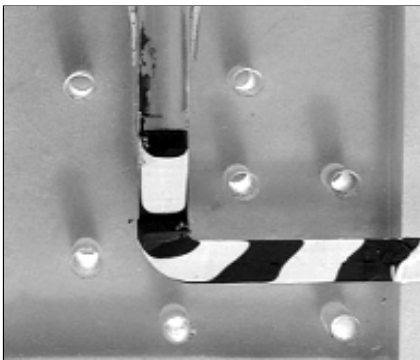
- a fajlagos alakváltozásra vonatkozóan: éles könyöknél súrlódásmentes esetben az alakváltozás mértéke 0,8, ez megegyezik az analitikus eredménnyel, a súrlódás növelésével enyhén nő. A 90 fokos lekerekített könyöknél súrlódástól függetlenül az intenzíven alakváltozó zóna csak a könyök belső oldalához közelebbi sávban alakul ki;
- a fajlagos alakváltozási sebességre vonatkozóan: éles könyöknél súrlódásmentes esetben az alakváltozó zóna a fő nyírási sík környezetében kb. 2 mm-es sávban terjed ki, és viszonylag homogén, mértéke az analitikus modellel becsült értékkel egy nagyságrendbe esik. Súrlódás-



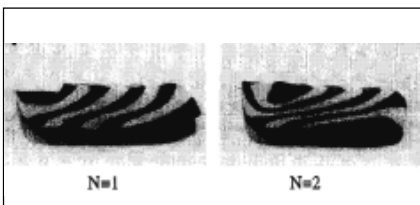
■ 17. ábra. Egyenértékű alakváltozás mező (a) lekerekített és (b) éles könyök esetén súrlódásos ($\mu = 0,1$) esetben



■ 18. ábra. Egyenértékű alakváltozási sebesség mező (a) lekerekített és (b) éles könyök esetén súrlódásos ($\mu = 0,1$) esetben



■ 19. ábra. Modellkísérlet a félig átnyomott gyurmából készült próbatesten létrejövő alakváltozás bemutatására



■ 20. ábra. Egy- és kétszeri átsajtolás utáni gyurmaalakok. A szerszám csatornaszöge és könyökszöge 90 fokos, a csatorna műszerolajjal kent [4]

sos esetben az alakváltozó kissé megnövekszik, és kevésbé lesz homogén, főleg a súrlódó él közelében. Lekerekített könyök esetén a nagy lekerekítési sugár miatt nem legyező alakú az deformációs zóna, a csatorna belépő és kilépő síkjában van képlékeny alakváltozás, valamint egy sávban a belső oldalhoz közel, a könyök nagy kiterjedésű részében csak rugalmas az alakváltozás.

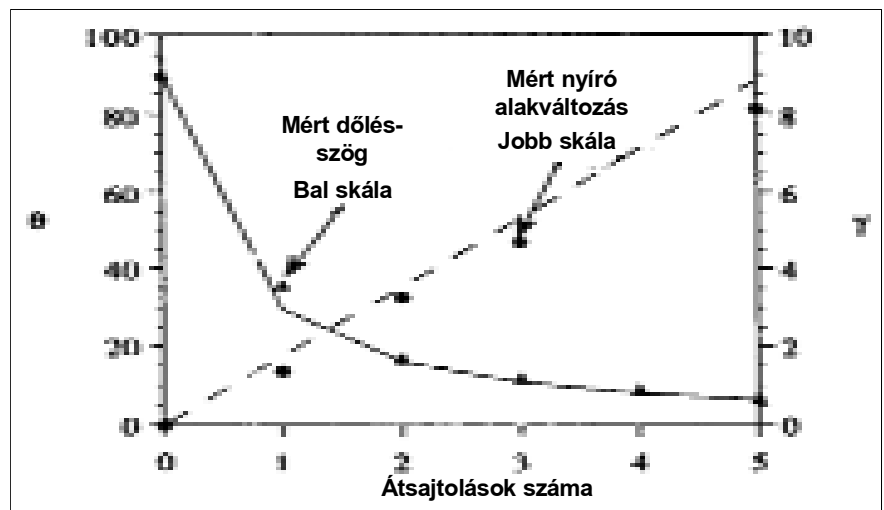
2.5. A plaztilines modellkísérlet kvantitatív értékelése

Az előző fejezetek alapján megállapítható, hogy súrlódásmentes és ideálisan képlékeny anyagnál a könyök-sajtolásnál létrejövő alakváltozást egyedül a csatorna geometriája határozza meg. Az alakváltozás az előzőekben definiált dőlésszöggel jellemezve egy egyszerű modellkísérlettel megmutatható volt. A kísérlethez a hengeres próbatesteket fekete és fehér gyurmából rétegesen alakítottuk ki tengelyre merőleges csíkokkal. A próbatesteket plexiből készült 90 fokos csatorna-, és könyökszögű szerszámon nyomtuk át. A súrlódás csökkentése érdekében a csatornát szilikonzsírral kentük. A 19. ábrán lát-

ható a félig átnyomott próbatesten létrejövő alakváltozás. A bemenő csatornában 90 fokos dőlésszögű sávok csatornával érintkező részei kis mértékben visszahajlanak, a súrlódás a kenés ellenére sem küszöbölhető ki teljesen. Az átsajtolás hatására kialakuló dőlés a kimenő oldalon jól látható.

Hasonló kísérleteket végzett [4] 90 fokos csatorna- és könyökszögű szerszámmal. A 20. ábrán láthatók az egy- és kétszeri átsajtolás utáni gyurmaalakok. A súrlódás hatására itt nagy mértékben visszahajlottak a sávok csatornafallal érintkező részei. A középvonalban létrejövő dőlésszög változása jól mutatja a nagymértékű nyírási alakváltozást.

A középvonalban mért dőlés-



■ 21. ábra. Nyírási alakváltozás és dőlési szög az átsajtolás számának függvényében, 90 fokos csatorna és könyökszögűnél. A pontok mérési adatok, a vonalak az elméleti értékek [4].

szögekből számítható a nyírási alakváltozás, valamint ez összehasonlítható az 1b és 1c táblázatban levő elméleti értékekkel, melyeket az Iwahashi-módszerrel számítottunk ki. Az összehasonlítás látható a 21. ábrán. A középvezonalban mért értékek ponttal jelöltek, nagyon jól illeszkednek az elméleti görbékre.

2.6. Az egyenértékű alakváltozás kapcsolata az anyagjellemzőkkel

A könyöksajtolás során létrejövő szemcsefinomodás az anyag szilárdságának növekedését okozza, szilárdság és a szemcseméret közötti összefüggést a Hall-Petch egyenlet írja le. Kérdés lehet viszont az, hogy az egyenértékű alakváltozás függvényében hogyan változik a szilárdság. Erre vonatkozóan fizikai összefüggés nem található, viszont tapasztalati összefüggés felállítható. [6] az Iwahashi-féle egyenértékű alakváltozás és az anyagjellemzők kapcsolatát a következő alakban írta le egy Gauss-egyenlettel:

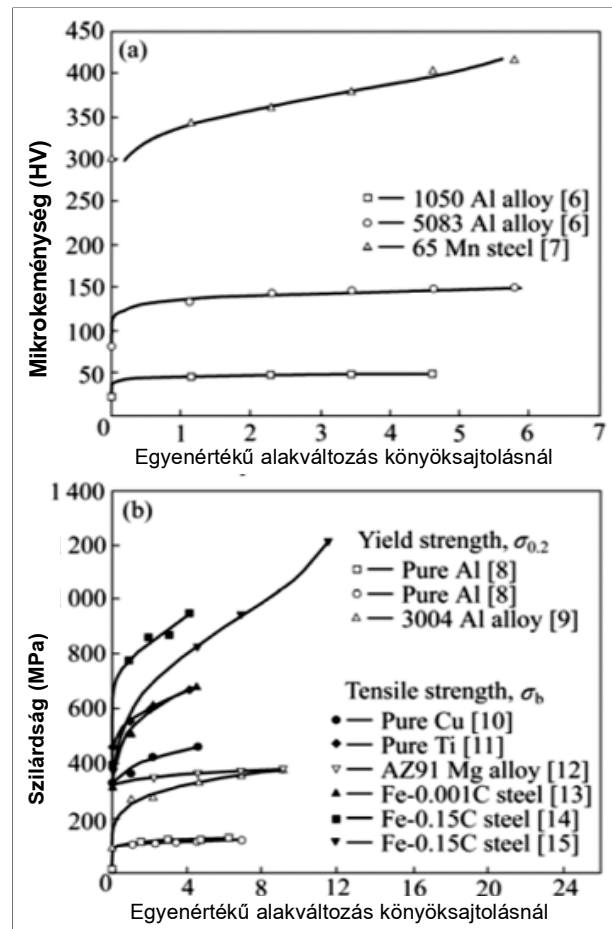
$$\varepsilon_{eq} = k_0 \exp[-(k_1 M - k_2)]$$

ahol M a szilárdsági anyagjellemző, mely lehet a folyáshatár vagy a keménység, k_0 , k_1 és k_2 pedig illesztő paraméterek. A 22. ábrán különböző anyagokra vonatkozóan lát-

ható a keménység (a) és szilárdság (b) az egyenértékű alakváltozás függvényében, valamint az adatokra a fenti összefüggéssel illesztett görbe. Az illeszkedés jósága minden esetre közel 1. Az illesztő paraméterek, valamint az összefüggés alkalmazhatósága megtalálható a 2. táblázatban.

3. A könyöksajtoló szerszám

Könyöksajtolás során a munkadarabot két egymással szöget bezáró és megegyező keresztmetszetű csatornán nyomjuk át. A szakirodalomban kétféle szerszám típus leírása található meg. Vannak olyan szerszámok, amelyekből a munkadarab csak teljes átsajtolás után vehető ki, vagyis a szerszámtest nem alakváltozást folyamatában is nyomon kívánjuk követni, bontható – könyöksajtolás során lejátszódó mégpedig a könyökrészben bontható

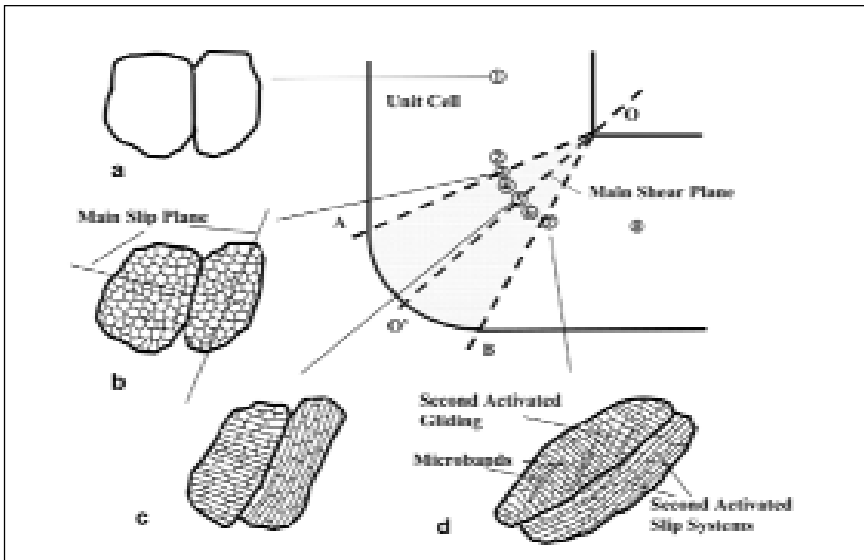


22. ábra. Különböző anyagok könyöksajtolásánál a keménység (a) és szilárdság (b) az egyenértékű alakváltozás függvényében, valamint az illesztett görbe.

2. Táblázat. Különböző anyagokra meghatározott illesztő paraméterek, valamint az összefüggés alkalmazhatósága, Zhao nyomán.

EM	ET	EP	ES	Expression of equivalent strain	R^2	AS
1050 Al alloy [6]	RT	4	4.62	$\varepsilon = 2.3 \exp[-(0.25HV - 11.51)^2]$	1	Within 3 passes
5083Al alloy [6]	RT	5	5.78	$\varepsilon = 2.3 \exp[-(0.074HV - 10.44)^2]$	1	Within 3 passes
65Mn steel [7]	650 °C	5	5.78	$\varepsilon = 6.0 \exp[-(0.014HV - 5.94)^2]$	0.99	No data over 5 passes
Pure Al [8]	RT	4	6.33	$\varepsilon = 3.2 \exp[-(0.076\sigma_{0.2} - 8.93)^2]$	1	Within 3 passes
Pure Al [8]	RT	6	6.93	$\varepsilon = 5.0 \exp[-(0.093\sigma_{0.2} - 11.11)^2]$	0.99	Within 5 passes
3004 Al alloy [9]	RT	8	9.24	$\varepsilon = 6.3 \exp[-(0.030\sigma_{0.2} - 9.38)^2]$	1	Within 6 passes
Pure Cu [10]	RT	16	18.40	$\varepsilon = 3.6 \exp[-(0.076\sigma_b - 33.14)^2]$	0.9	Within 4 passes
Pure Ti [11]	350 °C	8	8.43	$\varepsilon = 4.7 \exp[-(0.0075\sigma_b - 5.37)^2]$	1	Within 4 passes
AZ91 Mg alloy [12]	270 °C	8	9.24	$\varepsilon = 1.6 \exp[-(0.049\sigma_b - 18.00)^2]$	0.98	Within 4 passes
Fe-0.001C steel [13]	RT	10	11.55	$\varepsilon = 4.0 \exp[-(0.062\sigma_b - 38.52)^2]$	0.9	Within 4 passes
Fe-0.15C steel [14]	350 °C	4	4.22	$\varepsilon = 1.5 \exp[-(0.0056\sigma_b - 5.57)^2]$	0.97	No data over 4 passes
Fe-0.15C steel [15]	RT	10	11.55	$\varepsilon = 11.6 \exp[-(0.0023\sigma_b - 2.89)^2]$	0.97	No data over 10 passes

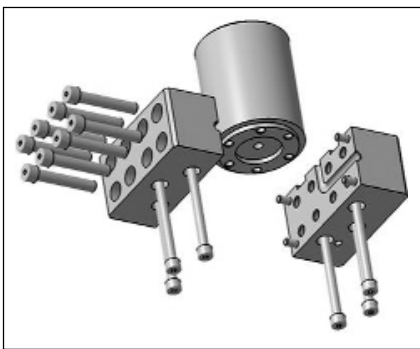
Note: EM denotes experimental materials; ET denotes experimental temperature; RT denotes room temperature; EP and ES denote extrusion pass and equivalent strain, respectively; R^2 denotes goodness of regression fitting; AS denotes applicable scope; HV denotes Vickers hardness.



■ 23. ábra. Polikristályos OFHC-rézben könyöksajtolás közben lejátszódó, az egyes kristallitok orientációjától függő alakváltozást szemléltető vázlat.



■ 24. ábra. A W 303 minőségű szerszámacélból készítendő könyöksajtoló szerszám fő részeinek 3D-s modellje



■ 25. ábra. Az összeszerelés menetét bemutató vázlat

– szerszámra van szükségünk. Ilyen jellegű vizsgálatokat végzett Xue [13], akinek munkája a könyöksajtolás közben lejátszódó alakváltozás mechanizmusának megértését nagymértékben szolgálta.

A polikristályos rézben az egyes kristallitokban lejátszódó, azok egyedi orientációjától függő változásokat egy szemléletes ábrában is összefoglalta, amelyet a 23. ábrán mutatunk be.

A könyöksajtoló réz mikroszerkeze-

tére az ún. elnyújtott réteges struktúrára jellemző, amelyet az angolszász irodalomban ELS-nek vagyis Elongated Lamellar Structure-nak neveznek. Az ilyen szövetszerkezetre 250-400 nm lamellatávolság jellemző, és a lamellákat az alakváltozás későbbi szakaszában a lamellafalakkal szöveget bezáró csúszási síkok mentén lejátszódó alakváltozás feldarabolhatja.

Mivel a kutatási projektünk egyik alapvető célja az ultrafinom szövetszerkezethez vezető folyamatok kutatása volt, érthető, hogy a bontható szerszám megvalósítása mellett döntöttünk.

3.1. A könyöksajtoló szerszám ismertetése

Két, csatornakiakításukban eltérő szerszámot készítettünk. A 10 mm átmérőjű csatorna két szakasza az egyik esetben egymásra merőleges, 90°-os, míg a másik szerszámban 110°-os volt. A 90°-os szerszámban a csatornák találkozási helye lekerekít-

tett, míg a 110°-os szerszámban éles, lekerekítés nélküli. A szerszámnak alkalmasnak kell lennie a legfeljebb 200 MPa folyási határú fémek megmunkálására, vagyis még lágyacélok is megmunkálhatók.

A csatorna keresztmetszete, a csatornaszög és a megmunkálható anyag folyási határa együttesen határozzák meg a szerszám mechanikai terhelését, a méretezést az alábbi elemekre kellett elvégeznünk:

- a nyomótüskére,
- a befogadó hengerre,
- a könyökrész bontható szerszámfeleire,
- a szorítócsavarokra.

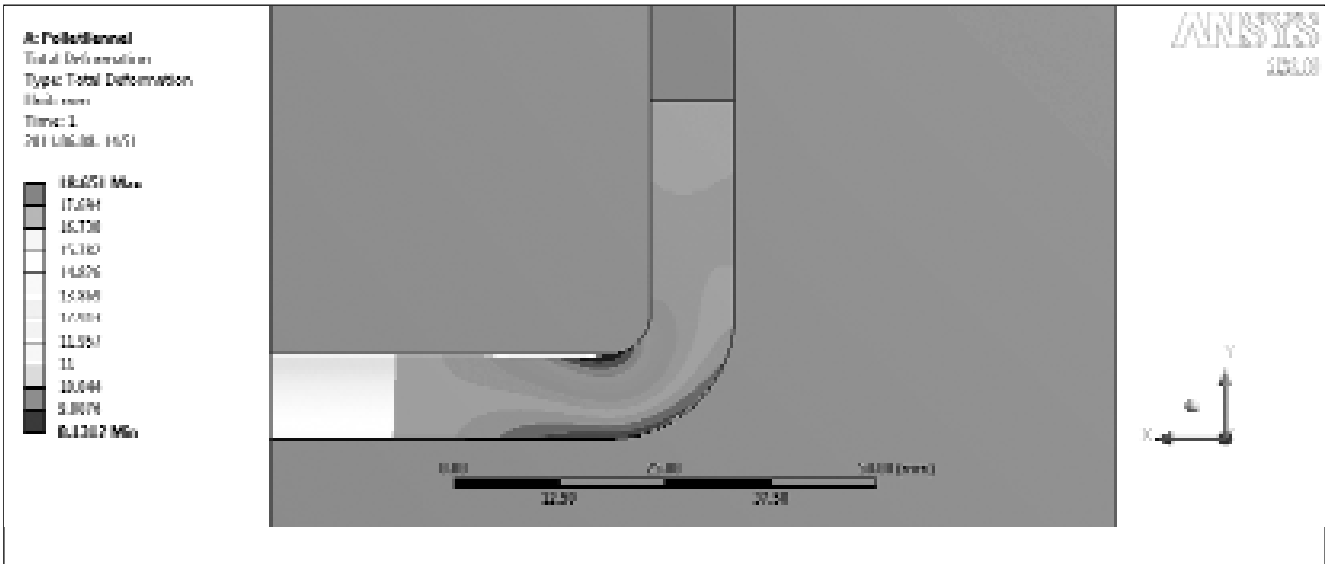
A szerszám minden egyes elemét Böhler W 303 típusú szerszámacélból készítettük el. A szerszám anyaga edzett illetve nemesített állapotú.

A szerszám egyes alkatrészeinek kialakításakor a Fémalk Zrt. megmunkálási lehetőségeit vettük alapul [14]. Arra törekedtünk, hogy a megmunkálások zöme CNC esztergán vagy marógépeken végrehajtható legyen, és csak az íves részek megmunkáláskor kelljen szikraforgácsoláshoz folyamodni. A szerszámot három részből alakítottuk ki, amelynek 3D-s modelljét a 24. ábrán mutatjuk be.

Az ábrán látható hengeres befogadó elem vezeti meg a munkadarabot, és a benne mozgó nyomótüske segítségével végezzük el az átsajtolást. A befogadó elem akadályozza meg a munkadarab és a nyomótüske kihajlását a sajtolás első, kezdeti szakaszában. A befogadó elemekben lévő furat és a nyomótüske felülete egyaránt edzett és köszörült felületű.

Az eltérő csatornageometriájú szerszámok befogadó eleme hasonló kialakítású, de az elcserélhetőség elkerülése érdekében azok illetétek a szerszám alsó, bontható részeihez. Az eltérő csatornageometriájú szerszámok bontható részeinek kialakítása teljesen azonos, csak a csatorna kialakításában van közöttük különbség.

A szerszámot alulról kezdve, ún. „átmenő konstrukcióban” szereljük össze. Ez a konstrukció biztosítja a szerszám szükséges szilárdságát. A szerszám alsó bontható részét nyolc M12-es csavar fogja össze, míg az alsó részt a hengeres befogadó elemhez hat M10-es csavar rögzíti. A szer-



■ 26. ábra. A munkadarab X-irányú elmozdulása, a jellegzetes „mintázattal”

szám egyes elemeinek illesztését, valamint a 90°-os és 110°-os csatornaszögű szerszámok egyes elemei közötti „keveredést” megátolódó illesztő szegekkel oldottuk meg.

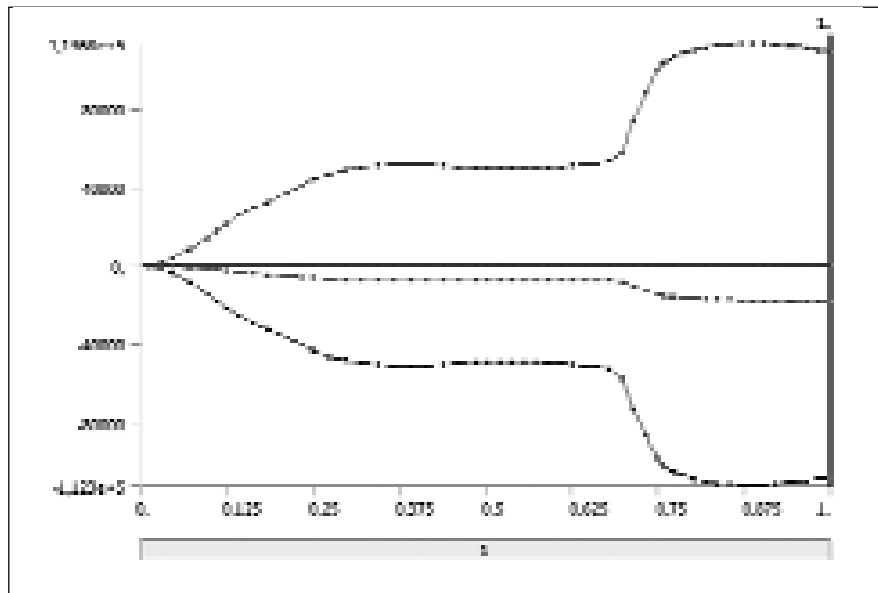
A könyöksajtoló szerszám összeszerelésének menetét a 25. ábra mutatja. A szerszámot következő három lépésben kell összeszerelni:

- 1) Először a szerszám alsó bontható részét képező két felet építjük össze, miután meggyőződünk, hogy az illesztő szegek a helyükön vannak-e.
- 2) A következő lépésben a szerszám alsó két felét összefogó nyolc M12-es csavart két lépésben kell meghúzni cikk-cakk alakban.
- 3) Ezután a hengeres befogó elemet rögzítjük hat M10-es csavarral a már összeszerelt, bontható alsó szerszámrészekhez, egymással szemben lépkedve.

3.2. A szerszám befogó hengere és alsó része között ébredő szétfeszítő erő ANSYS szoftverrel végzett elemzés alapján

A könyöksajtolás térbeli végelesemes modelljével az alábbi kérdésekre kerestük a választ:

- mekkora a befogó henger és a szerszám alsó része közötti szétfeszítő erő, amelyre a csavarkötést méretezni kell,
- létrejön-e a szimuláció során az a mintázat, amelyet a plasztilines kísérlet során meg lehetett figyelni.



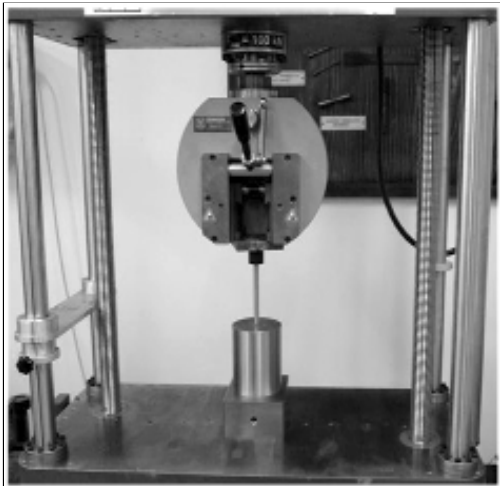
■ 27. ábra. A szerszámot szétfeszítő erő az elmozdulás függvényében (az 1 egység felel meg 3 mm-nek)

Mivel az analízis a szétfeszítő erő meghatározására irányult, ezért a befogó hengert és a nyomótüskét merev testnek tekintettük, és a számítási teljesítmény növelése érdekében kihasználtuk a szimmetria feltételt. Mivel a munkadarab anyaga a terhelés hatására a folyáshatárát túllépi, így non-lineár anyagmodellt választottunk az analízisekhez.

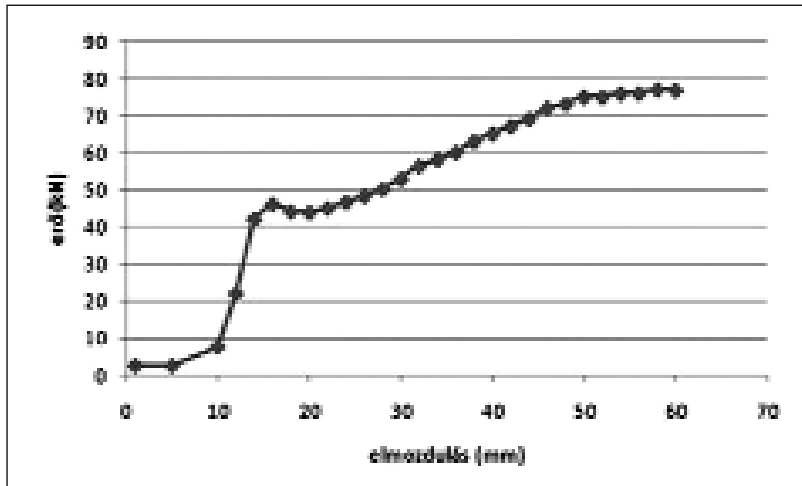
A szerszámgeometriát SolidWorks programban készítettük el, és azt abból importáltuk az Ansys szoftverbe. Összesen 22479 csomópont és 5476 elem építi fel a modellt. Az alaptest hálózása csak a csatornára terjed ki, hogy az érintkezési feltételt (kontak-

tot) definiálni lehessen. A nyomótüske 4 eleme pedig a nem-elváló kontakt definiálásához szükséges.

A 3D-s Ansys szimulációhoz színelumíniumra vonatkozó anyagjellemzőket vettünk figyelembe. Mivel a feladat során az alumínium próbatestet „átnyomjuk” a szerszámon, fontos a megfelelő kontaktálások definiálása. Súrlódásmentes kapcsolatot állítottunk be, és definiáltuk a szimmetria feltételt. Mivel merev testként kezeltük a befogóhengert és a nyomótüskét is, ezért a kényszerek esetén „Join”-ot választottunk. Ez a befogóhenger esetén teljes lefogást, a nyomótüske



■ 28. ábra. A mérési összeállítás



■ 29. ábra. A sajtolás erőszükséglete a 110°-os szerszám használatakor

esetén 30 mm-s elmozdulás kényesert jelentett. A súrlódásos elmozdulás vizsgálatát Pure-penalty modellel hajtottuk végre.

A sikeres futtatás eredményeképpen visszakaptuk a plaztilines kísérlet során kialakult mintázatot, amint azt a 26. ábra mutatja.

A 27. ábra alapján megkaptuk a JOINT próba erőértékét, amely a szerszámot szétfeszítő erőt szolgáltatja, amely alumínium esetén 112 kN.

Amint azt már a 25. ábrával kapcsolatban bemutattuk, a szerszámot tengelyirányban hat M10-es csavar fogja össze. Figyelembe véve a csavarok szilárdsági kategóriáját, valamint a szétfeszítő erőre kapott kb. 120 kN-os erőt, belátható, hogy a csavarokat legfeljebb a terhelhetőségük 15%-áig vesszük igénybe. Gondos összeszerelés esetén a hat csavar által biztosított összefogás megakadályozza a megmunkálandó anyagnak a két szerszámfél közé való bejutását.

4. Az OFHC-rézrel végzett kísérlet bemutatása

Nagy tisztaságú polikristályos OFHC-rézből készült 10 mm átmérőjű, 40 vagy 80 mm hosszúságú próbatesteket sajtolunk át szobahőmérsékleten 2 mm/perc sebességgel a lekerekített 90°-os vagy a lekerekítetlen 110°-os szerszámon. A szerszám kenése lítium vagy MoS₂ alapú kenőanyaggal történt. Az átnyomás egy Messphysik B100-as 100 kN terhelhetőségű szakítógépen történt, a mérési összeállítás a 28. ábrán látható. A szerszám-



■ 30. ábra. Félig átsajtolt próbatestek a szerszámban

mot kenés és összeszerelés után a gép asztalára helyeztük, a befogató hengerbe betöltöttük az ugyancsak zsírral kent munkadarabot, majd betöltük a nyomótüskével a darab elakadásáig kézzel. A gép felső pófája alá egy teherátvivő lemezt tettünk, amit a traverz lefelé mozgatásával felütköztettünk a nyomótüskére. A traverz tovább mozgattuk lefelé kézi vezérléssel gyorsjáratban, míg az erő értéke el nem éri a kb. 2 kN-os értéket, ekkor éri el a próbatest a könyököt. Ez után automatikus vezérléssel 2 mm/perc sebességgel végezzük az átsajtolást.

Az átsajtolás erő-elmozdulás diagramja a 29. ábrán látható egy próbatestnek a 110°-os szerszámon való átsajtolásánál. Kezdetben az erő lassan nő, ahogy a próbatest eléri a kimenő csatornát, előfeszül, majd elkezd megfolyni. Ekkor az erő hirtelen megnő kb. 45 kN-os értékre, majd 1-2 kN-nal visszaesik. Ez a próbatest első 10 mm-es alakítása, ami átmeneti jellegű, ez után stabilizálódik az alakítás. A grafikonon ez a 10-20 mm-ig tartó gépi koordinátánál történik meg. Ez után az erő lassan, de egyenlete-

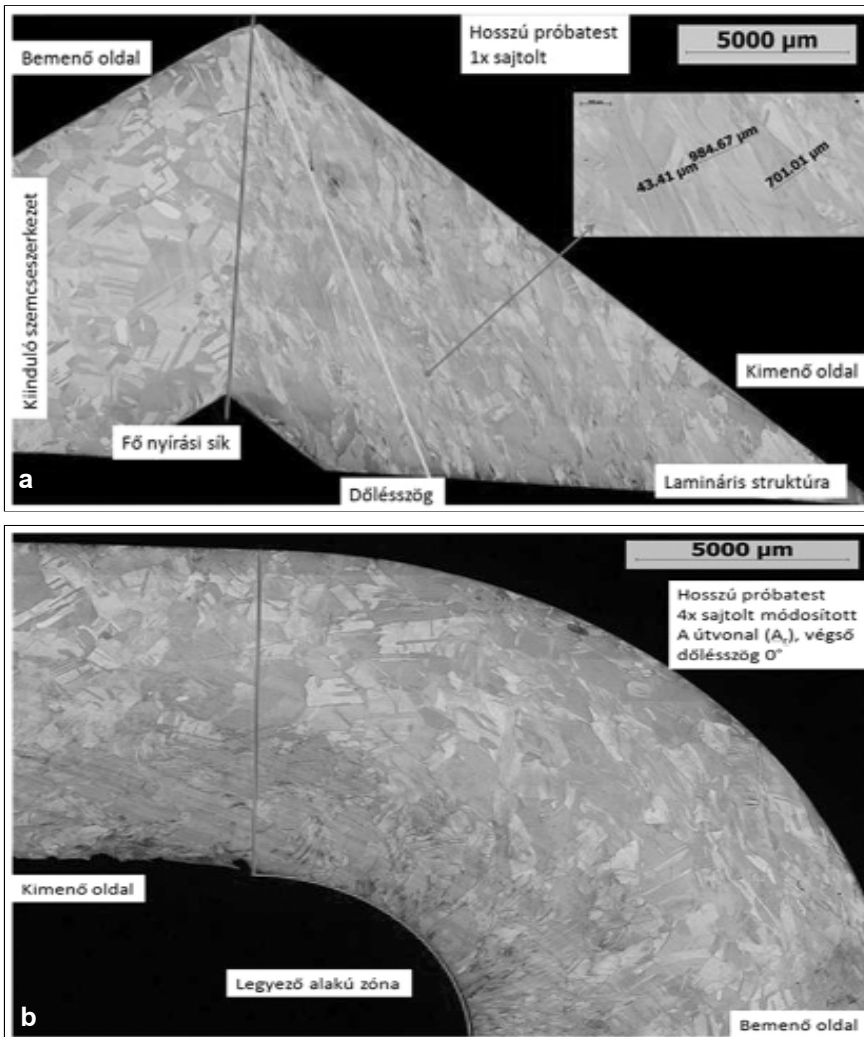
sen nő a következő 40 mm-en kb. 75 kN-ig. Az átsajtolt próbatestekről készült fényképek a 30. ábrán láthatók a szerszám szétszerelésekor a próbatest kivétele előtt a szerszámfélből.

A további vizsgálatokra kiválasztott próbatesteket a hossz tengelyük mentén szikraforgácsolással kettévágtuk, majd a hossz méretüket a 30 mm átmérőjű beágyazáshoz igazítottuk.

4.1. A fémtani vizsgálatok eredményei

A mintákat optikai mikroszkóppal és EBSD feltétellel ellátott pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM), valamint transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) vizsgáltuk. A 31. ábrán láthatók az optikai mikroszkópos képek az éles könyökben 1x (a) és a lekerekített könyökben 4x átsajtolt minta mikroszerkezetéről.

Éles könyök esetén az ECAP során a két csatorna keresztvezési síkjának megfelelő fő nyírási síkban (MSP) erőteljes, egyszerű nyírás játszódik le, lekerekített könyök esetén a nyírási sík egy legyezőszerű felülettelé nyí-



■ 31. ábra. Fénymikroszkópos képek az éles könyökben 1x (a) és a lekerekített könyökben 4x (b) átsajtolt minta mikroszerkezetéről

lik. Az alakváltozás mértéke kis mértékben változik.

A 110 °-os éles könyökben egyszeri átnyomás esetén az alakváltozás

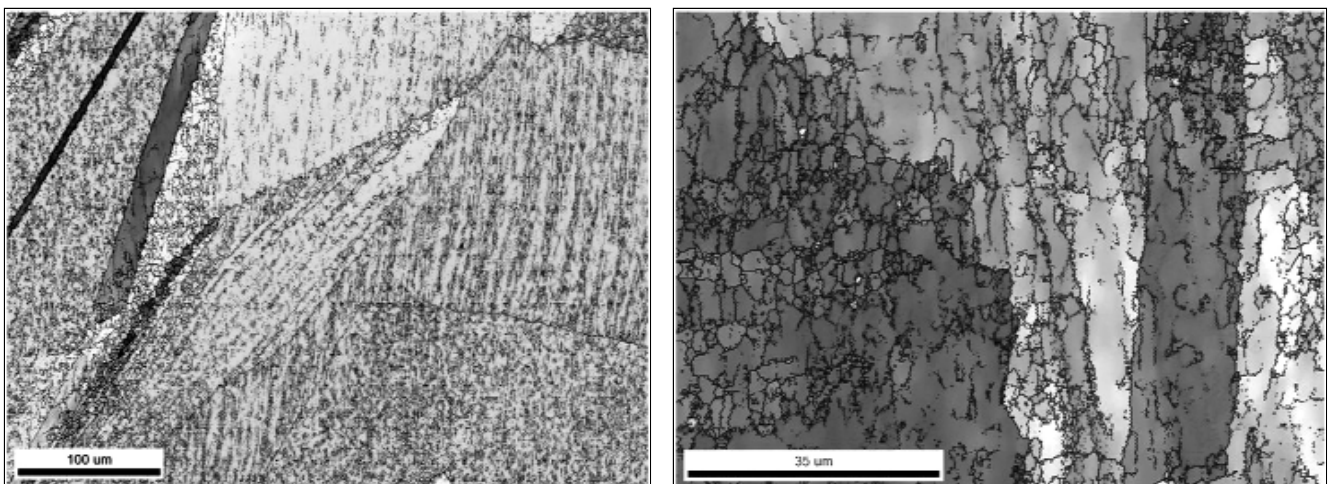
mértéke 0,8, az alakváltozási sebesség a belső oldaltól a külső oldalig állandó és kb. 1 min⁻¹. A kialakuló dőlésszög 0,5 fokos eltéréssel adja az

elméleti 35,53 fokot. A kimenő oldalon a dőlésszög alatti lamináris szemcseszerkezet alakul ki. A sűrűdés hatása látható az érintkezési felület közelében levő szemcsék deformációján, valamint a véglap dőlésszögének változásán.

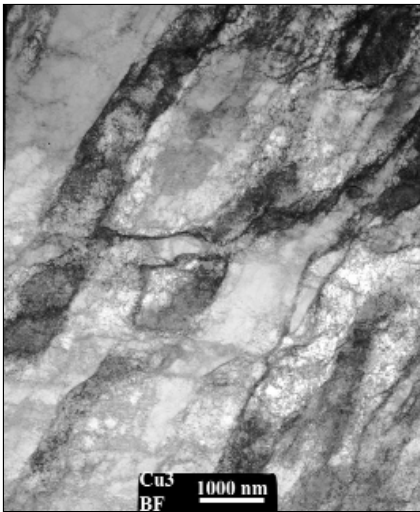
A 90°-os lekerekített könyökben egyszeri átnyomás esetén az alakváltozás mértéke 0,9, négyszeri átnyomással 3,6. Az alakváltozási sebesség a belső oldaltól a külső oldalig csökken az éles könyök 1/10-e körüli értékre. A módosított útvonalnál páros számú átnyomásnál a dőlésszög 0°. Viszonylag sok feldarabolódott szemcsé látható, de csak a belső oldalon, a nagy alakváltozási sebességű helyhez közel. Az 2.4. fejezetben a végeselemes modellel megmutattuk, hogy intenzív képlékeny alakváltozás a lekerekített könyökben csak a belső oldalon játszódik le.

Az EBSD technika különösen alkalmas az ultrafinom szövetszerkezet jellegzetességeinek vizsgálatára, hiszen az egyes tartományok orientációjának meghatározásán túl alkalmas a szövetben előforduló nagy- és kisszögű szemcsehatárok megkülönböztetésére is.

A 32. ábrán láthatók az EBSD-s képek az éles könyökben átsajtolt minta kimenő oldaláról, valamint a lekerekített, négyszer átsajtolt minta könyökbeli belső oldaláról. A viszonylag nagy méretű (50-100 μm) szemcséken belül sok kisszögű szemcsehatár található, melyek jellemző mérete 5 μm alatti, és ezek a kiindu-



■ 32. ábra. EBSD kép az éles könyökben átsajtolt minta kimenő oldaláról (a), valamint a lekerekített 4x átsajtolt minta könyökbeli belső oldaláról (b) (Dr. Szabó Péter János felvételei, BME)



■ 33. ábra. TEM-es felvétel az éles könyökben átsajtolt minta kimenő oldaláról (Radnóczy György KFKI-MFA felvételeiből)

lőpontjai az ultrafinom szemcseszerkezet kialakulásának.

Transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálattal készült felvétel látható a 33. ábrán az éles könyökben átsajtolt minta kimenő oldalából vett részletről. A tömbi mintából kb. 0,5 mm vastag lemezeket vágtak le, amelyeket mechanikusan vékonyítottak 50 µm-ig, utána ionsugaras vékonyítással vékonyították tovább, amíg a minta ki nem lyukadt. A lyuk szélén keletkező vékony tartományokról készült a transzmissziós elektronmikroszkópos felvétel. A 33. ábrán a jól azonosítható réteges struktúra lamellatávolságának jellemző mérete néhány mikrométer, amelyeket belül a diszlokációs falak tovább tagolnak. A szerkezet eléggé inhomogénnek tűnik, a nagyobb szemcsék mellett egészen kicsi lemez alakú cellák (hosszában és keresztben is elvágva) is a szerkezet jellemzőiként vannak jelen. Ez a struktúra jól megfelel a szakirodalomban található ELS struktúráknak.

Összefoglalás

Éles könyök esetén a számított dőlésszögben rétegződő struktúra jön

létre, elnyújtott szemcsékkel, a keresztmetszetben egyenletes eloszlásban, de egyszeri átnyomásnál a teljes alakváltozás kevés a szemcsék nagymértékű elaprózódásához. A kezdeti 500 µm-es szemcsékhez képest az alakított szemcsékben az optikai mikroszkóppal megfigyelhető legkisebb méret kb. 40 µm-es. Lekerekített könyökben a nagyságrenddel kisebb alakváltozási sebesség ellenére a többszöri (4x) átsajtolás hatására a nagy alakváltozási sebességű oldalon látható a szemcsék elaprózódása, mely a külső oldalon nem történik meg. Mindkét sajtolási esetre vonatkozóan az EBSD ábrákon látható, hogy a szemcséken belül nagy mennyiségű kis szögű szemcsehatár található 5 µm alatti jellemző mérettel. Ugyanezt bizonyítják a TEM-es vizsgálatok eredményei is.

Irodalomjegyzék

- [1] V. M. Segal, V. I. Reznikov, A. E. Drobyshevskij, V. I. Kopylov: *Metally*, 1 115. 1981
- [2] V. M. Segal V. I. Reznikov, V. I. Kopylov, D. A. Pavlik, V. F. Malyshev. In: *Processes of plastic transformation of metals*, Minsk, Navuka i Teknika, p. 295. 1984
- [3] R. Z. Valiev (editor): *Ultrafine-grained materials prepared by severe plastic deformation*. *Annales de Chimie*, vol. 21. Science des Matériaux, p. 369, Special issue. 1996
- [4] Y. Wu, I. Baker: *An Experimental Study of Equal Channel Angular Extrusion*. Pergamon Scripta Materialia, Vol 37. No. 4. pp. 437–442. 1997
- [5] Verő B., Bodnár V., Nagy G.: *Könyöksajtolás útján a nanovilágba. Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet által kiírt „nanotechnológiai kísérletek és alkalmazási demonstrációk – NanoDemo” felhívás*

- [6] Zhao Jun, Wang Zhen-hua, Sun Shu-hua, Zhao De-li, Ren Li-guo, Fu Wan-tang: *A new method of characterizing equivalent strain for equal channel angular processing*. *J. Cent. South Univ. Technol.*, 16. 0349–0353, 2009
- [7] Chan et al.: *42nd MWPS Conf. Proc. ISS*, vol. XXXVIII, 2000. pp. 523–531
- [8] Gonda V.: *A keménység változása könyöksajtolás közben nagy tisztaságú réz alapanyagban XIV. Képlékenyalakító Konferencia*, 2012. február 16–17, Miskolc
- [9] Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, T. Langdon: *Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultrafine grained materials*. *Scripta Materialia*, Vol. 35, No. 2, pp. 143–146, 1996
- [10] Bobor K. Krállics Gy.: *Könyöksajtolás különböző alakítási útjainak vizsgálata nem-monotonitás szempontjából*. OGÉT 2010–XVIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Baia Mare, Románia, 2010. 04. 22.–2010. 04. 25. Kolozsvár, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, pp. 71–74. Paper 12.
- [11] Tóth S. L.: *Computational Materials Science* 32 pp. 568–576, 2005.
- [12] A. R. Eivani, A. K. Taheri: *An upper bound solution of ECAE process with outer curved corner*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007. 182 p. 555–563.
- [13] Q. Xue, I. J. Beyerlein, D. J. Alexander, G. T. Gray: *III. Mechanisms for initial grain refinement in OFHC copper during equal channel angular pressing*. *Acta Materialia*, Volume 55, Issue 2, January 2007, Pages 655–668.
- [14] Kramm György személyes közlése

Készült a projekt zárórendezvénye emlékére

A régió és a Dunaújvárosi Főiskola válasza az anyagtudomány és technológia új kihívásaira

TÁMOP-4.2.2-08/1/2008-0016

