

TDK DOLGOZAT

A könyöksajtolás végeselemes modellezése

Frei Zoltán

Konzulensek:

Dr. Gonda Viktor, főiskolai docens

Dr. Verő Balázs, egyetemi tanár

Műszaki Intézet

DUNAÚJVÁROSI FŐISKOLA

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRE

DUNAÚJVÁROS

2011. November 9.

DUNAÚJVÁROSI FŐISKOLA
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Adatlap

Szerző neve	Neptun kód	Email cím	Aktív félévek száma	Képzés típusa
Frei Zoltán	G5BIN6	freizoli@windowslive.com	3	BSc

Dolgozat címe
A könyöksajtolás végeselemes modellezése

Konzulens neve	Beosztása	Email cím	Tanszék
Dr. Gonda Viktor	f. docens	gonda.viktor@mail.duf.hu	Műszaki Intézet
Dr. Verő Balázs	e. tanár		Műszaki Intézet

A dolgozat rövid tartalma
A könyöksajtolás olyan szilárdságnövelő eljárás, ahol intenzív képlékeny alakítás hatására, mely jellemzően 100%-nál nagyobb egyenértékű alakváltozást jelent, következik be a szemcsefinomodás, ezáltal a szilárdsági paraméterek növekedése. A szilárdág növekedése az alakítás mértékével nő, kb. 5-600%-os alakváltozás esetén éri el maximumát. A sajtolás során létrejövő alakváltozás tehát meghatározza a mikroszerkezeti változásokat, a szemcsék elaprózódását. Az alakváltozás egyszerű modellel analitikus módon leírható, bizonyos feltételekkel: ideális képlékeny anyagmodell használható a súrlódások elhanyagolásával. Végeselemes módszerrel a keresztmetszetben létrejövő alakváltozás pontosabban írható le, a valóságot jobban közelítő anyagmodell, valamint a súrlódások hatása is vizsgálható a létrejövő deformációra. Dolgozatomban bemutatom könyöksajtolásra vonatkozóan az egyenértékű alakváltozásra és az alakváltozási sebesség meghatározására szolgáló analitikus összefüggéseket. Éles és lekerekített könyökgeometria esetén síkbeli végeselemes modellel vizsgáltam az alakváltozás lefolyását a könyökben, kiértékelve az alakváltozás mértékét és az alakváltozási sebességet, valamint a teljes nyírási alakváltozást jellemző ún. dőlésszöget. Elemeztem a deformációs ún. legyező alakú zóna kiterjedését a könyökben. A szimulációs munkával párhuzamosan nagy tisztaságú réz mintákon végzett kísérletekkel a dőlésszöget megmérve a szimulációs eredmények ellenőrizhetők. Az eredmények a valós dőlésszöggel kisebb, mint 1 %-os hibával számíthatók.

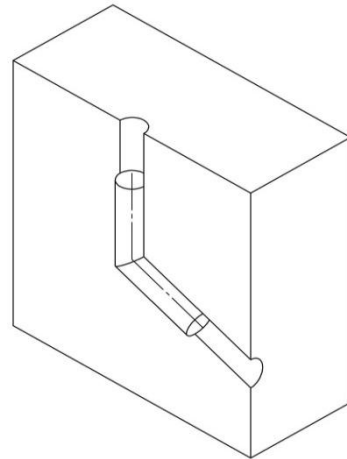
2011. november 9.

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	2
2	Célkitűzések.....	4
3	Az alakváltozás analitikus meghatározása	5
3.1	Az éles könyök geometriája.....	5
3.2	Teljesen lekerekített könyök	7
3.3	Nem teljesen lekerekített könyök	8
3.4	Az alakváltozási sebesség becslése	11
4	Végeselemes modellezés	14
4.1	A modellezés folyamata	14
4.2	Az egyenértékű alakváltozás mező és az egyenértékű alakváltozási sebesség kiértékelése súrlódásmentes esetben	17
4.3	Az egyenértékű alakváltozás mező és az egyenértékű alakváltozási sebesség kiértékelése $\mu=$ 0.1 súrlódás figyelembe vételével	22
5	Az alakváltozás kísérleti meghatározása	26
5.1	Könyöksajtolás gyurmás modellkísérletekkel	26
5.2	A dőlésszög kialakulása valós kísérletekben	28
6	Következtetések	31
7	Hivatkozások.....	32

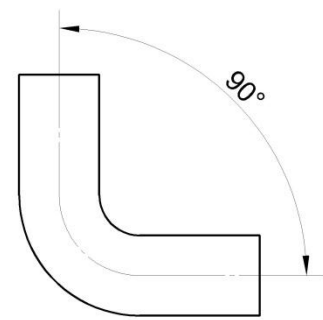
1 Bevezetés

Az utóbbi évtizedekben előtérbe került a nanokristályos anyagok vizsgálata. Nanoszerkezetűnek nevezünk egy anyagot akkor, ha az azt felépítő kristályszemcsék mérete 100 nm alatt van. A nanoszemcsés szerkezet lehetővé teszi, hogy a fémekben ötvöző atomok nélkül érjünk el nagy szilárdságot. Ez különösen fontos az orvostudományban, a nagy szilárdságot megkövetelő implantátumok esetében. Klinikai tesztek alapján rájöttek, hogy az ötvözés mérgező hatásokkal járhat [Segal, 1995]. Így irányult a figyelem a nanokristályos kutatások felé. Kidolgoztak olyan eljárásokat, melyekkel az anyagban nanoszerkezetet hozhatnak létre, így biztosítva annak nagy szilárdságát.

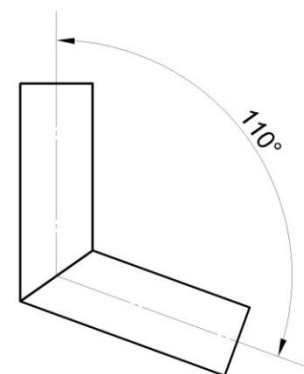


1.1. ábra: A könyöksajtolás vázlata

Ilyen eljárás az (ECAP), azaz könyöksajtolás (1.1. ábra). A könyöksajtolás az egyik legismertebb intenzív képlékenyalakítási módszer. 1972-ben, Belorussziában találták ki ezt a technológiát, melynek segítségével a tömbi anyagok mechanikai tulajdonságait irányítottan tudjuk megváltoztatni [Krállics, 2005]. A sajtoló matricában két egymást metsző csatorna található, melyek keresztmetszete állandó. Ezen a csatornán nyomjuk át a munkadarabot egy nyomótüske segítségével. A csatornák által bezárt szög lehet 90°-os (1.2. ábra), 110°-os (1.3. ábra), rádiuszos, vagy éles könyök. A szilárdág növekedése az alakítás mértékével nő, kb. 5-600%-os alakváltozás esetén éri el maximumát. A sajtolás során létrejövő alakváltozás tehát meghatározza a mikroszerkezeti változásokat, a szemcsék elaprózódását. Az alakváltozás egyszerű modellel analitikus módon leírható, bizonyos feltételekkel: ideális képlékeny anyagmodell használható a súrlódások elhanyagolásával. Végeselemes módszerrel a keresztmetszetben létrejövő alakváltozás pontosabban írható le, a valóságot jobban közelítő anyagmodell, valamint a súrlódások hatása is vizsgálható a létrejövő deformációra.



1.2. ábra: 90°-os, rádiuszos csatorna



1.3. ábra: 110°-os, éles csatorna

Dolgozatomban bemutatom könyöksajtolásra vonatkozóan az egyenértékű alakváltozásra és az alakváltozási sebesség meghatározására szolgáló analitikus összefüggéseket. Éles és lekerekített könyökgeometria esetén síkbeli végeselemes modellel vizsgáltam az alakváltozás lefolyását a könyökben, kiértékelve az alakváltozás mértékét és az alakváltozási sebességet, valamint a teljes nyírási alakváltozást jellemző ún. dőlésszöget. Elemeztem

a deformációs ún. legyező alakú zóna kiterjedését a könyökben. A szimulációs munkával párhuzamosan nagy tisztaságú réz mintákon végzett kísérletekkel a dőlésszöget megmérve a szimulációs eredmények ellenőrizhetők. Az eredmények a valós dőlésszöggel kisebb, mint 1 %-os hibával számíthatók.

2 Célkitűzések

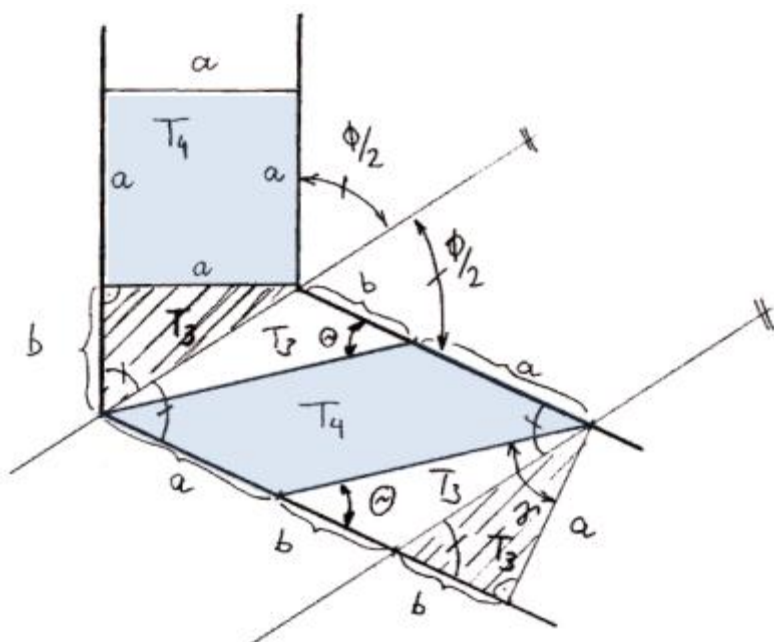
A könyöksajtolás végeselemes modellezésével célom, hogy egy a kiindulási alapnak használt analitikus modellnél a valósághoz jobban közelítő mechanikai modell használatával vizsgáljam két fontos mechanikai paraméter, a fajlagos alakváltozás mező és a fajlagos alakváltozási sebesség mező kialakulását és lefolyását különböző könyökgeometriák esetén, valamint – ami az analitikus modellben nem valósítható meg – a súrlódás hatását az említett paraméterek változására az alábbi feladatok megoldásával:

1. A könyöksajtolás kontinuummechanikai analíziséből meghatározom a 110 fokos éles és 90 fokos lekerekített könyökgeometria esetén az egyenértékű fajlagos alakváltozás nagyságát, valamint megbecsülöm az átlagos fajlagos alakváltozási sebesség nagyságát. A mechanikai modell ideálisan képlékeny, a súrlódás hatásától eltekintek.
2. A könyöksajtolás végeselemes modelljét felépítem négy esetre: az említett két könyökgeometria esetére, valamint súrlódásmentes esetben, és $\mu = 0,1$ súrlódási tényező használatával megvizsgálom a létrejövő teljes deformációt a munkadarabon ideálisan rugalmas, képlékeny-keményedő anyagmodell esetén. A fajlagos alakváltozási mezőt vizsgálom a különböző esetekre, ami az elérhető intenzív képlékeny alakítás mértékét mutatja. A fajlagos alakváltozási sebesség mezőt vizsgálom a különböző esetekre, ami az intenzív képlékeny alakítás helyét mutatja. Összehasonlítást végzek az analitikus modell eredményeivel.
3. Nagy tisztaságú réz munkadarab 110 fokos könyökben való átsajtolása után létrejövő deformációt mérem a véglapon, valamint összehasonlítom a végeselemes és analitikus eredményekkel.

3 Az alakváltozás analitikus meghatározása

3.1 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. A 3.1. ábrán látható egy lekerekítés nélküli, „éles” könyök sematikus keresztmetszeti rajza, a csatorna szélessége a . Az átnyomás során a könyök előtti részen a kék színnel kiemelt a oldalhosszúságú T_4 területű négyzet alakú anyagrész 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 anyagrész csatorna belső oldalán levő sarka eléri a könyököt, akkor a külső oldali sarok még b távolságra van attól. Az ab befogójú derékszögű háromszög területe T_3 -al jelölt. A könyökön éppen teljesen átsajtolt rombuszá torzult anyagrész egyik külső oldali sarka még épp a könyökben van, az ezen az oldalon levő belső oldali sarok a könyöktől b távolságra kell legyen, mivel az anyagáramlás állandó. A fő nyírási síkkal párhuzamost 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 térfogatállandóságból is. A nyírási alakváltozás a $2b$ és a befogójú háromszögben definiálható, az ábrán γ -val jelölt. A bevezetett geometriai adatok, a nyírási alakváltozás és dőlésszög a 3.1. ábra jobb oldalán található képletekkel számolhatók. A nyírási alakváltozást először [Segal, 1981] publikálta.



$$b = a \cot \frac{\Phi}{2}$$

$$T_4 = a^2$$

$$T_3 = \frac{ab}{2} = \frac{1}{2} a^2 \cot \frac{\Phi}{2}$$

$$\gamma = \frac{2b}{a} = 2 \cot \frac{\Phi}{2}$$

$$\Theta = \tan^{-1} \frac{a}{2b} = \tan^{-1} \frac{1}{\gamma}$$

3.1. ábra: éles könyökben a jellegzetes hosszak, szögek és területek

A 3.2.(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. Az 3.2.(a) ábra jelöléseit használva a nyírási alakváltozás, γ , a következő alakban írható fel:

$$\gamma = \frac{a'q}{qd'}$$

ahol:

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

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

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

3.2 Teljesen lekerekített könyvek

Az 3.2.(b) ábrán, ahol $\Psi = \pi - \Phi$, a nyírási alakváltozás a következőképpen írható fel:

$$\gamma = \frac{rc'}{rb'}$$

ahol:

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

Visszahelyettesítve, a nyírási alakváltozás:

$$\gamma = \Psi$$

3.3 Nem teljesen lekerekített könyök

Az 3.2.(c) ábrán, ahol $0 < \Psi < \pi - \Phi$, a nyírási alakváltozás a következőképpen írható fel:

$$\gamma = \frac{a'u}{d'u}$$

ahol:

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

Visszahelyettesítve, a nyírási alakváltozás általános alakban:

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

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 1. egyenlet alapján, ez az Iwahashi-képlet [Iwahashi, 1996]:

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

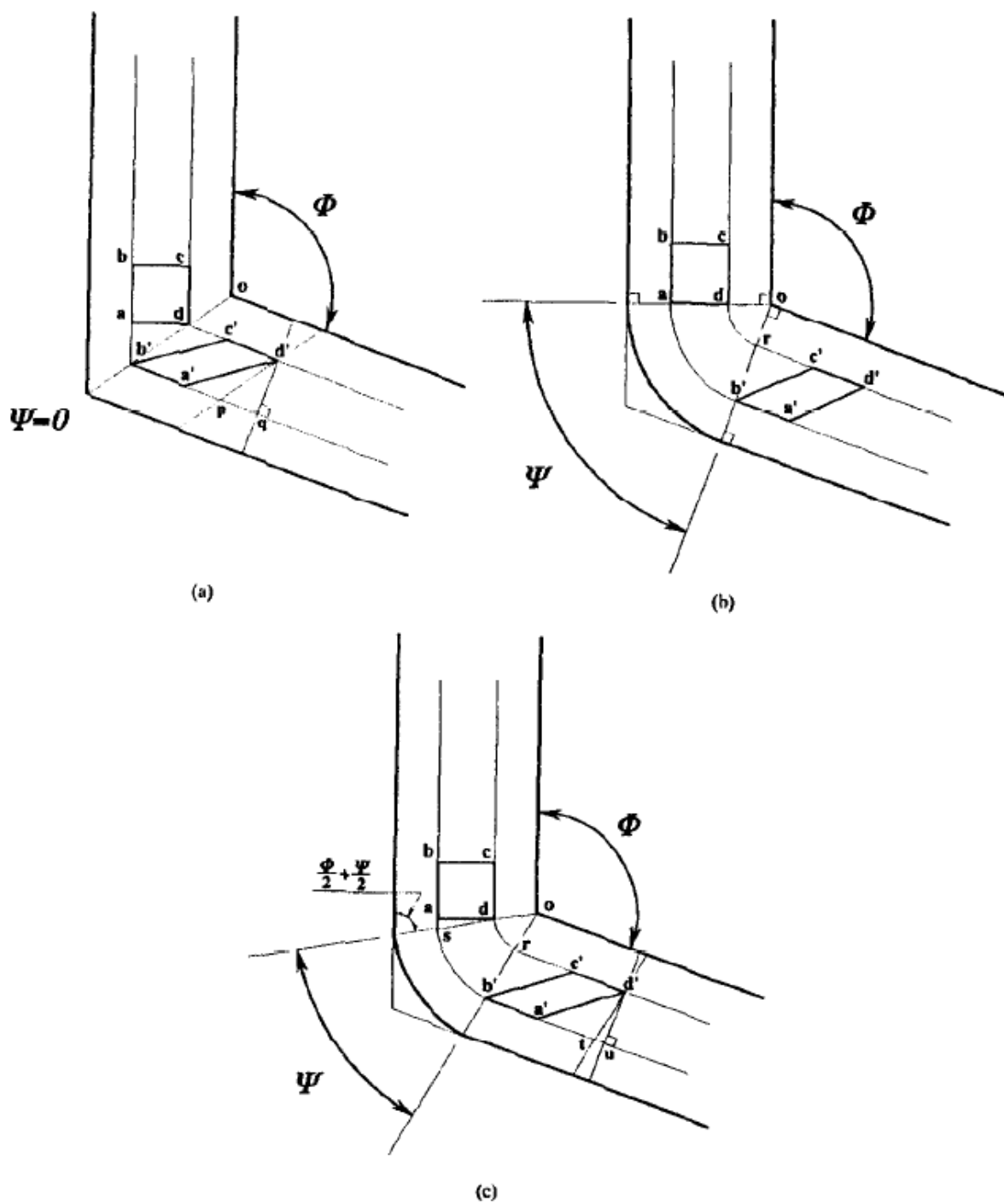
(1)

Többszöri, n számú átsajtolás esetén:

$$\varepsilon_n = n\varepsilon_{eq}$$

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

$$\varepsilon_{eq} = \frac{P}{Y}$$



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

a)

szögek	csatorna	90	100	110	120	130	140	150	160	170
könyök	psi0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	psi25	22.50	20.00	17.50	15.00	12.50	10.00	7.50	5.00	2.50
	psi50	45.00	40.00	35.00	30.00	25.00	20.00	15.00	10.00	5.00
	psi75	67.50	60.00	52.50	45.00	37.50	30.00	22.50	15.00	7.50
	psi100	90.00	80.00	70.00	60.00	50.00	40.00	30.00	20.00	10.00

b)

eps-eq	90	100	110	120	130	140	150	160	170
psi0	1.1547	0.9689	0.8085	0.6667	0.5384	0.4203	0.3094	0.2036	0.1010
psi25	1.0442	0.8994	0.7661	0.6419	0.5250	0.4137	0.3067	0.2028	0.1009
psi50	0.9691	0.8492	0.7339	0.6224	0.5140	0.4082	0.3045	0.2022	0.1008
psi75	0.9232	0.8175	0.7130	0.6094	0.5066	0.4045	0.3029	0.2017	0.1008
psi100	0.9069	0.8061	0.7054	0.6046	0.5038	0.4031	0.3023	0.2015	0.1008

c)

dőlésszög	90	100	110	120	130	140	150	160	170
psi0	26.57	30.79	35.53	40.89	47.00	53.95	61.81	70.57	80.08
psi25	28.94	32.70	37.00	41.97	47.72	54.38	62.02	70.64	80.08
psi50	30.78	34.21	38.19	42.85	48.32	54.74	62.19	70.70	80.09
psi75	32.02	35.23	39.00	43.45	48.73	54.99	62.32	70.74	80.10
psi100	32.48	35.61	39.30	43.68	48.89	55.08	62.36	70.76	80.10

3.1. 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). A jelölt értékek az általunk használt geometriákat jelölik.

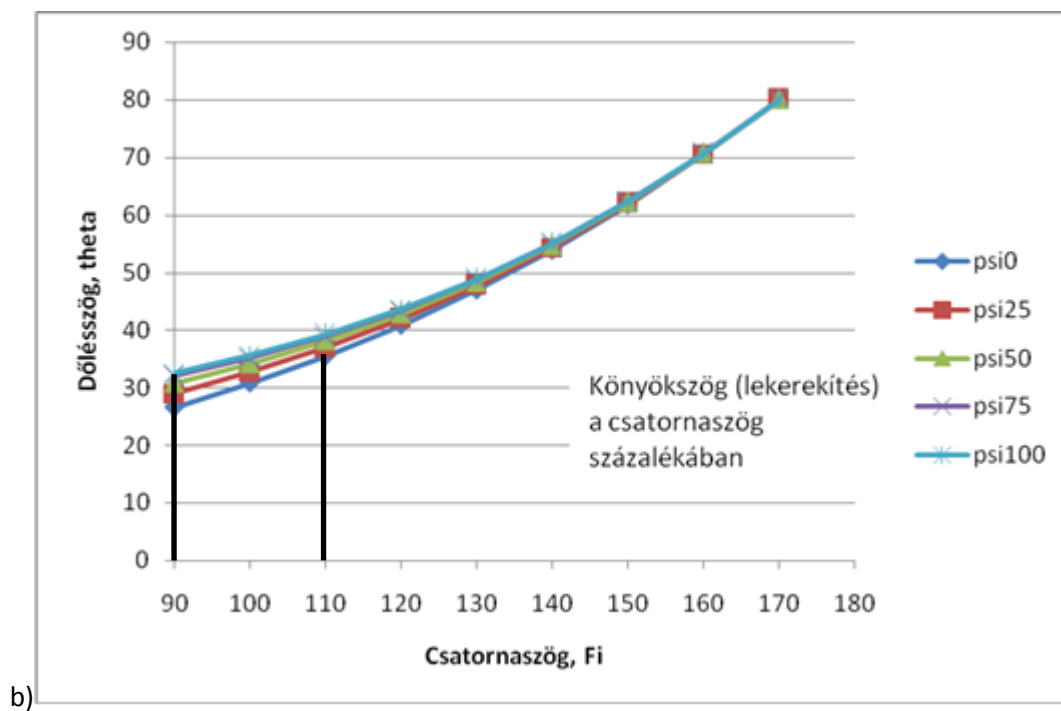
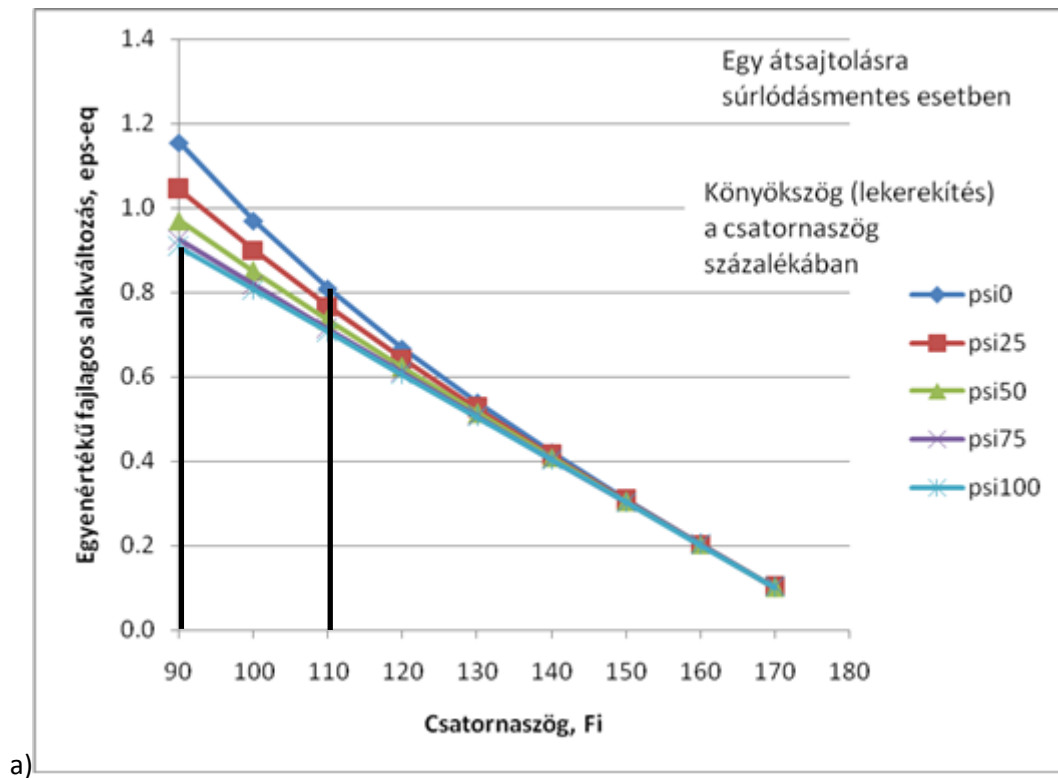
Az egyenértékű alakváltozást a alakváltozást az 1. táblázatban szereplő szögekre számítottuk ki. Az eredményeket a 3.3.a ábrán ábrázoltuk a csatornaszög függvényében egy átsajtolásra. Minél kisebb a csatorna szöge, annál nagyobb alakváltozás érhető el egy lépésben. Derékszög esetén az elérhető egyenértékű alakváltozás 0,9 teljesen lekerekített könyöknél, és közel 1,2 éles könyöknél.

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

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1}{\gamma}$$

(2)

képlettel számoltuk, és a 3.3.b ábrán látható a csatornaszög függvényében. Derékszögű csatornában a létrejövő dőlés 27-32 fok a könyökszög függvényében.



3.3. ábra: Az egyenértékű alakváltozás (a) és az átnyomás utáni dőlésszög (b) a csatornaszög és a könyökszög függvényében, egy átnyomás esetére. A grafikonon jelölt értékek az általunk használt geometriákhoz tartozó értékek.

3.4 Az alakváltozási sebesség becslése

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

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$$

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

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{eq} = const$$

Ezen kívül az átsajtolási sebesség is állandó:

$$v = const$$

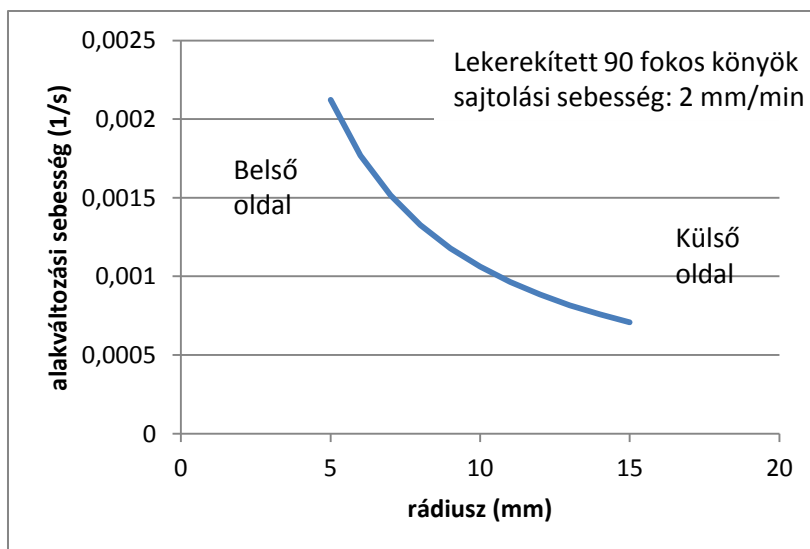
Lekerekített könyök esetén az alakváltozás a könyök legyező alakú részében játszódik le, a szükséges idő az ívhossztól függ:

$$\Delta t = \frac{l}{v} = \frac{r\Phi}{v}$$

Ebből az alakváltozási sebesség felírható:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \varepsilon_{eq} v \frac{1}{r\Phi}$$

Lekerekített könyök esetén az alakváltozási sebesség a keresztmetszetben belülről kifelé haladva csökken, a jellege hiperbolikus (3.4. ábra). A gyakorlatban a súrlódás hatásától kívül eső részen 2-3-szoros alakváltozási sebesség különbség van.



3.4. ábra: az alakváltozási sebesség rádiusz függvényében lekerekített könyök esetén

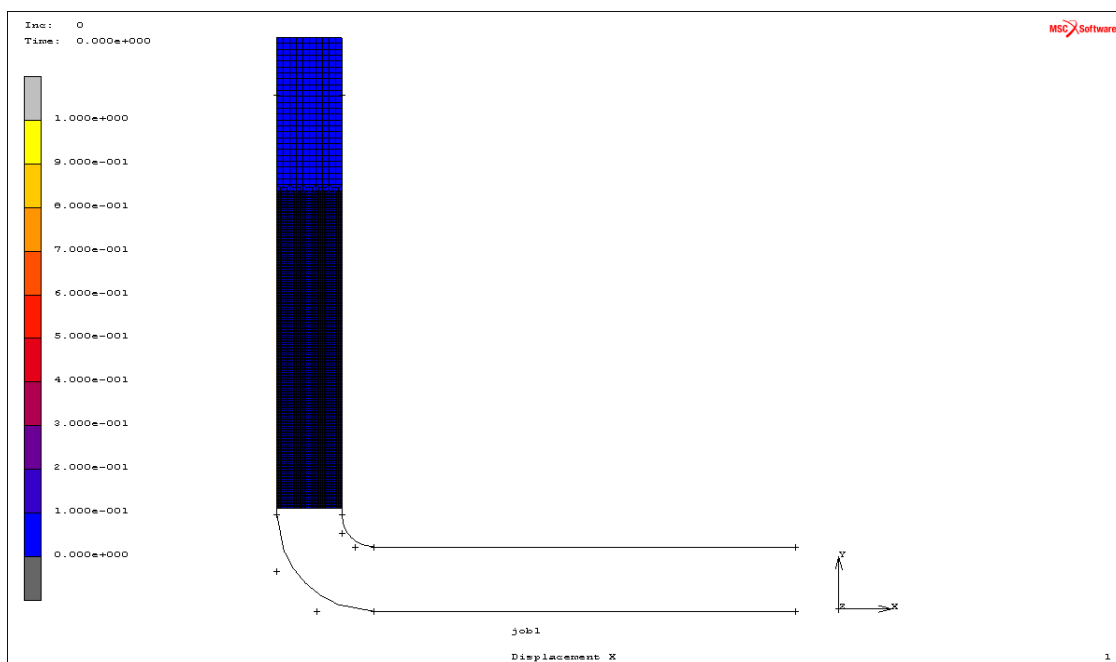
Éles könyök esetén az alakváltozás a fő nyírási síkban játszódik le, aminek kiterjedése az áramlási irányra merőlegesen zérus, ebből az következne, hogy az alakváltozási sebesség végtelen nagy, másrészt az is megállapítható, hogy az alakváltozási sebesség a keresztmetszetben állandó.

Végeselemes modellezéssel megmutatható, hogy az alakváltozási zóna kiterjedése mekkora, durva közelítéssel ez vehető a csatorna méretének a 20%-ra. Tipikusan az éles könyökben kb. 5x 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.

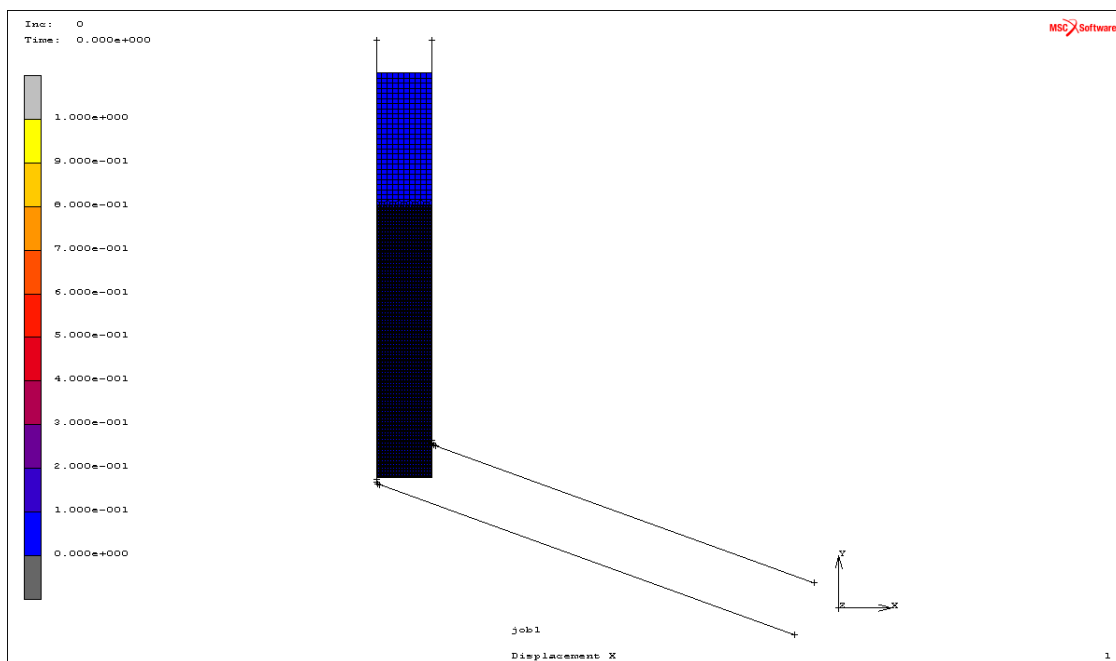
4 Végelelemes modellezés

4.1 A modellezés folyamata

Kétféle csatorna geometriát modelleztünk, az egyik 90° -os csatornaszögű, teljesen lekerekített (4.1. ábra), a másik 110° -os csatornaszögű éles könyök (4.2. ábra). A csatornaméret mindkét esetben 10 mm.

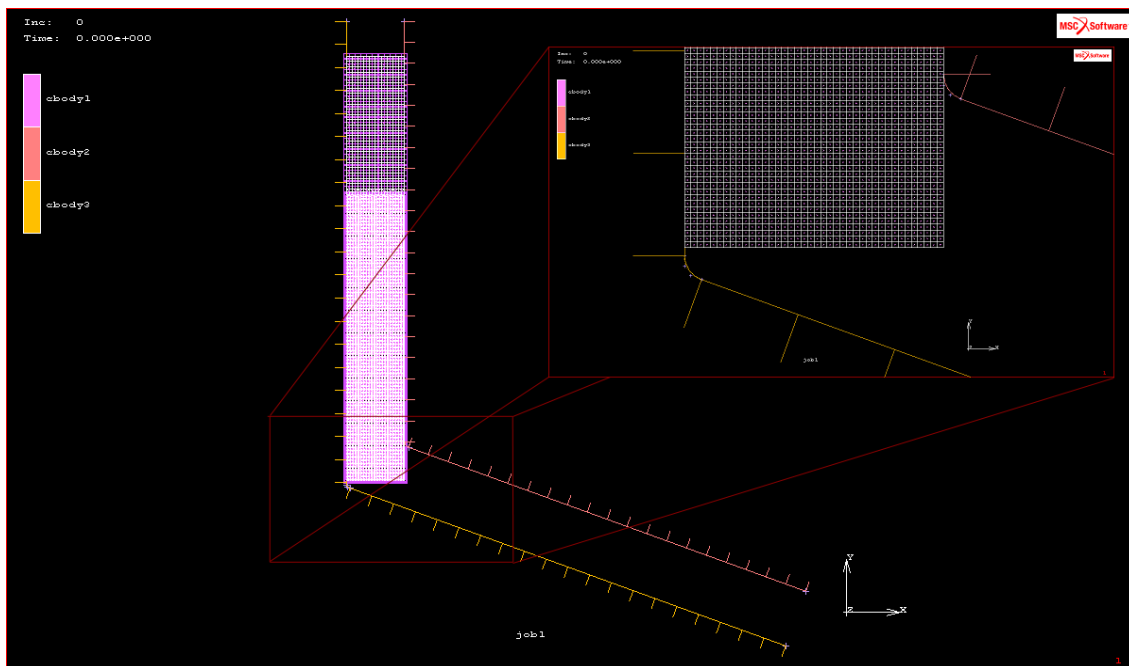


4.1. ábra: 90° -os, teljesen lekerekített könyök kialakítás



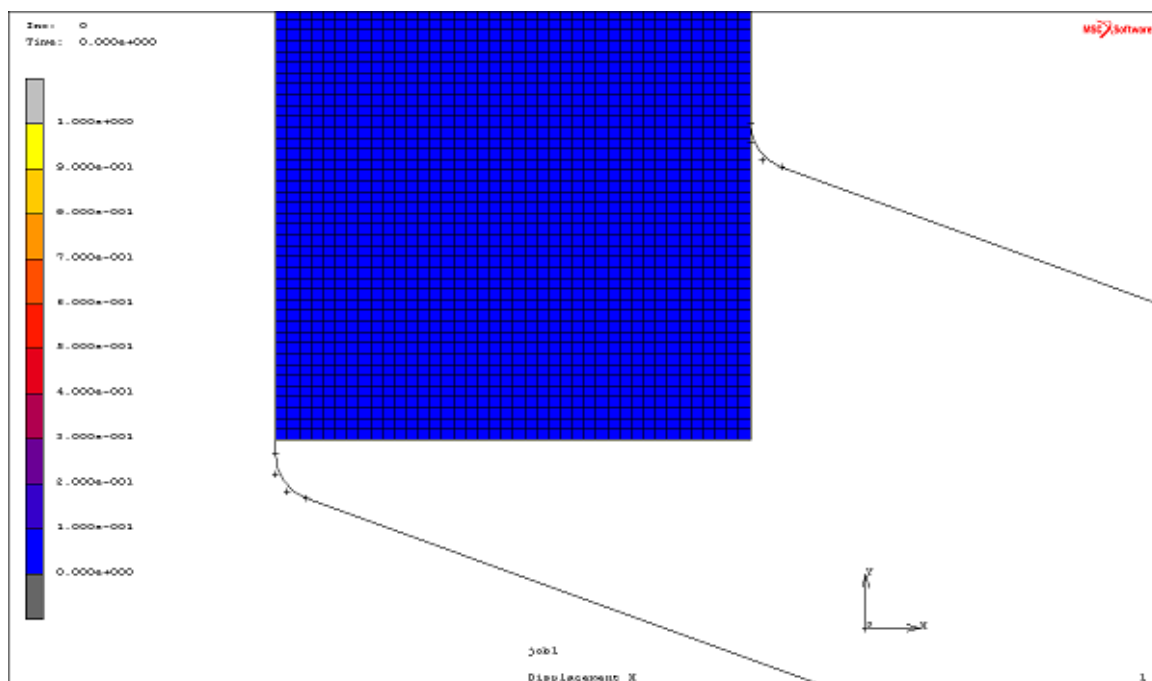
4.2. ábra: 110° -os, éles könyök kialakítás

Az éles könyök modelljében, a könyökben 1 mm-es lekerekítést (4.3. ábra) kellett alkalmazni a szimuláció stabil futása érdekében.



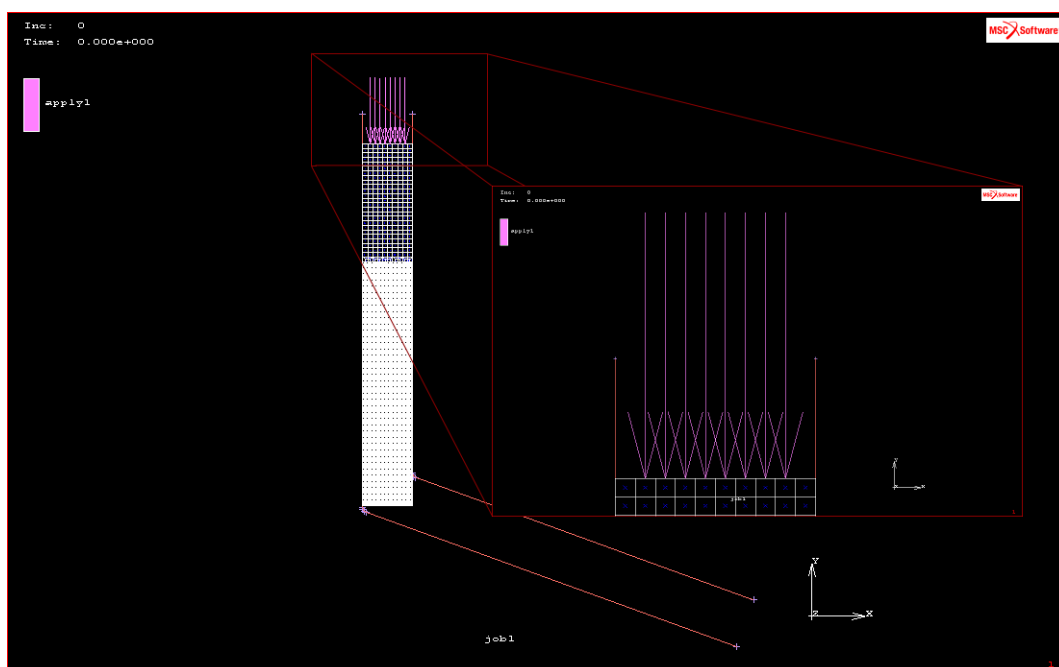
4.3. ábra: 1 mm-es lekerekítés a stabil futás érdekében

Az eredeti próbatest egy hengeres darab, mi viszont síkban dolgoztunk, mert a gyorsabb síkbeli alakváltozási feltételt használtuk. A próbatest 10 mm széles és 80 mm hosszú. Kezdetben 10x80 elemre (kvadratikus négy csomópontos elemre) osztottuk fel, amit később két lépésben finomítottunk, ezzel 8900 elemre felosztva a próbatestet (4.4. ábra).



4.4. ábra: rácsos felosztás

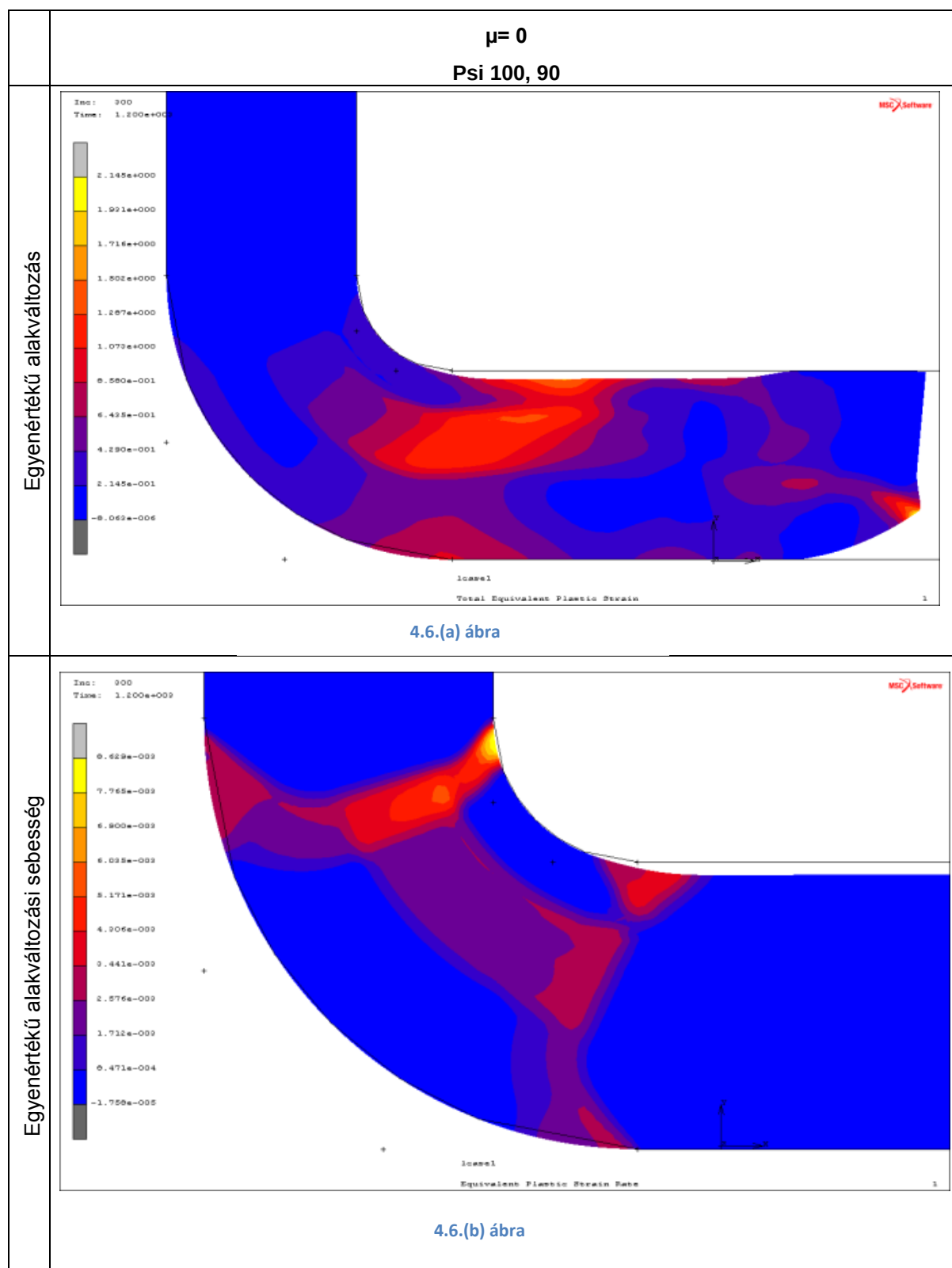
A Marc Mentat 11-es elemtípusát használtuk, ez egy síkbeli alakváltozáshoz tartozó teljes integrálású elem [Marc dokumentáció]. A sajtoló csatornát merev testként modelleztük, azaz a csatorna maga nem deformálódhat, a csatorna síkbeli metszetét a külső és belső oldalon egy-egy görbével rajzoltuk be. A 90°-os csatorna belső oldalán a lekerekítési sugár 5 mm, a külső oldalon 15 mm. A csatorna és a próbadarab közti súrlódást $\mu=0.1$ -es értékkel vettük figyelembe, vagy pedig $\mu=0$ értékkel súrlódásmentes esetet vettünk. A súrlódást Coulomb súrlódásként értelmezzük. A próbatest anyagát ideálisan rugalmas, ideálisan keményedő alakváltozási sebesség érzéketlen anyagmodellel írtuk le. A rézre vonatkozó anyagi paraméterek: rugalmassági modulusz: 110 GPa, Poisson-tényező: 0.33, folyáshatár: R_p : 100 MPa, a keményedés pedig $\Delta\epsilon_p=10$ értékéhez 10%-os.



4.5. ábra: 2mm/perc előtolás a próbatest felső csomópontjaira

Peremfeltételként egyedül az előtolást (4.5. ábra) alkalmaztuk, ennek mértéke 2mm/perc, ugyanúgy, ahogyan a valós kísérleteknél is. Ezt az előtolást a próbatest bemenő csatorna felőli végének felületén elhelyezkedő csomópontokra időben változó eltolódásként alkalmaztuk. A szimulációban összesen maximum 40 mm-nyi átsajtolást futtatunk, az ehhez tartozó időtartam 1200 másodperc. A szimulációt az egyenértékű alakváltozási mező és az egyenértékű alakváltozási sebesség mező kiértékeléséhez futtatjuk.

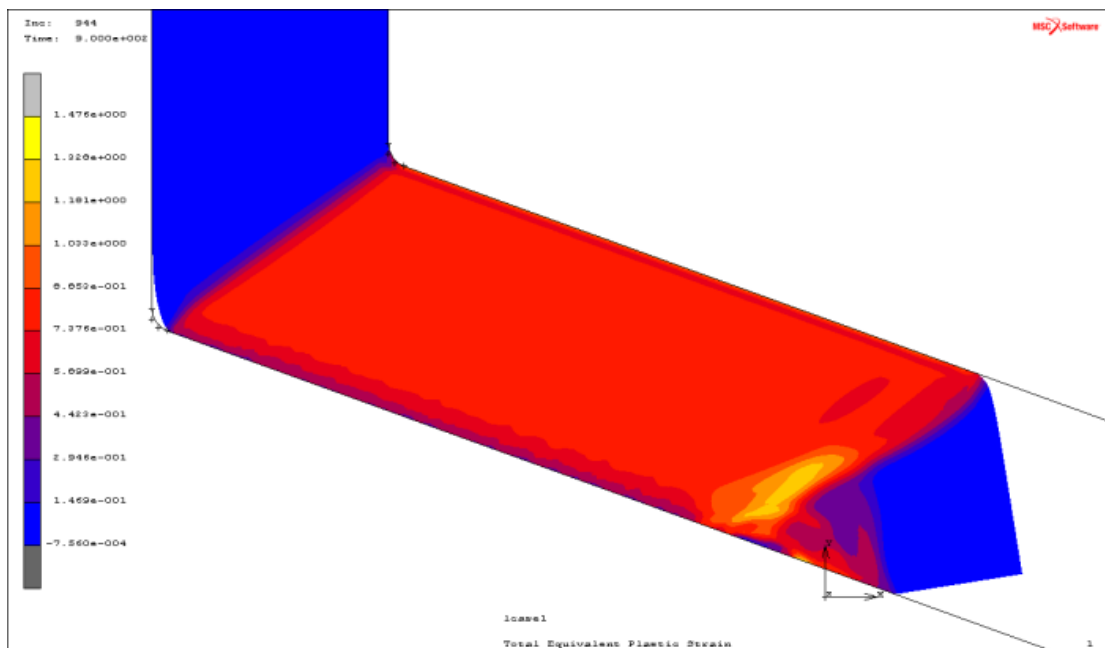
4.2 Az egyenértékű alakváltozás mező és az egyenértékű alakváltozási sebesség kiértékelése súrlódásmentes esetben



$$\mu = 0$$

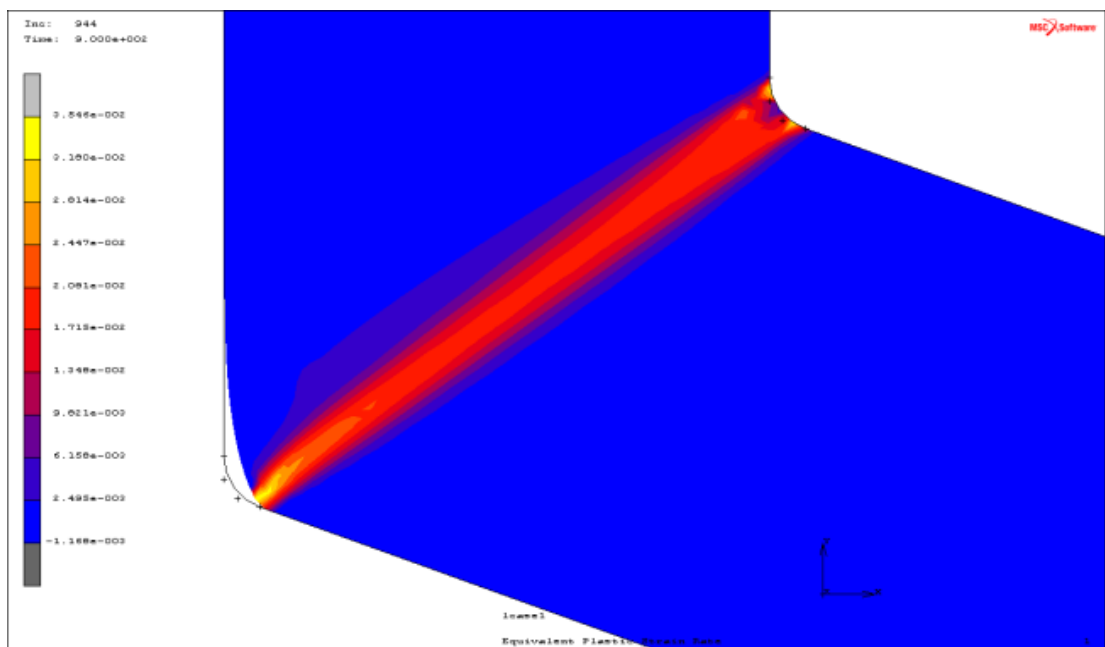
Psi 00, 110

Egyenértékű alakváltozás



4.6.(c) ábra

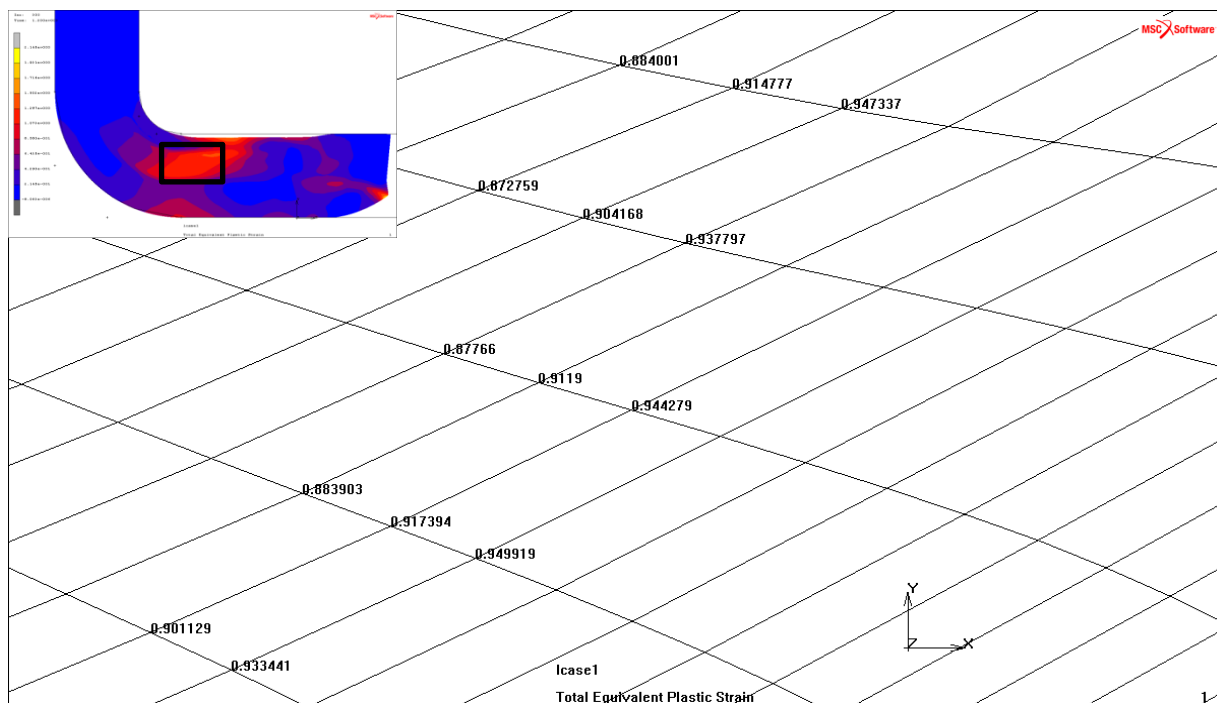
Egyenértékű alakváltozási sebesség



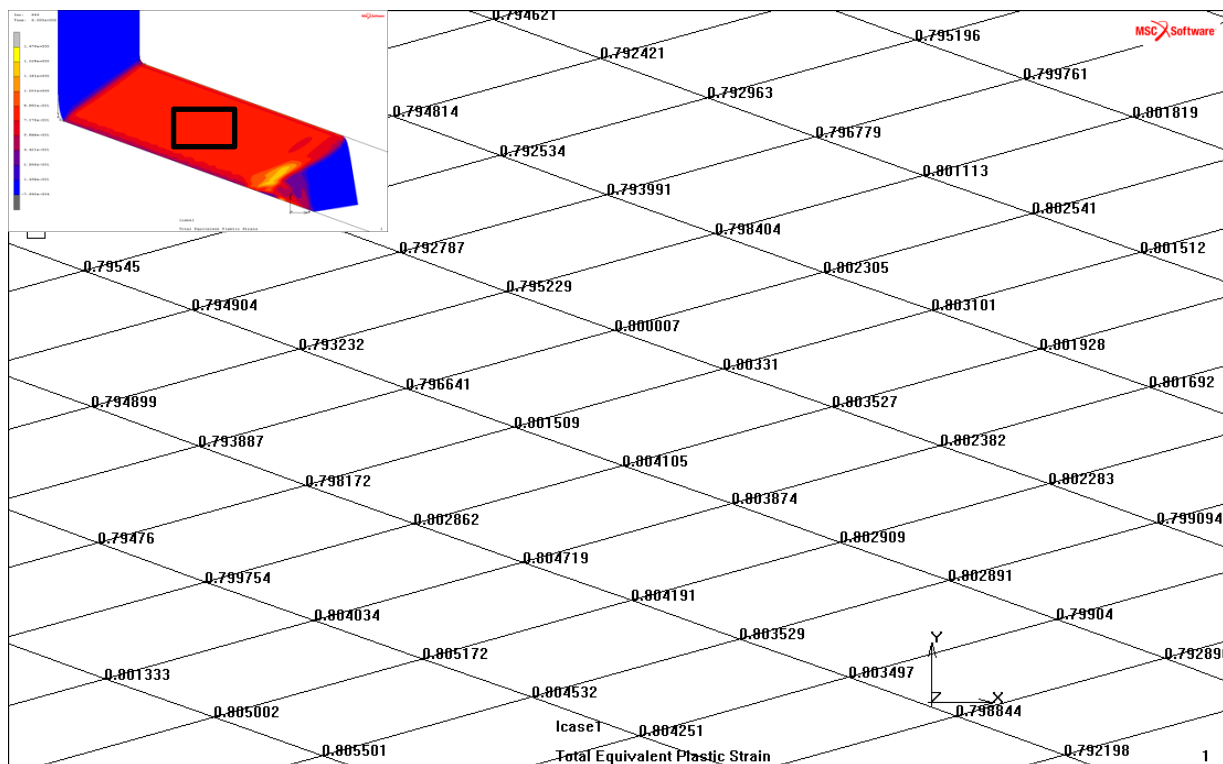
4.6.(d) ábra

4.6. ábra: az egyenértékű alakváltozás mező és egyenértékű alakváltozási sebesség éles és lekerekített könyök esetén

A szimuláció sikeres futtatása után először az egyenértékű alakváltozás mezőt vizsgáltuk mindkét csatornakialakítás esetén. A 4.6. ábrán a $\mu = 0$, súrlódásmentes változatot ábrázoltuk. Látható, hogy az éles könyökkialakításnál az alakváltozás eloszlás egyenletesebb, a lekerekített könyöknél helyenként változó, ugyanis éles könyök esetén az ECAP során a két csatorna keresztezési síkjának megfelelő fő nyírási síkban (MSP) erőteljes, egyszerű nyírás játszódik le (4.6.(d) ábra), lekerekített könyök esetén a nyírási sík egy legyezőszerű felületté nyílik (4.6.(b) ábra). Az egyszerű mechanikai modellel végzett számítások 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 (4.7. ábra), mivel itt az alakváltozás nem olyan egyenletes, mint éles könyökkel, éles könyök használatakor viszont ezredes pontosságú eredményeket kaptunk (4.8. ábra).

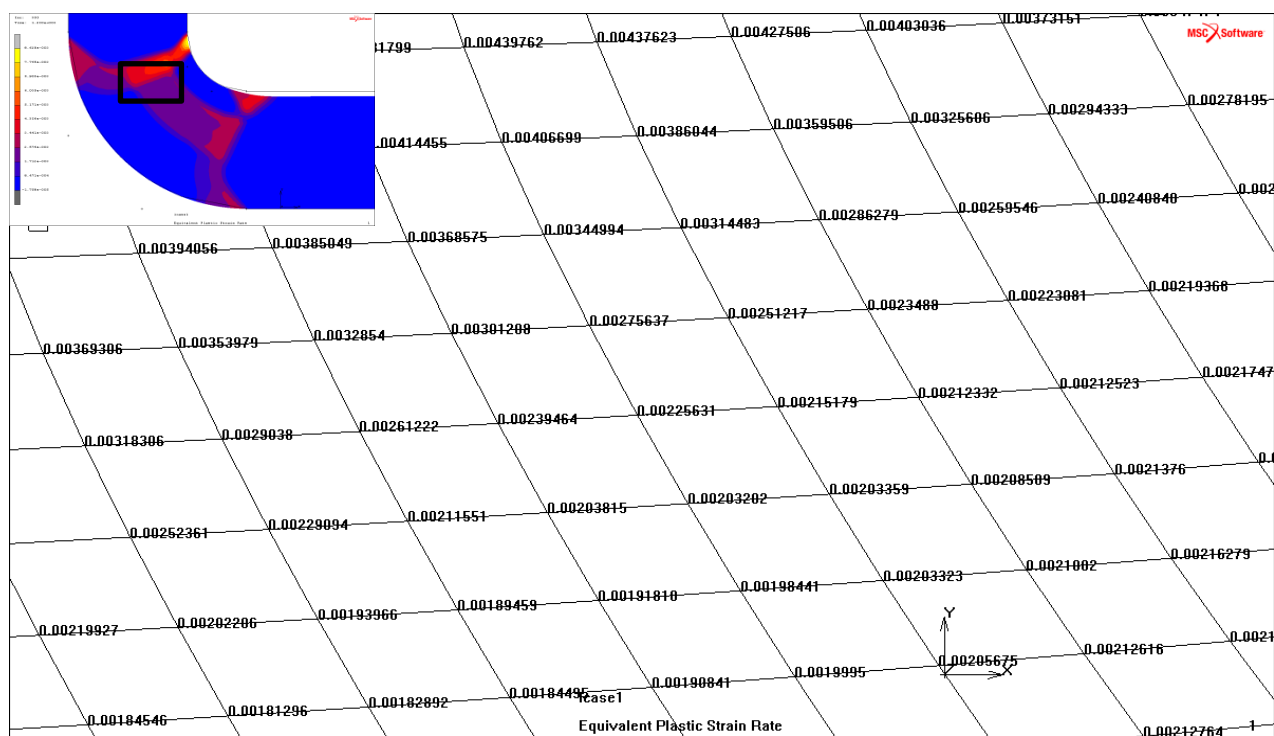


4.7. ábra: egyenértékű alakváltozás 90°-os lekerekített könyök esetén

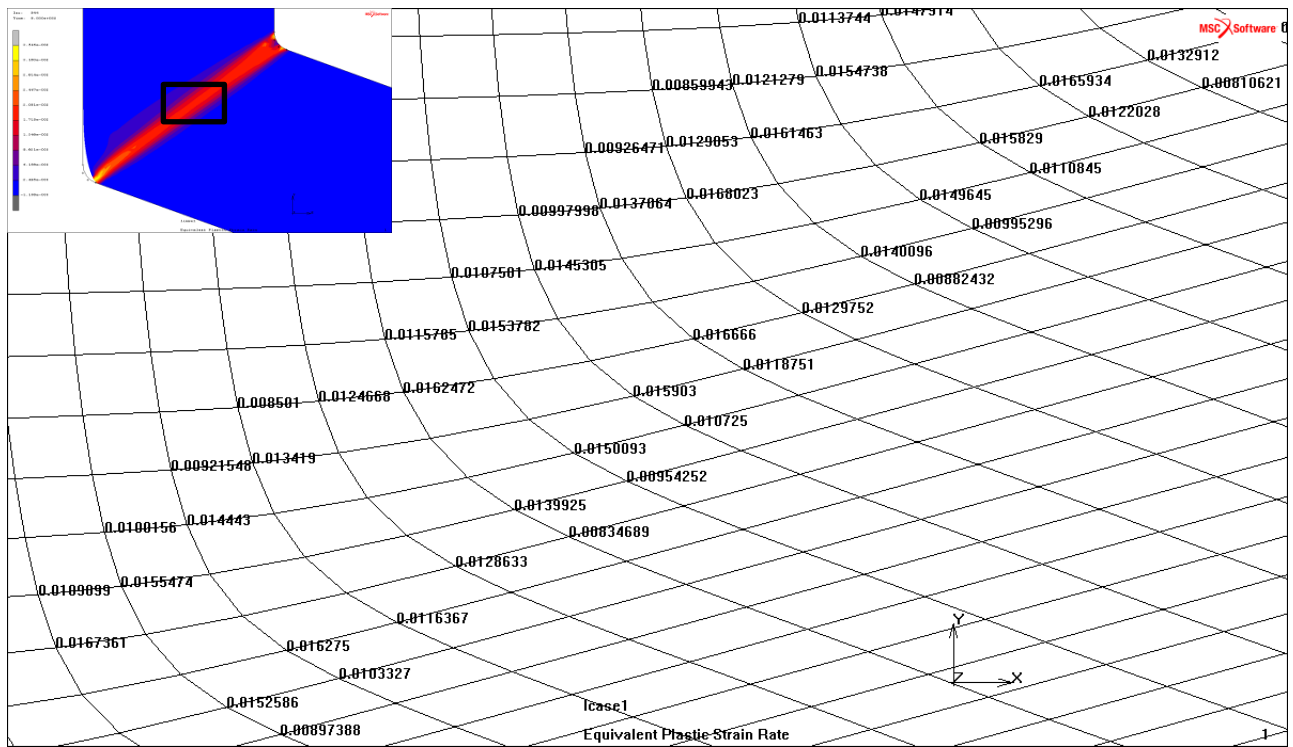


4.8. ábra: egyenértékű alakváltozás 110°-os éles könyök esetén

Ezt követően a Marc program eredményei közül a Total equivalent plastic strain rate-et, azaz az egyenértékű alakváltozási sebesség eredményeit értékeltük. A gyakorlati alapok szerint az alakváltozási sebesség Psi0, 110-nél a belső oldaltól a külső oldalig állandó és körülbelül 0.016 1/s-nek vehető. Psi100, 90-es kialakítás esetén az alakváltozási sebesség a belső oldaltól a külső oldalig csökken az éles könyök 1/10-e érték körül.

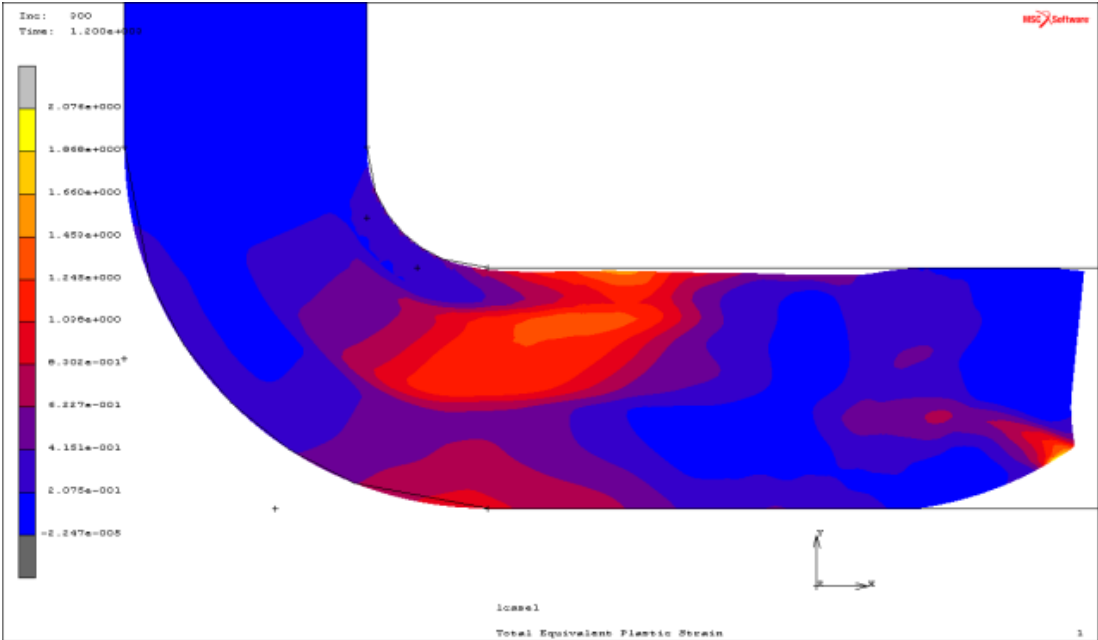
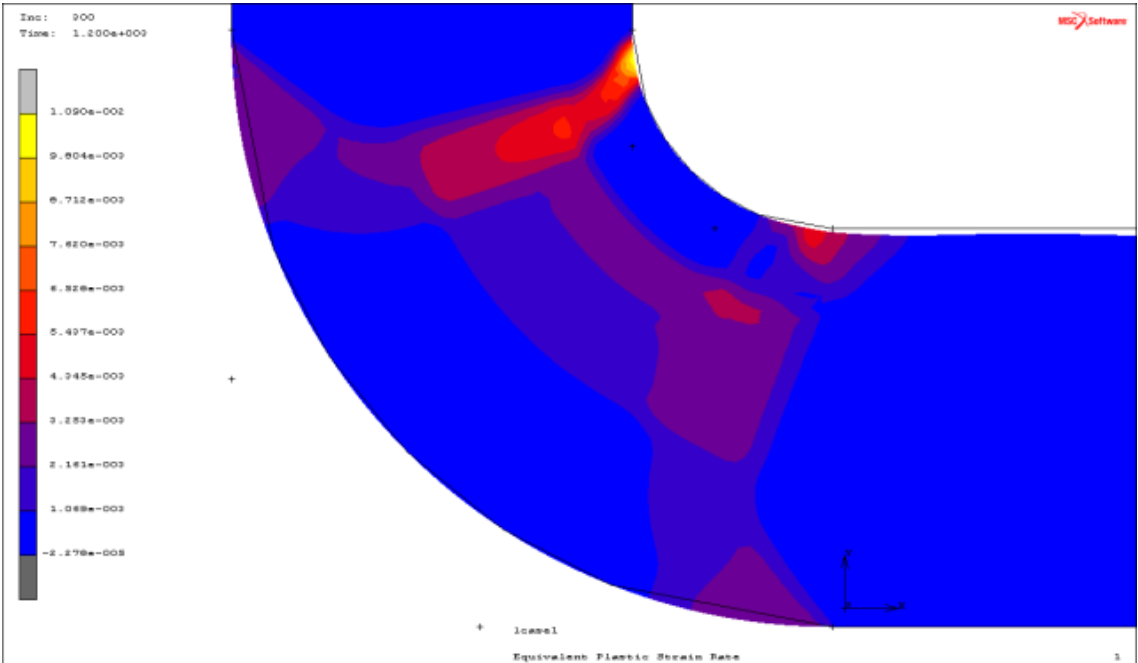


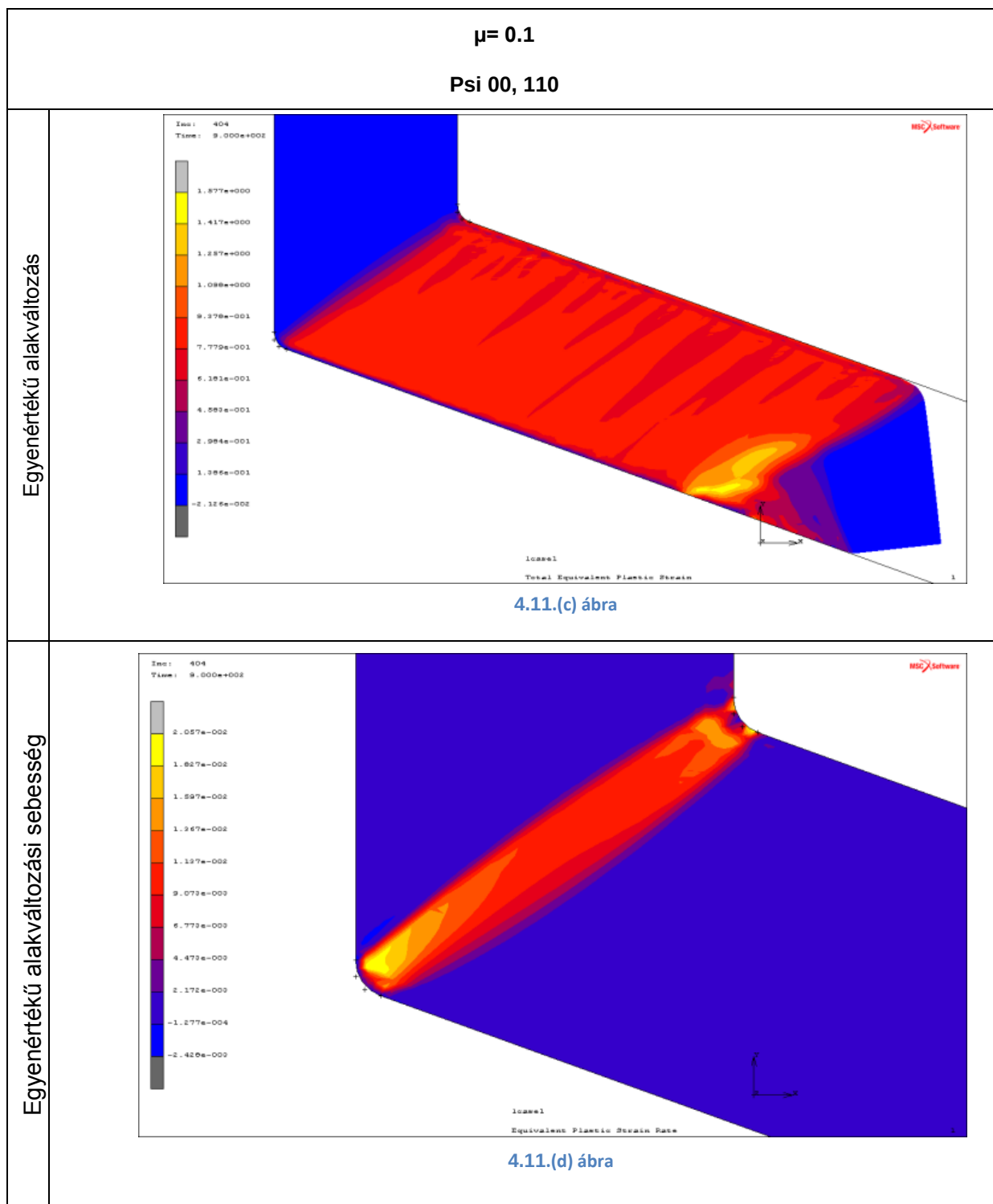
4.9. ábra: egyenértékű alakváltozási sebesség 90°-os lekerekített könyök esetén



4.10. ábra: egyenértékű alakváltozási sebesség 110°-os éles könyök esetén

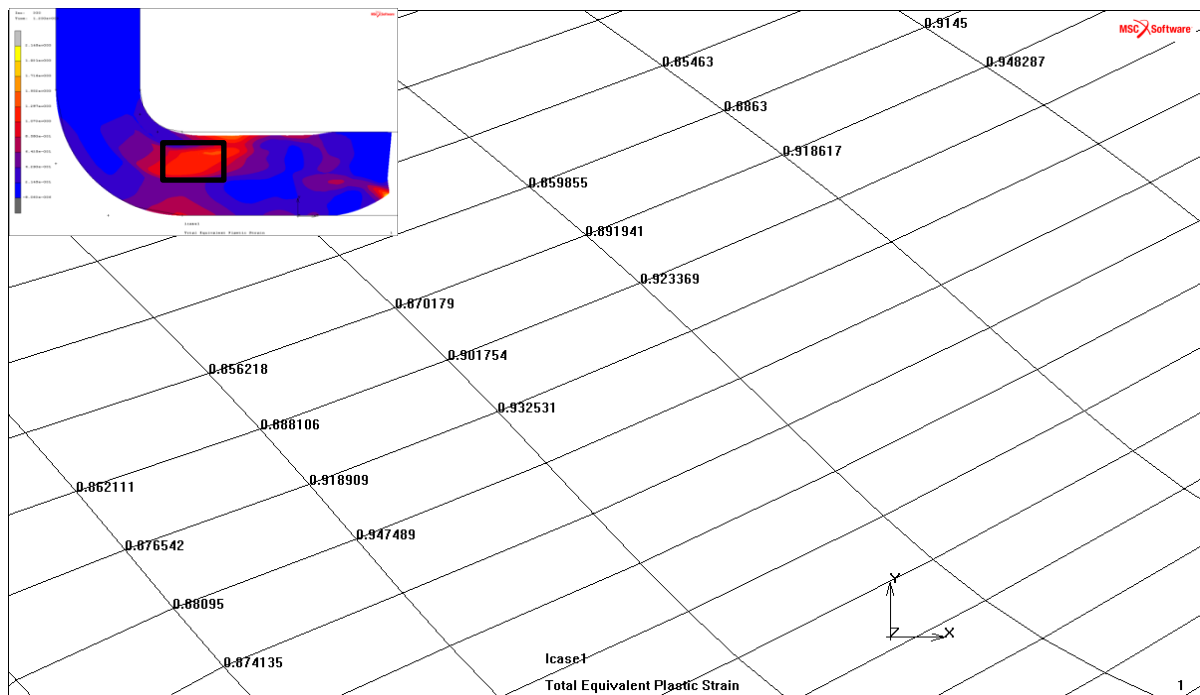
4.3 Az egyenértékű alakváltozás mező és az egyenértékű alakváltozási sebesség kiértékelése $\mu=0.1$ súrlódás figyelembe vételével

	$\mu=0.1$ Psi 100, 90
Egyenértékű alakváltozás	 4.11.(a) ábra
Egyenértékű alakváltozási sebesség	 4.11.(b) ábra

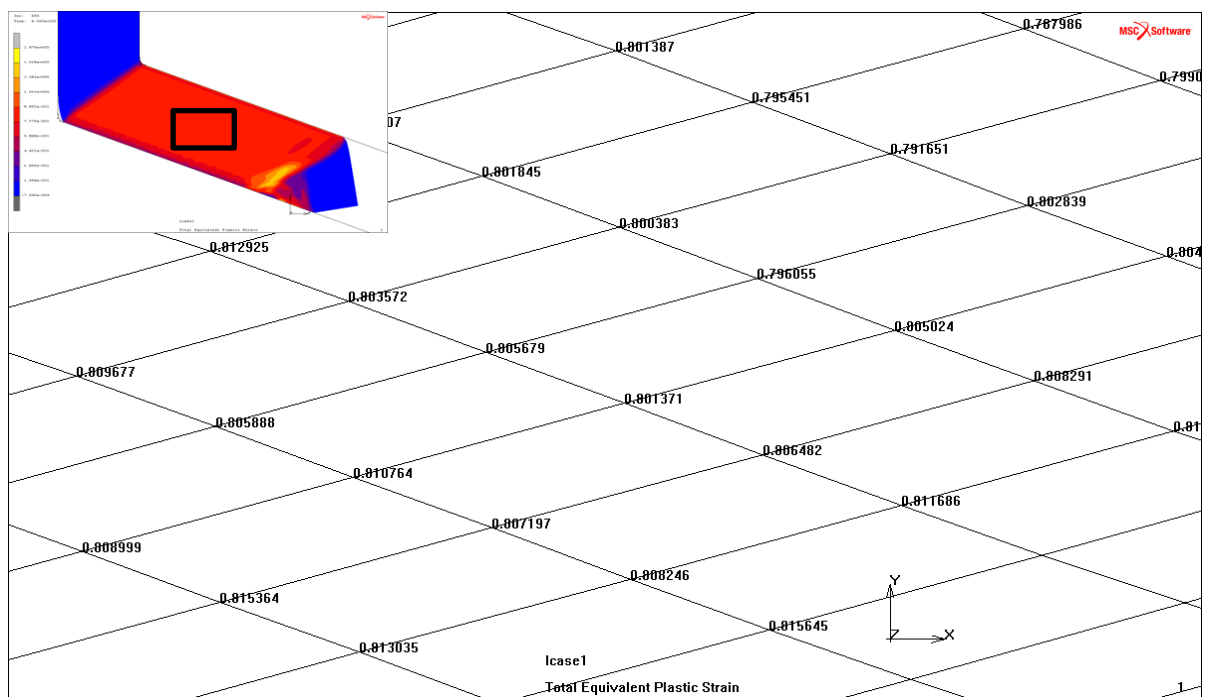


4.11. ábra: az egyenértékű alakváltozás mező és egyenértékű alakváltozási sebesség éles és lekerekített könyök esetén

A második esetben a csatorna és a próbadarab közti súrlódást $\mu=0.1$ -es értékkel vettük figyelembe, amely súrlódást Coulomb súrlódásként értelmeztünk. Látható, hogy a súrlódó erőnek köszönhetően az éles csatorna sarkát is kitölti az anyag (4.11.(d) ábra), ahogyan azt a valós kísérletekben is megfigyelhettük. A súrlódás ráadásával még pontosabb eredményeket kaptunk:

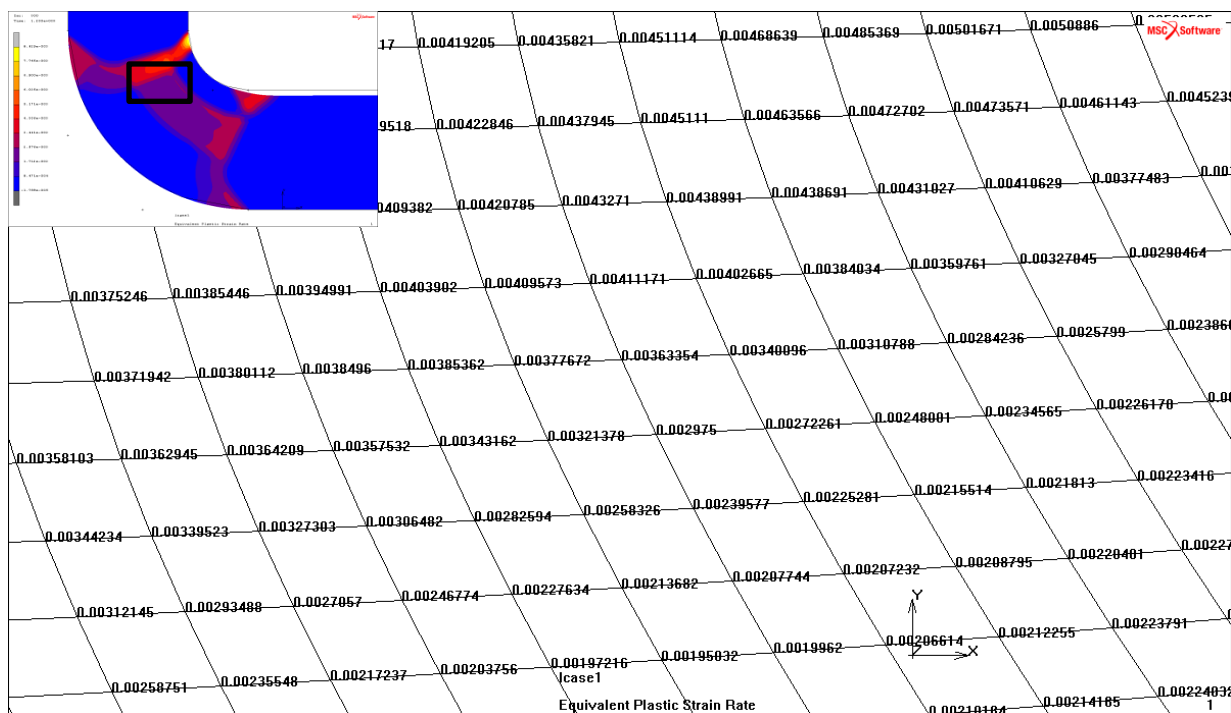


4.12. ábra: egyenértékű alakváltozás 90°-os lekerekített könyök esetén

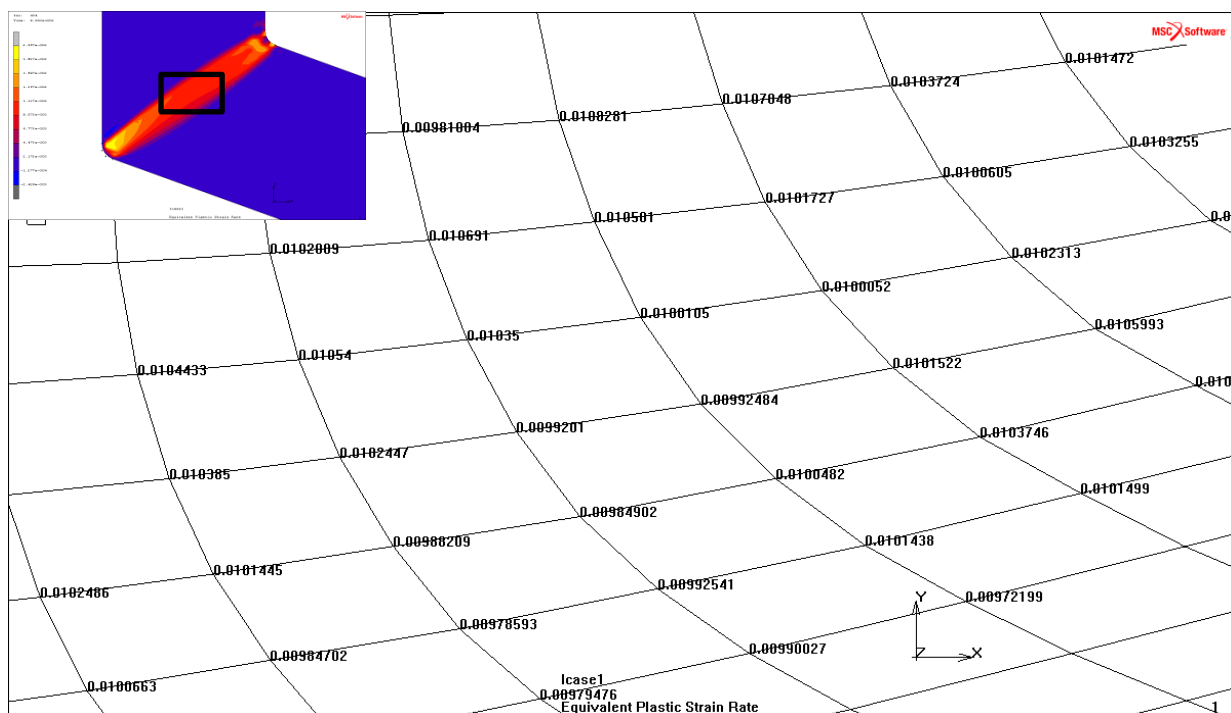


4.13. ábra: egyenértékű alakváltozás 110°-os éles könyök esetén

Az egyenértékű alakváltozási sebesség $\mu = 0.1$ esetben:



4.14. ábra: egyenértékű alakváltozási sebesség 90°-os lekerekített könyök esetén



4.15. ábra: egyenértékű alakváltozási sebesség 110°-os éles könyök esetén

5 Az alakváltozás kísérleti meghatározása

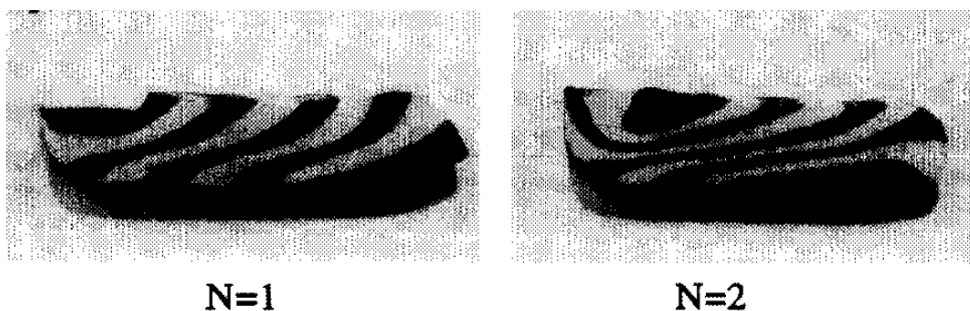
5.1 Könyöksajtolás gyurmás modellkísérletekkel

Az előző fejezetek alapján súrlódásmentes és ideálisan képlékeny anyagnál a könyöksajtolásnál létrejövő alakváltozást egyedül a csatorna geometriája határozza meg. Az alakváltozás az előzőekben definiált dőlésszöggel jellemezve egy egyszerű modellkísérlettel megmutatható. 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. Az 5.1. ábrán látható a félig átnyomott próbatesten létrejövő alakváltozás. A bemenő csatornában 90 fokos dőlésszögű sávok csatornával érintkező részei kis mértékben visszahajlanak, a súrlódása kenés ellenére sem küszöbölhető ki teljesen. Az átsajtolás hatására kialakuló dőlés a kimenő oldalon jól látható.



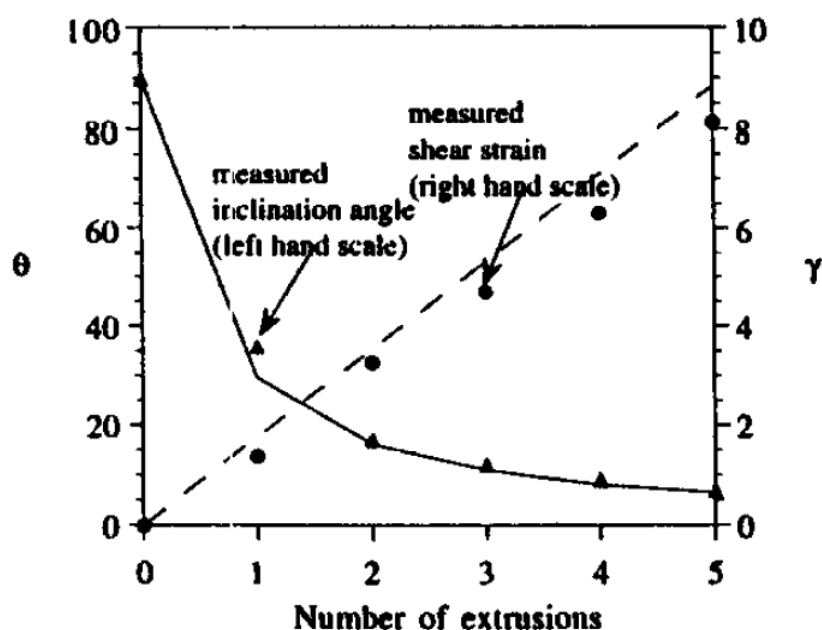
5.1. ábra: Modellkísérlet a félig átnyomott gyurmából készült próbatesten létrejövő alakváltozás bemutatására.

Hasonló kísérleteket végzett [Wu, 1997] 90 fokos csatorna- és könyökszögű szerszámmal. Az 5.2. 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.



5.2. ábra: Egy- és kétszeri átsajtolás utáni gyurmaalakok. A szerszám csatornaszöge és könyökszöge 90 fokos, a csatorna műszerolajjal kent [Wu, 1997].

A középvonalban mért dőlésszögekből számítható a nyírási alakváltozás, valamint ez összehasonlítható a 3.1.(a) és 3.1.(c) táblázatban levő elméleti értékekkel, melyeket az Iwahashi-módszerrel számítottunk ki. Az összehasonlítás látható a 10. ábrán. A középvonalban mért értékek ponttal jelöltek, nagyon jól illeszkednek az elméleti görbékre.



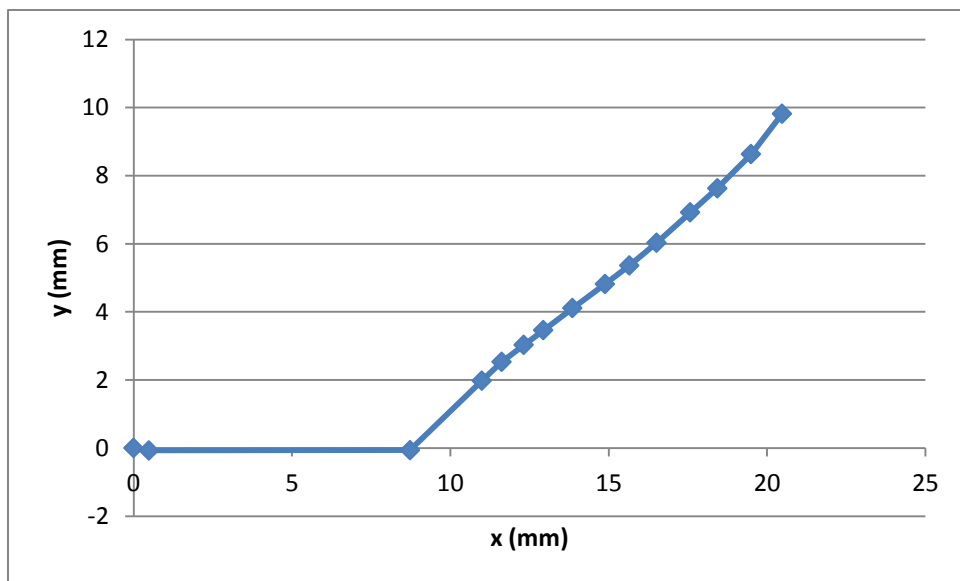
5.3. ábra: nyírási alakváltozás és dőlési szög az átsajtolás számának függvényében, 90 fokos csatorna és könyökszögnél. A pontok mérési adatok, a vonalak az elméleti értékek [Wu, 1997].

5.2 A geometria alakulása valós kísérletekben

A 110°-os éles és a 90°-os lekerekített szerszámon nagy tisztaságú réz munkadarabokat sajtoltunk át 2 mm/min sebességgel lítiumos zsírkenés mellett szobahőmérsékleten. Az 5.4. ábrán az éles könyökből kivett darab látható, amely egy teljesen átsajtolt munkadarab mögött helyezkedett el. Ebben az esetben a véglap deformációja visszaellenőrizhető a korábban ismertetett dőlésszög vizsgálattal (3.1.(c)). A várható dőlésszög értéke táblázat alapján 35.53°. A munkadarab véglapját végigmértük mérőmikroszkóppal, a mért pontok láthatók az 5.5. ábrán, valamint az 5.1. táblázatban. A széleken lévő pontok kivételével mindegyik ponthoz kiszámítottuk a ponthoz húzható érintőt, vagyis az adott ponthoz tartozó dőlésszöget, majd ezt a dőlésszöget korrigáltuk a hossz tengely vízszintessel bezárt szögével. A legkisebb szögeket közel a minta felénél mértük, ezek körülbelül 0,5 fokos pontossággal megfelelnek az elméleti értéknek. A lekerekített könyök esetén az átsajtoláskor a kimenő csatornában a munkadarab nem töltötte ki a csatornát a belső oldalon, itt a felület érdes, szakadozott lett (5.6. ábra).



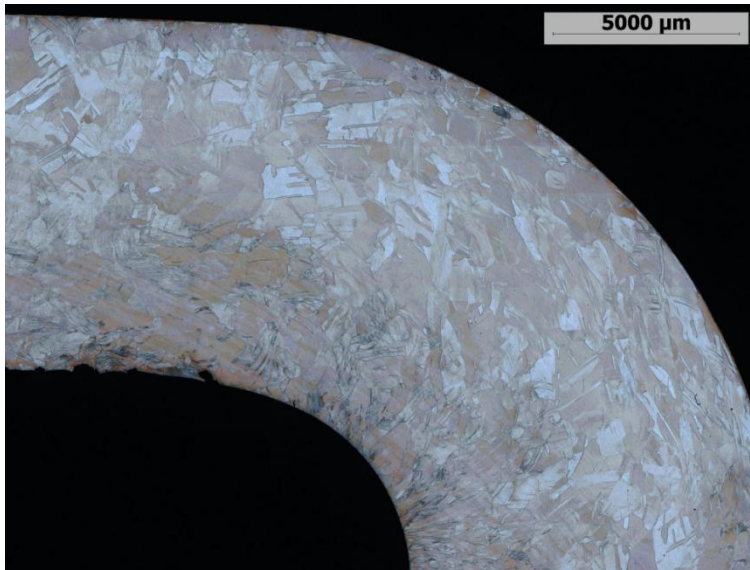
5.4. ábra: A véglap dőlésszöge az átsajtolás második mintáján



5.5. ábra: A véglap profilja mérőmikroszkóppal mérve

5.1. táblázat: A véglap profilja mérőmikroszkóppal mérve, valamint a számított dőlésszög, és az alapvonal dőlésével korrigált dőlésszög

x(mm)	y(mm)	dőlésszög (fok)	korrigált dőlésszög (fok)
0.48	-0.07		
8.73	-0.059		
11	1.98	38.43	38.62
11.62	2.53	35.17	35.35
12.32	3.03	35.05	35.23
12.94	3.46	34.88	35.06
13.86	4.11	34.90	35.08
14.89	4.82	36.78	36.96
15.65	5.36	38.98	39.16
16.51	6.03	39.80	39.98
17.58	6.92	41.74	41.93
18.43	7.63	46.83	47.01
19.5	8.63		
20.48	9.82		



5.6. ábra: a belső oldalon felszakadozott munkadarab, nem töltötte ki a csatornát

6 Következtetések

A könyöksajtolás végeselemes modelljét felépítettem négy esetre: 110 fokos éles, valamint 90 fokos lekerekített geometria esetén, egyrészt súrlódásmentes esetben, másrészt $\mu = 0,1$ súrlódási tényező használatával. Az anyagmodell ideálisan rugalmas, képlékeny-keményedő, alakváltozási sebesség érzéketlen. Vizsgáltam a deformáció, alakváltozás és alakváltozási sebesség eloszlását, valamint ezt összehasonlítottam kísérleti és analitikus eredményekkel:

1. A könyöksajtolás kontinuummechanikai analíziséből meghatároztam a 110 fokos éles és 90 fokos lekerekített könyökgeometria esetén az egyenértékű fajlagos alakváltozás nagyságát, melyek 0,8 illetőleg 0,9 lettek. Az átlagos fajlagos alakváltozási sebesség nagyságát kb. 0,016 az előző, illetőleg 0,001 1/s az utóbbi esetre.
2. A végeselemes modellezésből származó következtetések:
 - a. 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 kísérletekben is igazolódott,
 - b. 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.
 - c. 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. Súrlódásos esetben az alakváltozó kissé megnövekszik, és kevésbé lesz homogén, főleg a súrlódó élék közelében. Lekerekített könyök esetén a nagy lekerekítési sugár miatt nem legyező alakú az alakváltozási 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.
3. Nagy tisztaságú réz munkadarab 110 fokos könyökben való átsajtolása után létrejövő dőlésszöget mértem a véglapon, melyre kb. 35 fokot kaptam, ami 0,5 fokos hibával megegyezik az analitikus és végeselemes eredményekkel.

7 Hivatkozások

V. M. Segal: 'Materials processing by simple shear', Materials Science and Engineering A197 (1995) 157-164.

Krállics György, Fodor Árpád: A könyöksajtózási technológia, 2005.

Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, T. Langdon: Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. Scripta Materialia, Vol. 35, No. 2, pp. 143-146, 1996.

Marc 2010: Volume B, Element Library

V.M. Segal, V.I. Reznikov, A.E. Drobyshevskiy, V.I. Kopylov, Russian Metallurgy, (Eng. Transl.), 1, p. 115, 1981.

Y. Wu, I. Baker: An experimental study of equal channel angular pressing, Scripta Materialia, Vol. 37, No.4, pp. 437-442, 1997.