

**Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák
Doktori Iskola**

**TÖBBSZINTŰ MODELLEZÉS ALKALMAZÁSA A SZIMMETRIKUS ÉS AZ
ASZIMMETRIKUS HENGERLÉSI FOLYAMATOK VIZSGÁLATÁRA**

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

SZÜCS MÁTÉ
OKLEVELES ANYAGMÉRNÖK

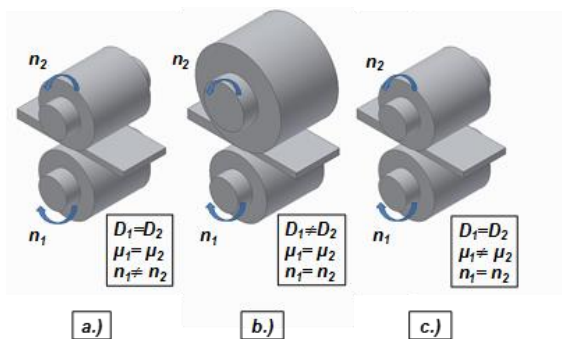
TÉMAVEZETŐK:
DR. KRÁLLICS GYÖRGY
EGYETEMI TANÁR
DR. GÁCSI ZOLTÁN
EGYETEMI TANÁR



Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet
MISKOLC
2017

1. BEVEZETÉS, AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITÚZÉSEI

A hideghengerelt lemez- és szalagtermékekkel szemben támasztott egyre növekvő elvárások olyan korszerű modellezési technikák alkalmazását is szükségessé teszik, amelyek biztosítják az alakított ötvözet anyagszerkezeti tulajdonságai és az azokat befolyásoló alapvető hengerlési paraméterek közötti összefüggések minél pontosabb vizsgálatát. A nagyszámú fizikai-, geometriai változó, valamint a több paraméteres sűrűdési- és anyagmodellek együttes kezeléséhez elterjedt a végeselemes módszer alkalmazása. A hengerlési folyamat szimulációjához készített végeselemes számításokban az eltérő peremfeltételeket figyelembe tudjuk venni, a modern mikroszerkezeti szimulációs eszközök (pl. vizskoplasztikus önkonzisztens módszer, amivel az alakítás hatására létrejövő textúra meghatározásához szükséges számítások végezhetők) használatával pedig a hengerlési paraméterek megváltozásának anyagszerkezeti vonatkozásait vizsgálhatjuk. Az ilyen jellegű modellezések eredményesen alkalmazhatóak a szimmetrikus és az aszimmetrikus hengerlések területén is. A hagyományos (szimmetrikus) hengerlések és az aszimmetrikus hengerlések (1. ábra) peremfeltételei különböznek egymástól, ez a technológiai eltérés a hengerelt termék mechanikai tulajdonságát és a mikroszerkezetét is befolyásolja. Az eltérő peremfeltételek alapvetően befolyásolják a lemez és a henger érintkező felületének sűrűdési viszonyait. Utóbbi jellemzésére a kísérleti méréssel és numerikus számításokkal előállított Stribeck diagram használata terjedt el.



1. ábra Aszimmetrikus hengerlési eljárások: a.) eltérő fordulatszámú hengerek b.) eltérő átmérőjű hengerek c.) eltérő súrlódás a lemez - henger érintkezési felületen

A diagram inverz módon, végeselemes számításokkal történő meghatározására eddig még nem találtam példát. Az aszimmetrikus hengerlések szemcsefinomító hatását, az eljárás peremfeltételeitől függő nyírt alakítási textúra kialakulását több szakcikk ismerteti. E jellemzők a hengerelt lemez mechanikai – tulajdonságai-ra és az alakíthatóságára is hatással vannak, továbbá a szemcsefinomodás össze-

függésbe hozható az alakítás jellegét meghatározó nem monotonitási mérőszámmal is. A szimmetrikus és az eltérő sebességű hengerlések paramétereinek hatásait már több szerző vizsgálta, ahol az illető eljárásokhoz nem-monotonitási számokat rendeltek.

A szimmetrikus és aszimmetrikus lemezhengerlési eljárások modellezésével és vizsgálatával kapcsolatos célkitűzéseimet nyitott kérdések formájában fogalmaztam meg.

1. A lemezhengerlés modellezéséhez kapcsolódó kérdéseim:

- a.) Kidolgozható-e olyan kétszintű modellezési eljárás, amiben a szimmetrikus és az aszimmetrikus hengerlés változó peremfeltételeinek hatását egyaránt figyelembe tudom venni?
- b.) A hengerlés kontinuum-mechanikai modelljében alkalmazott súrlódási modell figyelembe veszi - e a helytől függő szerszámnyomást, az alakított lemezeknek a változó alakítási szilárdságát, a henger és a lemez között fellépő relatív sebességet és a felületi minőség hatását kifejező súrlódási tényezőt, amelyek a technológiai folyamat peremfeltételeit jellemző paraméterek?
- c.) Meghatározható - e inverz végeselemes módszer segítségével a szimmetrikus hengerlés nyomott ívén az érintkezési felületek tribológiai viszonyait jellemző Stribeck diagram?
- d.) Milyen súrlódási állapotok jellemzik a vizsgált kísérleti hengerlést a végeselemes számításokkal előállított Stribeck diagram alapján az adott redukció, hőmérséklet és hengerlési sebesség tartományban?

2. A szimmetrikus és az aszimmetrikus hengerlések modellezéséhez, valamint az alakított lemezek mikroszerkezetének elemzéséhez kapcsolódó kérdéseim:

- a.) Megállapíthatóak – e az aszimmetrikus és a szimmetrikus kísérleti hengerléssel előállított textúrák eltérései a lemezhengerlés szimulációjára kidolgozott VE modell és a VPSC kristály-képlékenységtani modell alkalmazásával? Összevethetők – e a textúra modellezéssel számított pólusábrák a hagyományos röntgendiffrakciós mérések eredményeivel?
- b.) Megfigyelhetőek - e eltérések az eltérő súrlódású, az eltérő sebességű és a hagyományos hengerlésekkel alakított lemezek textúrájában?
- c.) Milyen kapcsolatban vannak egymással a mért és a számított pólusábrák valamint a kontinuummechanikai modellezéssel meghatározott alakváltozási mérőszámok?
- d.) Milyen nem-monotontás számok jellemzik a szimmetrikus és az aszimmetrikus hengerlési folyamatokat a számítási eredmények alapján?

- e.) Megerősítik - e a lemezmintákon végzett transzmissziós elektronmikroszkópos szemcsevizsgálat eredményei az aszimmetrikus hengerlésre jellemző szemcsefinomító hatást?

2. KUTATÓMUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA

A célkitűzéseimben feltett kérdések megválaszolásához egyrészt saját lemezhengerlési kísérleteket hajtottam végre EN AW6061 és EN AW5754 alumínium ötvözetekkel, illetve más szerzők által végzett acélhengerlési kísérletek (AISI 1005) mérési adatait értékeltem ki, majd használtam fel a kétszintű modellezési folyamatban. A modellezés első szintjén elvégeztem a kísérleti hengerlések alakítási folyamatának szimulációját MSC.Marc 2013 nem-lineáris végelemes szoftver segítségével, ezt követően a hengerlés kontinuum-mechanikai elemzéséhez hozzákapcsoltam a kristály-képlékenységtan alapegyenleteit alkalmazó számításokat, a viszkoplasztikus önkonzisztens módszert, ami a modellezés második szintjét jelenti. A szimmetrikusan és aszimmetrikusan hengerelt lemezek mikroszerkezeti változásait röntgendiffrakciós és transzmissziós elektronmikroszkópos mérések segítségével vizsgáltam meg.

2.1. A SZIMMETRIKUS ÉS ASZIMMETRIKUS HENGERLÉS KÍSÉRLETE

Az alumínium ötvözetek szimmetrikus és aszimmetrikus hengerlési kísérleteit két sorozatban hajtottam végre. Az első kísérletsorozatban az EN AW6061-es alumíniumötvözetből készült próbalemezek szimmetrikus és eltérő súrlódású hengerlését a kanadai Waterloo Egyetem Gépész és Mechatronikai Karán található képlékenyalakítási laborban végeztem el egy STANAT gyártmányú duó hengerállványon (2. ábra, baloldali kép). A szimmetrikus hengerlések esetében mindkét henger átlagos felületi érdessége megegyezik, az eltérő súrlódású hengerlés kísérlete során az aszimmetriát oly módon értem el, hogy az alsó munkahenger felületi érdességét több lépcsőben szemcseszórással módosítottam (3. ábra).



2. ábra STANAT gyártmányú duó hengerállvány (balra), iker motoros hengerállvány (jobbra)

A két henger átlagos felületi érdessége alapján, egy érdességi viszonyszámot határoztam meg, ami a felső henger és az alsó henger átlagos felületi érdessé-

gének hányadosa ($srr = R_{al} / R_{af}$). A második sorozatban, szimmetrikus és eltérő sebességű kísérleti hengerléseket hajtottam végre az EN AW5754-es ötvözzel a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Nonprofit Kft. ikermotoros hengerállványán (2. ábra, jobboldali kép). A hengerállvány hengereit egy-egy motor hajtja meg, így a hengerek sebessége a fordulatszám szabályozók segítségével, 0...10 ford./perc között külön-külön változtatható. A hengerlési paraméterek vizsgálata érdekében a kísérleteimben három különböző fordulatszám arányt (rr): $rr_0=1,0$ (szimmetrikus hengerlés), $rr_1=1,5$; $rr_2=2,0$ és négyféle érdességi viszonyszámot $srr_0=1,0$ (szimmetrikus hengerlés); $srr_1=1,6$; $srr_2=3,5$; $srr_3=4,7$. alkalmaztam.



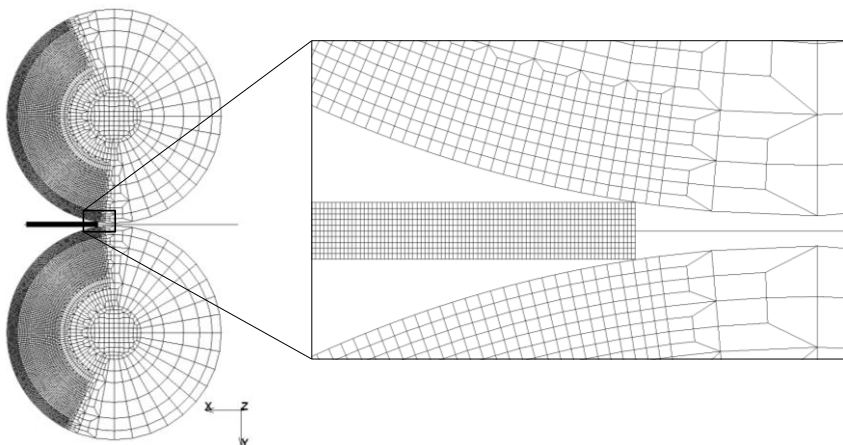
3. ábra A szemcseszóró berendezés (balra), a szemcseszórt hengerfelület és a felületi érdesség mérés (jobbra)

A kenőolajjal végzett acél hengerlésre saját kísérleteket nem végeztem, a végeselemes szimulációhoz Lenard és McConnell szerzők által korábban végzett lemez hengerlési kísérleteinek mérési eredményeit használtam fel. A kísérleti hengerléskor alkalmazott sebesség tartomány: 260...2400 mm/s, a relatív magasságcsökkenés: 15 és 50 % között változott.

2.2. A SZIMMETRIKUS ÉS ASZIMMETRIKUS HENGERLÉS MODELLEZÉSE

A hengerlés végeselemes analízise több részre bontható. Egyrészt elkészítettem a hengerlés kétdimenziós végeselemes modelljét (4. ábra), majd ezt követően az anyagi paramétereket adtam meg. A végeselemes háló síkbeli négyszögelemekből épül fel, 7401 darab a henger és 3600 darab a lemez esetében. Az aszimmetrikus esetben, mindkét hengert szükséges felépíteni az eltérő peremfeltételek figyelembe vételéhez. A kísérletek során tapasztalt nagy mértékű szélesedés miatt szükséges volt elkészítenem a hengerlés háromdimenziós modelljét, amihez a kétdimenziós modell kiterjesztését végeztem el. A hengerelt ötvözetek viselkedését minden esetben a rugalmas - képlékeny izotróp keményedő anyagmodell írja le, míg az alakítást végző szerszámok rugalmas anyagként definiáltam.

A hengerelt ötvözetek nem-lineáris képlékeny tulajdonságának leírásához a statikusan és szobahőmérsékleten mért alakítási szilárdság görbék adatait használtam fel. A végeselemes modellben használt anyagegyenlet alakváltozási sebesség és hőmérséklet érzékeny egyenlet, ami lehetővé teszi a modell használatát többféle hengerlési feladatra.



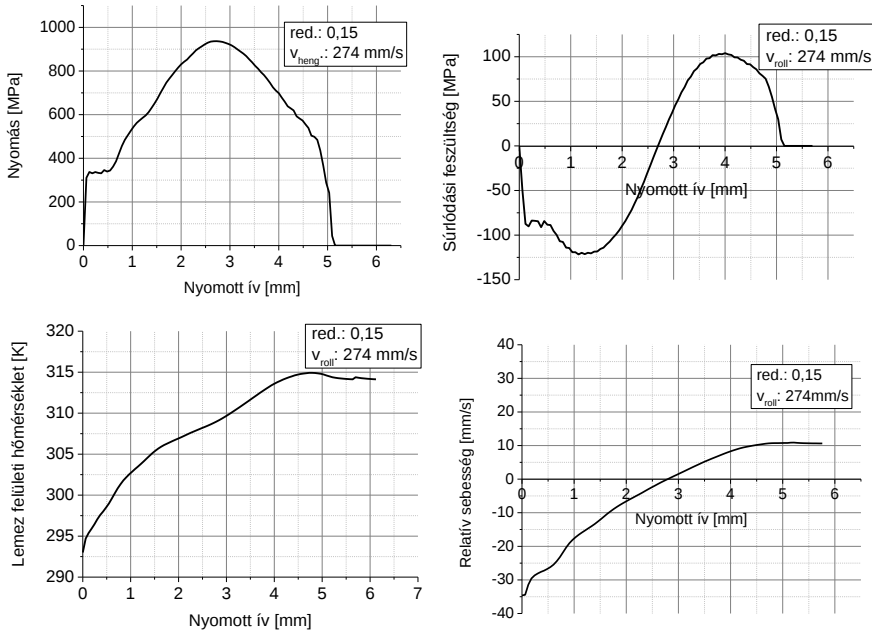
4. ábra A szimmetrikus és aszimmetrikus hengerlés szimulációjához készített végelelem modell

A feladat megoldásakor figyelembe vettem továbbá a hengerlés fizikai paramétereit és a peremfeltételeket is. Törekedtem arra, hogy a hengerlés sokrétű modellezésre legyen alkalmas, így a végelelemes modellben komplex sűrűláda modellt alkalmaztam. A módosított Levanov sűrűláda modell figyelembe veszi a helytől függő szerszámnyomást, az alakított anyag rugalmas hengerfelülettel érintkező tartományában, az alakított lemez változó alakítási szilárdságát ($k_f = k_f(\bar{\epsilon}, \bar{\xi}, T)$), a henger és a lemez között fellépő relatív sebességet és a felületi minőség hatását kifejező sűrűláda tényezőt, vagyis a technológiai folyamat peremfeltételeit jellemző paramétereket. Az érintkező tartományban, a felülethez közeli anyagjellemzőket veszem figyelembe, vagyis az alakított anyag átlagos tulajdonságaival nem számolok. A sűrűláda törvény végelelemes modell szintű alkalmazásához a végelelemes szoftverben meghívható sűrűláda szubrutint (*UFRIC*) alkalmaztam, ami tartalmazza a felületek minőségét kifejező paramétert, a relatív sebesség változót, az alakított ötvözet változó alakítási szilárdságát.

2.3. A HENGERLÉSI MODELL ALKALMAZÁSAI

A különböző hengerlési kísérletek globális és lokális paramétereinek számításához és vizsgálatához mindvégig ugyanazt a végelelemes modellt alkalmaztam. A kenőolajjal végzett hengerlések végelelemes analízisét adott sebességi, hőmérsékleti peremfeltételek mellett végeztem el, a Levanov féle sűrűláda törvény felhasználásával $\tau = k_0(\Delta v, p, k_f)$, ahol a hengerelt lemez és a munkahenger anyagparamétereit szintén ismertek voltak. A lemez és a henger közötti érintkezési zónában meghatároztam a hengerlés lokális paramétereit: a nyomást, a sűrűláda feszültséget, a hőmérsékletnövekedést valamint a relatív sebességet (5. ábra). A sűrűláda tényezőt inverz eljárással számítottam, amihez rendelkezésre álltak mérési adatok a hengerlési erőre és a nyomatéokra is. A számított és mért hengerlési paraméte-

rek közötti eltérést több iterációs lépésben minimalizáltam, amihez a Levanov egyenletben szereplő k_0 paramétert módosítottam. A nyomott ív lokális paramétereit, a kinematikai viszkozitást, a hőmérsékleti és nyomás tényező ismeretében meghatároztam a $\eta=\eta(p, T)$ egyenletet, így a viszkozitás a hely függvényében számíthatóvá vált. Ezt követően előállítottam a Sommerfeld szám ($S=\eta\Delta v/q$) eloszlását, illetve annak integrál közép értékét. A különböző mérési - számítási estekhez így rendelkezésre állt a $k_0 = k_0(\bar{S})$ adathalmaz, amelyre függvényt illesztettem.

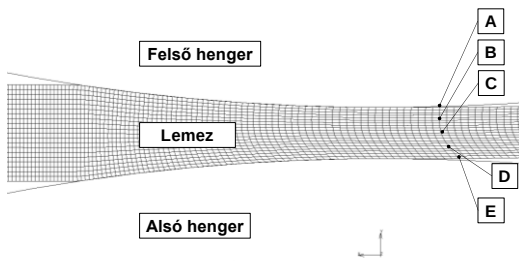


5. ábra Számított lokális paraméterek változása a nyomott íven

Végül a súrlódási tényező és a Sommerfeld szám közötti összefüggés alapján meghatároztam a különböző sebességekkel és redukciókkal végzett hengerlések súrlódási és kenési állapotait.

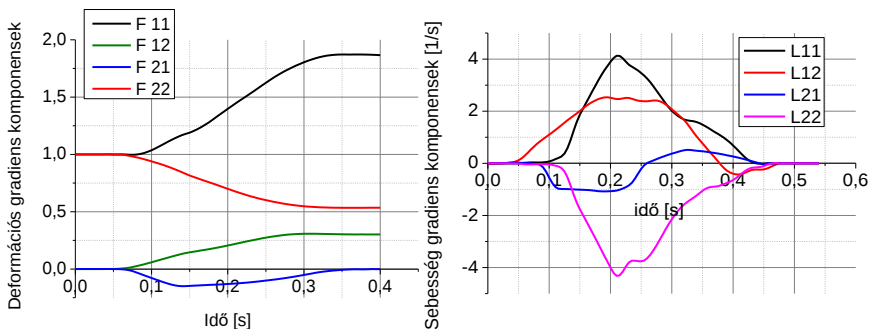
A modellezés második szintjén használt viszkoplasztikus önkonzisztens módszerrel az alakítás hatására létrejövő textúra meghatározására alkalmas számítások végezhetők. A többszűrűs hengerléssel előállított lemez mikroszerkezetének analizéséhez előzőleg méréssel kaptam meg a felületi rétegekben kialakuló textúrát szimmetrikus és aszimmetrikus hengerlési esetekre egyaránt. A különböző hengerlések szemcsefinomító hatását transzmissziós elektronmikroszkópos mérések eredményei alapján hasonlítottam össze, a hengerlésekhez pedig a folyamatot jellemző nem-monotonitási számok rendeltem. A hengerelt lemezek pólusábrái megmutatták az eltérő érdesség és az eltérő sebesség hatását is. A textúra jellegét

alapvetően befolyásolja a nyíró jellegű igénybevétel, amit a hengerléskor fellépő eltérő peremfeltételek idéznek elő.



6. ábra A hengerelt lemez végeleemes modelljének csomóponti helyei

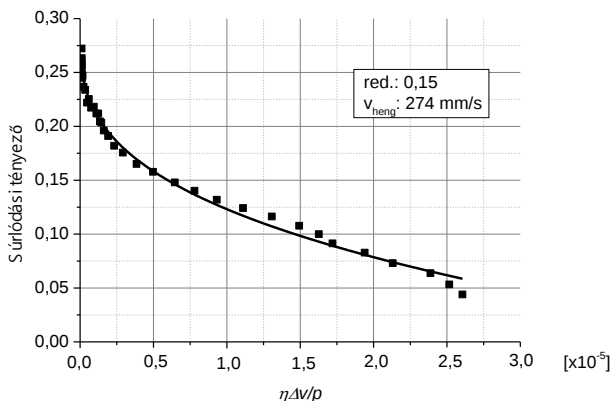
A pólusábrák a kristálytani síkok elfordulását mutatták ki, amiből a lemez vastagsága mentén jelentkező nyíró alakváltozásra következtettem. A mikroszerkezeti analízis első lépésében, szimulációs eredményekből állítottam elő az alakítási zónában létrejövő deformációs gradiens tenzor elemeit. Ezeket a lokális értékeket a lemez keresztmetszetének több csomópontjára (6. ábra), időlépésenként határoztam meg. A deformációs gradiens tenzor komponenseket (7. ábra) felhasználva numerikus deriválással határoztam meg a sebesség gradiens tenzor elemeit, amelyek a bemenő adatként szolgáltak a textúra szimulációhoz. Az egyes kristályok alakváltozás és feszültség közötti összefüggése egy alakváltozási sebességre érzékeny konstitutív egyenlet segítségével határozható meg. A lemezben létrejövő sebeségmező leírását pedig a végeleemes modell eredményei szolgáltatják.



7. ábra Deformáció- és sebesség gradiens komponensek a felületen, eltérő sebességű hengerléskor, fordulatszám arány: $srr_0=4,7$, redukció 40 %

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK (TÉZISEK)

1. Kidolgoztam a lemezhengerlés olyan kétszintű modelljét, amiben a szimmetrikus és az aszimmetrikus hengerlés változó peremfeltételeinek hatását egyaránt figyelembe lehet venni. Az első szinten létrehoztam a lemezhengerlés termomechanikai folyamatainak számítógépes szimulációjára alkalmas rugalmas-képlékeny anyagtörvényű végeselemes modellt, amihez hozzákapcsoltam a kristály-képlékenységtan alapegyenleteit alkalmazó számítási modult, a viszkoplasztikus önkonzisztens módszert, azaz a modellezés második szintjét. Az így kapott hengerlési modell alkalmas egyrészt a lemezhengerlés súrlódási viszonyainak elemzésére, ahol a kenőanyag viszkozitásának lokális értékeit az inverz végeselemes módszerrel kapott nyomott ív menti változó paraméterek alapján határozom meg. Ehhez a súrlódási törvényben szereplő felület minőségét kifejező paraméter módosítása szükséges. Másrészt a modell második szintjében az érintkező felületek változó paramétereinek hatásait figyelembe tudom venni a lemez textúra számításoknál is, amihez az inverz végeselemes számítások szolgáltatják a bemenő paramétereket. Így a textúra meghatározásához a technológiai folyamat peremfeltételeitől függő sebesség mezőt tudok megadni, amire hatással vannak a nyomott ív mentén változó lokális mennyiségek, mint a relatív sebesség, a nyomás, a hőmérséklet vagy a súrlódás. Így a szimmetrikusan és az aszimmetrikusan hengerelt lemez mikroszerkezeti vonatkozásai vizsgálhatóvá válnak.
2. A lemezhengerlés szimulációjához kidolgozott végeselemes modell alkalmazásával meghatároztam a szimmetrikus hengerlés nyomott ívén, az érintkezési felületek tribológiai viszonyait jellemző Stribeck diagramokat. A számításokat adott viszkozitású kenőanyaggal, adott redukciókkal és sebességekkel végeztem. A kísérleti hengerléskor alkalmazott sebesség tartomány: 260...2400 mm/s, a redukció 15 és 50 % között változott, a hengerelt lemez felületi hőmérséklete 54 °C – 207 °C tartományban változott. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a Lenard és McConnell szerzők által korábban végzett lemezhengerlési kísérletek paraméterei mellett, a vegyes és határkenési állapot a jellemző. A Sommerfeld szám aktuális értékeit az adott redukció és hengerlési sebesség párokhoz tartozó nyomás, hőmérséklet, a relatív sebesség, valamint a hőmérséklet- és nyomás függő dinamikai viszkozitás adja, amiket az inverz végeselemes számítások alapján határoztam meg.



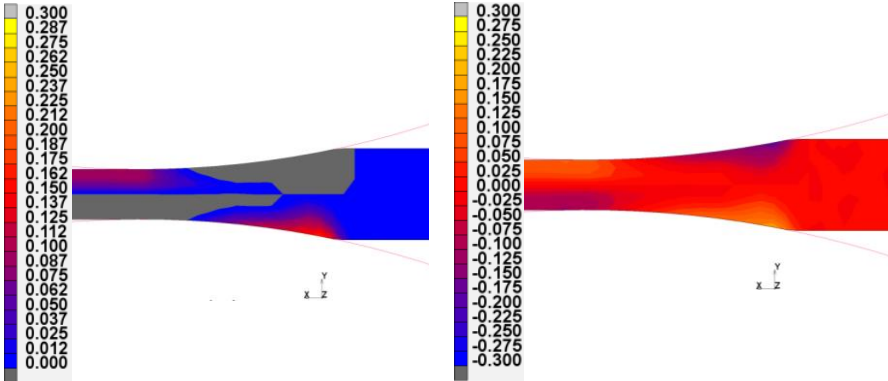
A kísérleti hengerlésre érvényes Stribeck görbe (redukció: 15%, hengerlési sebesség: 274 mm/s)

3. A lemezhengerlésre kidolgozott VE modell és a VPSC kristályképlékenységtani modell alkalmazásával bemutattam, hogy az aszimmetrikus és a szimmetrikus hengerléssel előállított textúrák eltérnek egymástól. Az aszimmetria forrása a hengerek eltérő kerületi sebessége, valamint a hengerfelületen fellépő eltérő súrlódás, ami nyíró alakváltozást eredményez.

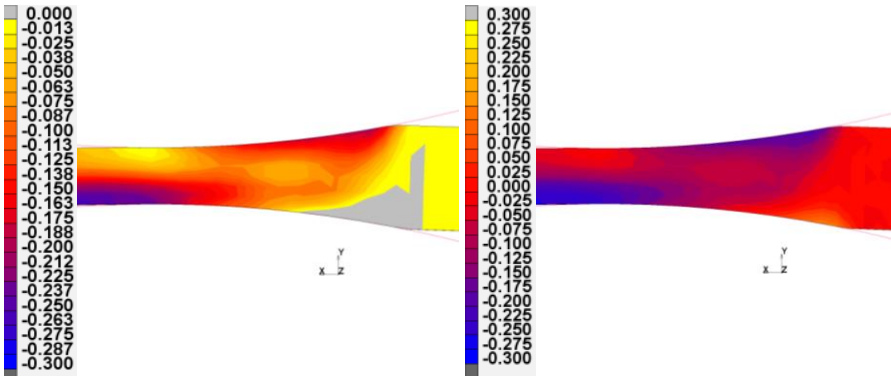
- a. A textúra modellezés során kapott eredményeket mérésekkel is alátámasztottam, ahol $\{111\}$, $\{200\}$, $\{220\}$ kristálytani síkokban kapott reflexiók alapján meghatároztam a különböző peremfeltételekkel hengerelt lemezekre érvényes pólusábrákat. A kísérletileg hengerelt minták textúra mérése alapján megállapítottam, hogy erőteljesebb aszimmetriát az eltérő sebesség idéz elő, amit a textúra modellezés eredményei is megerősítenek. A textúra számítások bemenő paramétereit a hengerlés szimulációjának eredményei szolgáltatják.

Lemez azonosító	A szimmetrikusan (SR) és az eltérő sebességgel hengerelt (DSR) lemez mért és számított $\{111\}$, $\{200\}$, $\{220\}$ pólusábrái					
SR Mért	Measured PF 111		Measured PF 200		Measured PF 220	
SR Számított	Max: 1.91 $\{111\}$ Min: 0.26		Max: 1.61 $\{200\}$ Min: 0.5		Max: 2.04 $\{220\}$ Min: 0.39	
DSR Mért	Measured PF 111		Measured PF 200		Measured PF 220	
DSR Számított	Max: 2.18 $\{111\}$ Min: 0.18		Max: 1.84 $\{200\}$ Min: 0.4		Max: 2.4 $\{220\}$ Min: 0.3	

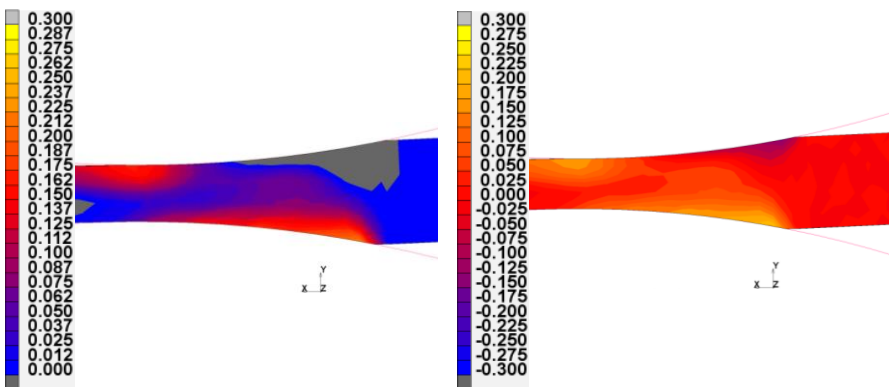
- b. A pólusábrák eltérése és a kontinuummechanikai modellezéssel meghatározott alakváltozási mérőszámok különbsége között kapcsolat van. Az inverz végelelemes modell segítségével meghatároztam a nyíró alakváltozás eloszlását a nyomott ívben. Szimmetrikus esetben a lemez középsíkjában az alakváltozási mérőszám nulla, azonban aszimmetrikus esetben ez a szám nullától eltérő nyírás lép fel a lemez teljes keresztmetszetében nemcsak a felületi rétegben, ami hatással van a vizsgált lemez pólusábrájára is.



Szimmetrikus hengerlés szögtorzulás a nyomott ívben kontúr vonalak
szimmetrikus hengerlés, redukció: 40 %



Eltérő sűrűdésű hengerlés szögtorzulás a nyomott ívben kontúr vonalak, érdességi
viszonyszám: $srr_2=3,5$, redukció: 40 %



Eltérő sebességű hengerlés szögtorzulás a nyomott ívben kontúr vonalak, érdességi viszonyszám: $rr_2=2,0$, redukció: 40 %

4. Az inverz végeelemes szimulációk eredményei alapján vizsgáltam a különböző hengerlési kísérletek változó peremfeltételeitől függő nem – monotonitási számokat, valamint az ezekhez kapcsolható mikroszerkezeti tulajdonságot is.

a. Számításaimmal igazoltam, hogy az eltérő sűrűdésű - és az eltérő sebességű kísérleti hengerléskor a nagyobb nem-monotonitási szám a jellemző, aminek maximális értéke eltérő sebességű hengerléskor: $NM_{\max_DSR}=1,3$, eltérő sűrűdésű hengerléskor: $NM_{\max_DFR}=1,2$, ugyanez a mutatószám szimmetrikus kísérleti hengerléskor: $NM_{\max_SR}=1,1$. Megállapítottam, hogy a henger átlagos felületi érdessége és a henger fordulatszám arány növekedése a nem monotonitási számot megnöveli. A nem monotonitási számok szerint a szimmetrikus és aszimmetrikus hengerlések esetében az alakítási folyamat jellege kvázi monoton.

b. Az aszimmetrikus hengerlés szemcsefinomító hatását a lemezmintákról készített TEM felvételek elemzése is megerősíti. A növekvő nem – monotonitási szám, nagyobb mértékű szemcsefinomodást jelent. Az eltérő sűrűdással hengerelt lemez minta vizsgálati területébe eső szemcsék mérete az $1 \mu m$ alatti tartományba esnek bele, a szimmetrikus mintánál azonban inkább az $1 \mu m$ - t meghaladó szemcseméret dominál.

4. ÖSSZEFOGLALÁS, AZ EREDMÉNYEK FELHASZNÁLHATÓSÁGA

Értekezésemben a végeselemes módszer segítségével alkottam meg a lemezhengerlés kétszintű modellezési folyamatát, aminek segítségével a hengerlés változó peremfeltételeit figyelembe tudom venni. A hengerelt lemez mikroszerkezeti változásait pedig a viszkoplasztikus módszerrel (VPSC Tome és Lebensohn) határoztam meg. A modellezés első szintjén végeselemes számításokat felhasználva meghatároztam a szimmetrikus és az aszimmetrikus hengerlés érintkezési felületén a lokális paramétereket és a súrlódási viszonyt, amihez a módosított Levanov súrlódási modellt alkalmaztam. A hengerlési modell első alkalmazásában kenőolajjal végzett kísérleti acélhengerlés alakítási folyamatának szimulációját hajtottam végre inverz módon. A számítási eredményekből meghatároztam a hengerlés Striebeck diagramjait a kísérleti paraméterek ismeretében (260...2400 mm/s hengerlési sebesség tartományban, 15 ... 50 % redukció tartományban, 54 °C – 207 °C hőmérséklet tartományban). A végeselemes számítás eredményeit, mint bemenő paramétereket hozzákapcsoltam a kristály-képlékenységtan alapegyenleteit alkalmazó viszkoplasztikus önkonzisztens módszerhez, aminek segítségével a szimmetrikusan és aszimmetrikusan hengerelt lemez mikroszerkezeti szimulációját végeztem el, ez jelenti a modellezés második szintjét. Az eltérő sebességű - és eltérő súrlódású hengerlési eljárások egyaránt befolyásolják a lemez mikroszerkezeti tulajdonságait és a szemcseméretet. Az EN AW 6061 és 5754 alumínium ötvözetek kísérleti hengerlésekor szimmetrikus és aszimmetrikus hengerlésekre egyaránt sor került, az eltérő peremfeltételek hatásainak vizsgálatához az alakított minták pólusábráit röntgendiffrakciós módszerrel mértük meg. A modellezés második alkalmazásában a textúra szimulációhoz szükséges paramétereket inverz végeselemes módszerrel határoztam meg. A textúra szimuláció segítségével pedig az eltérő paraméterektől függő számított pólusábrákat határoztam meg. A mérési – és a számítási eredmények azt mutatják, hogy az eltérő sebességű hengerlés a textúra jelentősebb mértékű megváltozását okozza. A hengerlési paraméterektől függő szemcsefinomodás jelenségének vizsgálatához transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) vizsgálatokat végeztünk. A mérési eredmények az aszimmetrikusan hengerelt minták esetében mutatnak intenzívebb szemcseméret csökkenést, amit a végeselemes számítások alapján elvégzett nem - monotonitási vizsgálat eredményei is megerősítenek.

A lemez és a henger érintkezési felületén lejátszódó folyamatok alapvetően meghatározzák a hengerelt termék felületi tulajdonságait. A munkadarab felületi minőségének ellenőrzése és javítása elsősorban a súrlódási erő, pontosabban a súrlódási tényező módosításán keresztül valósul meg. A súrlódási tényező lokálisan változó értékének direkt mérése ipari és kísérleti körülmények között korlátozott. A kutatómunkám szerves részét képező, inverz végeselemes módszer alapú modellezés alkalmas ezen lokálisan változó mennyiség meghatározására, miközben a kenőanyag hőmérséklet és nyomásfüggő viszkozitását is figyelembe veszem. Így

a nyomott ívben kialakuló és a hengerlési paramétereiktől függő súrlódási viszonyok meghatározhatóvá és vizsgálhatóvá válnak, valamint a henger - munkadarab érintkezési felületén lejátszódó súrlódási folyamat minősíthető. A kétszintű modellezés második szintjében a hengerlés nyomott ívében kialakuló súrlódási viszonyok és az eltérő peremfeltételek hatásait egyaránt meg tudom vizsgálni a lemez mikroszerkezeti változásainak vonatkozásában. Ezek a változások befolyásolják a munkadarab irányfüggő mechanikai tulajdonságait, ami alapvetően meghatározza a lemez viselkedését és alakíthatóságát a további alakítási műveletekben is. Így a hengerlési modell felhasználható a szimmetrikus – és az aszimmetrikus hengerléssel alakított termék felületi – és anyagszerkezeti tulajdonságainak előrejelzésére a hengerlés változó paramétereinek figyelembe vétele mellett.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN SZÜLETETT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

- [1] Szűcs Máté, Krállics György, Benke Márton: Többszintű modellezés alkalmazása a szimmetrikus és az aszimmetrikus hengerlési folyamatok vizsgálatára, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 2017/1.
- [2] Szűcs Máté, Krállics György: Lemez hideghengerlésének végeselemes modellezése a kenőolaj hatásának figyelembevételével, MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYEI: ANYAGMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK, 39: pp. 113-121. (2016)
- [3] Szucs M, Krallics G, Lenard JG: The stripeck curve in cold flat rolling, INTERNATIONAL JOURNAL OF MATERIAL FORMING 36: Paper Article in Press. 9 p. (2015)
- [4] Szűcs Máté, Krállics György, Lénárd János: Aszimmetrikus hengerlés kísérlete és modellezése, MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYEI: ANYAGMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK 38:(1) pp. 297-308. (2013)
- [5] Bézi Zoltán, Krallics György, Szűcs Máté, Lénárd János: Lemezhengerlés kísérleti vizsgálata és végeselemes modellezése, MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYEI: ANYAGMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK 37:(1) pp. 23-34. (2012)
- [6] Krállics György, Szűcs Máté, Lénárd János: Súrlódási tényező meghatározása lemez hideghengerlésnél, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 145:(2) pp. 3-6. (2012)
- [7] Szűcs Máté: Aszimmetrikus hengerlés kísérlete és modellezése, The publications of the XXVII. microCAD International Scientific Conference University of Miskolc Hungary (2013)
- [8] Szűcs Máté, Krállics György: Lemezhengerlési folyamatok egyszerűsített modellezése, XIV. Képlékenyalakító Konferencia, Miskolc 2012 pp. 96-101. (2012)