

**Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák
Doktori Iskola**

**Kvartó elrendezésű hengerállvány végeeselemes
modellezése a síkkifekvési hibák kimutatása érdekében**

PhD értekezés tézisei

KÉSZÍTETTE:

Pálinkás Sándor
okleveles anyagmérnök

TÉMAVEZETŐK:

Dr. Roósz András
egyetemi tanár

Dr. Krállics György
egyetemi docens



Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Fémtnai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

Miskolc
2014

1. Bevezetés, célkitűzés

Az utóbbi évtizedekben világszerte felgyorsult a hideghengerlési technológiák fejlődése. Az általános fejlődés értelemszerűen a féltermékekkel szemben is fokozott követelményeket támaszt, ami a felhasználók részéről elsősorban szigorú minőségi elvárások formájában jelentkezik. A korszerű szalagfeldolgozó iparágak minőségi feltételei az utóbbi időben különösen a hengerelt termékkel szemben támasztott alaki követelmények területén növekedtek. A hengerrés alakváltozási törvényszerűségei következtében a végső alak kialakulásában a technológiai műveleteknek igen nagy szerepe van. A hengerelt szalagok síkkifekvése összefügg a hengerlés közben kialakuló hengerréssel. A terhelt hengerrés alakját befolyásoló tényezők eredőjeként kialakul egy hengerrés alak, ha ez nem biztosítja azt, hogy a szalag szélessége mentén a hengerlés folyamán az alakváltozás mértéke mindig azonos legyen, akkor belső feszültség vagy hullám alakul ki. Ezért elengedhetetlen a hengerrés alakjának pontos ismerete. A hengerlési erő következtében a henger részben rugalmasan benyomódik, részben behajlik. A munkahengernek a lemez által nyomott felülete, továbbá a munka- és támhengerek körkeresztmetszetei rugalmasan eltorzulnak. A hengerelt szalag alakja szempontjából a hengerszélesség mentén kialakuló benyomódás eltéréseinek a mértéke is lényeges. A hengerrés rugalmas alakváltozása főként a kevésbé merev hengerek esetén határozza meg alapvetően a hengerrés nagyságát és így a hengerelt szalag síkkifekvését. A hengerelt szalagról átadódó megoszló terhelés jellege, valamint a munkahenger csapágyazásainak és a támhengerek elhelyezkedése miatt a hengerrés rugalmas alakváltozása csak térbeli kontakt vége-selemes modellel számítható. A vége-selemes analízis és a számítástechnika utóbbi időben bekövetkezett fejlődése lehetővé tette a teljes hengerlési folyamat részletes szimulációját.

Alapvető célkitűzésem, hogy pontosan feltérképezem a hideghengerlés során kialakuló hengerrést, amely a hengerelt szalag alakját, ezáltal a síkkifekvését is befolyásolja. Kutatómunkám fő gerince – a fő célkitűzésnek megfelelően – olyan komplex modellezési módszer kidolgozása, amelyet az iparban alkalmazva javul a hidegen hengerelt lemezek síkkifekvése, ezáltal növekszik a hengerművek versenyképessége. Kutatásom során törekedtem arra, hogy korszerű mérési- és számítástechnikai módszereket használjak fel úgy, hogy az alakítandó anyag és az alakítást végző szerszám közötti kölcsönhatást modellezni tudjam.

2008-ban az Alcoa-Köfém Kft-ből egy VON ROLL gyártmányú kísérleti hengerállvány (1. ábra) áttelepítésre került a Miskolci Egyetem Fémteni és Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetébe (a továbbiakban ME-FKNI). A hengerállvány teljes körű felújítása után, hengerlési erő hatására kialakuló hengerrés változását bemutató kísérletsorozatot végeztem. A hengerléshez keskeny alumínium szalagot használtam, azonban az elért eredmények egyéb fémek hengerlése során is hasznosíthatóak.



1. ábra. A VON ROLL gyártmányú kísérleti hengerállvány

A hengerlés egy igen összetett folyamat, melynek a teljes körű 3 dimenziós modellezése a mai modern számítástechnikai eszközökkel is nehézkes. A folyamat bonyolultsága abból adódik, hogy hengerléskor az egymással érintkező hengerek és a hengerállvány által alkotott rugalmas rendszer közvetlen kölcsönhatásba lép a rugalmas-képlékeny lemezanyaggal. Ennek a kölcsönhatásnak az eredményeként jön létre a hengerelt termék, amelynek lokális geometriájának megváltozását követni kell a gyártási folyamatban. Ezért szükség van egy olyan mechanikai modellre, amellyel ezt a kölcsönhatást részletesen elemezni lehet.

2. Az elvégzett kutatás összefoglalása

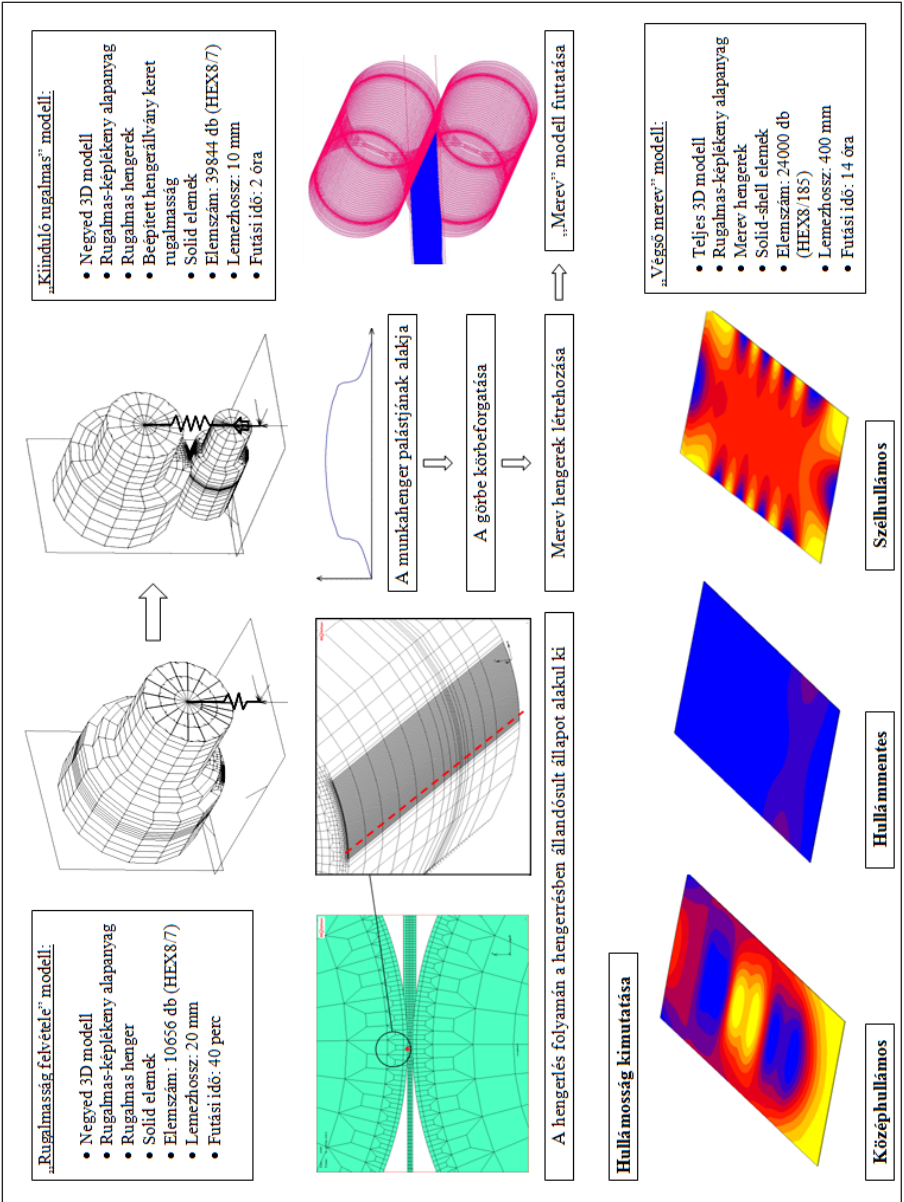
Kutatásom eredményeként komplex végeeselemes modellt fejlesztettem a hideghengerlési folyamat teljes körű leírására. A végeeselemes modell készítése során az alakított anyagot lineárisan rugalmas izotróp keményedő, míg a hengereket lineárisan rugalmasnak tételeztem fel a különböző hengerlési lépésekben. A komplex modell magában foglalja a hengerhajlítást, és a különböző hengerlési paramétereket, a hengerek be- és összelapulását, valamint a hengerállvány rugalmas alakváltozását figyelembe véve számol, továbbá a hengerlés közben kialakult állandósult állapot segítségével alkalmas a hullámosság kimutatására is.

A disszertációm fő célkitűzése a hideghengerlés során kialakuló hengerrés pontos feltérképezése volt, a kutatómunkám arra irányult, hogy geometriailag pontos terméket lehessen gyártani. További – a fő célkitűzés megvalósítását elősegítendő – célom volt, hogy a komplex végeeselemes modell által számolt eredményeket valós kísérleti eredményekkel össze lehessen vetni, ehhez számos hengerlési kísérletet kellett végrehajtanom a ME-FKNI Fémteni és Képlékenyalakítási Tansectékén található VON ROLL gyártmányú kísérleti hengerállványon.

A modellezést 3D-ben végeztem, az MSC.Marc nemlineáris végeeselemes szoftver 2010.1-es verziójával. Nemlineáris folyamatok leírására a végeeselem módszer igen hatékonyan alkalmazható. A nemlineáris analíziseknél a megoldás pontossága lényegesen nehezebben javítható, mint a lineáris analízisnél. A pontos végeeselemes diszkrétizációhoz szükséges a kontinuummechanikai egyenletek konzisztenciája, illetve fontos az, hogy az alkalmazott anyagmodell minél pontosabban illeszkedjen a modellezni kívánt fizikai folyamathoz.

Az általam készített komplex modell 3 szimulációs lépés összekapcsolásából tevődik össze (2. ábra), az első modell a kísérleti hengerállvány rugalmasságának a meghatározására szolgált, a második modell a teljes hengerrendszer modellje, amely a tényleges hideghengerlési folyamat végeeselemes analízisét tartalmazza. Ebben kerül meghatározásra a hideghengerlés során kialakuló hengerrés alak. A harmadik modell a hullámosság kimutatásával foglalkozik. Ennek megvalósítására egy egyszerűsítést végeztem, mivel a második modellben a hullámosság kimutatása olyan hosszú időt igényelt volna, amelyet a mai számítástechnikai kapacitások mellett sem lehetett volna kezelni.

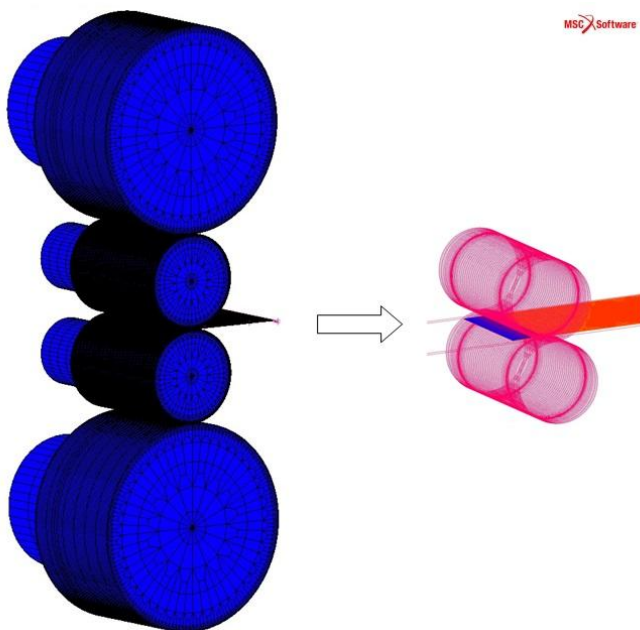
Az első modellel a hengerállvány rugalmasságának a meghatározása miatt volt szükség, mivel a hengerlési folyamat pontos modellezése érdekében nyomon kell követni a kísérleti hengerállvány eredő rugalmasságát, amely magában foglalja a hengerállvány rugalmasságát (ami a hengerállvány keret, és a hengerlési erő hatásvonalában lévő gépelemek rugalmasságából tevődik össze), valamint tartalmazza a hengerek rugalmasságát (belapulás, összelapulás, hengerek tengelyvonalának rugalmas kihajlása) is. Ezután a meghatározott rugóállandót beépítettem a második modellbe, amely a hengerlés során kialakuló hengerrés alak meghatározására szolgál.



2. ábra. A hengerlési folyamat komplex 3D modellezésének az elve

A hullámosság kimutatására irányuló modell készítése során a fő célom az volt, hogy kidolgozzak egy olyan módszert, amellyel a hullámosság kimutatásához elegendően hosszú lemez alakítási folyamatát szimulálni lehet. A hengerlés folyamán a hengerrésben állandósult állapot alakul ki, ezt kihasználva alkottam meg a hullámosság kimutatására szolgáló „végső merev” modellt. A modell készítése során a „kiinduló rugalmas” modellben a henger szélessége mentén kialakult terhelt hengerrés legnagyobb torzulást elszennedő hengeralkotóját képeztem le, majd ezt megforgatva merev hengereket hoztam létre, a terhelt hengerrés alaknak megfelelően. Így a szimuláció további lépéseinek elvégzése után sikerült kimutatni a hengerlés során kialakuló középhullámos, szélhullámos és hullámmentes állapotokat.

A 3. ábra a hengerlés szimulációs folyamatának egyszerűsítését mutatja. A bal oldali ábrarészen a hagyományos quartó elrendezésben solid elemekből felépülő – félhengerekkel végzett – hengerlés szimuláció, a jobb oldalon a merev hengerekkel történő szimulációs folyamat látható.



3. ábra. A hengerlés szimulációs folyamatának egyszerűsítése

A „végső merev” modell felépítésekor, a „kiinduló rugalmas” modellben solid elemekből felépülő hengerek hengerlés közben kialakult hengergeometriájával azonos merev hengereket használtam, ez a geometria tartalmazza a hengerállvány összes rugalmas hatását. A rugalmas-képlékeny alanyag hálózására 24000 darab solid-shell (HEX8/185) típusú elemet használtam. Ezzel a modellezési módszerrel

jelentősen csökkenteni tudtam a szimulációs folyamat számításigényét. A „kiinduló rugalmas” modellben egy 10 mm hosszú lemez, hengerlése 2 óráig tartott, az új módszernek köszönhetően, egy 400 mm hosszú lemez hengerlésének a szimulációs ideje 14 óra. Ez a hosszúság már elegendő volt a lemezben kialakuló hullámosság kimutatására.

A hengerlési folyamat végeselemes modellezése során kapott eredményeket összehasonlítottam egy általam készített a VON ROLL gyártmányú kísérleti hengerállvány hengerrés alakjának meghatározására szolgáló analitikus modell eredményeivel és az eredmények nagyon jó egyezést mutattak.

Röviden összefoglalva a doktori cselekményem során elért eredményeim a következők: a síkkifejvés mérőszámának meghatározása, komplex végeselemes modell fejlesztése, a hengerállvány eredő rugalmasságának szétválasztása, a hideg-hengerlési folyamat teljeskörű végeselemes analízise, a hullámosság kimutatása a hengerlés közben kialakult állandósult állapot segítségével, az analitikus és végeselemes modell összehasonlítása. Ezeknek egy része új tudományos eredmény, mely a gyakorlatban is hasznosítható.

3. Új tudományos eredmények

1. A számításaimmal igazoltam, hogy a szalaghengerléskor hullámosságot okozó szálhossz eltérés meghatározásakor helyes az a gyakorlati megközelítés, hogy csak a Taylor sor első két tagját veszik figyelembe. Megállapítottam, hogy a Taylor sor harmadik tagjának figyelembe vétele az ipari gyakorlatban kialakuló hullámok esetében nem eredményez számottevő különbséget.
2. Kidolgoztam a hideghengerlés komplex végeeselemes modelljét, amelyben figyelembe vettem a hengerállvány rugalmas viselkedését, az alakított anyagot lineárisan rugalmas izotróp keményedőnek, míg az alakítást végző hengereket lineárisan rugalmasnak tételeztem fel. A komplex modell három egymással szoros kapcsolatban lévő részmodellből tevődik össze. Az első modell a kísérleti hengerállvány rugalmasságának meghatározására szolgál. A második modell a hideghengerlés során kialakuló hengerrés alak számítását végzi. A harmadik modell feladata a lemezben kialakuló hullámosság kimutatása.
3. Az első modellben elvégzett végeeselemes szimulációk eredményei alapján meghatároztam a kísérleti hengerállvány eredő rugalmasságát, amelynek helyességét hengerlési kísérletekkel igazoltam. A számításokhoz az összetett (hengerállvány, hengerek) rendszert részekre bontottam, ezáltal külön-külön meghatározható az állvány és a hengerek rugalmassága.
4. A hengerállvány és henger rugalmasság felhasználásával – amit a végeeselemes szimulációk eredményei és a hengerlési kísérletek alapján kaptam – meghatároztam a hideghengerlés során a különböző hengerhajlító erők hatására kialakuló hengerrés alakját. A kidolgozott modell alkalmazásával további kísérletek nélkül meghatározható a kísérleti hengerállványon hengerektől lemez lencsésége.
5. A második modellben meghatározott, a terhelt hengerrésben legnagyobb alakváltozást elszenvedett munkahenger kontúralkotót felhasználva, ún. „merev hengereket” hoztam létre. Ilyen módon egyszerűsítve a hengerlés szimulációjának folyamatát megállapítottam, és hengerlési kísérletekkel igazoltam, hogy a hideghengerlés során a hengerrésben kialakult állandósult állapotban az általam készített harmadik végeeselemes modell alkalmas a hullámosság kimutatására.

4. Az értekezés tudományos eredményeinek jelentősége és hasznosításuk lehetőségei

A bemutatott modellezési módszerrel ipari hengerlési folyamatok is modellezhetőek. Korábban a hideghengerléssel foglalkozó kutatók hengerlési kísérletek alapján határozták meg a sikkifekvés biztosításához szükséges paramétereket, ehhez nagy mennyiségű alapanyagot használtak fel, és nagyon sok hengerlési kísérletet kellett végezniük. Saját kutatásomban a kifejlesztett végeeselemes modellt fizikai kísérletekkel validáltam, ezáltal lehetővé vált, hogy a VON ROLL gyártmányú kísérleti hengerállványon konkrét kísérletek nélkül előre meg lehet határozni a kifutó lemez alakját. A doktori munkám során a célom nem az volt, hogy a VON ROLL gyártmányú kísérleti hengerállványon tömeggyártást optimalizáljak, azonban az elért eredmények a tömeggyártásban is hasznosíthatóak. Az ipari alkalmazás során az adott hengerállványra hasonló elvek alapján elkészített végeeselemes modell által előre meg lehetne határozni a hengerlés után kialakuló lencséséget, és ezt össze is lehetne vetni a stresszométerrel végzett mérés alapján számított lencséséggel.

Az általam kidolgozott végeeselemes modellezési módszerrel a hengerlési folyamatok modellezése lényegesen egyszerűbb lett. Az ipari tapasztalatok alapján megállapítható az, hogy a hideghengerlés során előállított szalag alakját nagymértékben befolyásolja az alapanyag melegehengerlése során kialakuló lencsésége. Ezt a lencséséget be lehet építeni a végeeselemes modellbe, így az iparban történő alkalmazás során a hideghengerlési folyamatoknál előre számítani lehet a hengerelt termék alakját az első szúrásban, sőt a további lencséségek ismeretében a teljes hengerlési folyamatot szúrásról-szúrásra nyomon lehet követni. Az elkészített modell által nyújtott számítás eredményeinek felhasználásával a szabványban előírt fokozottan síkfekvő hidegen hengerelt szalagokat lehetne előállítani. A modelljeim együttes alkalmazásával a hengerlési folyamatot befolyásoló paraméterek és a lemez geometriai paraméterei között közvetlen függvénykapcsolat határozható meg, ami alapja lehet a hengerlés on-line szabályozásának.

A kutatás során elért eredmények alkalmazásának további lehetősége rejlik abban, hogy a modelltől ki lehet olvasni azt a kritikus feszültségeloszlást, amelyenél a hullámképződés megindul, ezáltal mód nyílik az instabilitás feltételeinek a meghatározására is.

5. Az értekezés témakörében megjelent publikációk

Folyóiratban megjelent publikációk:

1. Sándor Pálinkás, György Krállics, Zoltán Bézi: Modelling of Crown on Cold Rolled Aluminium Sheet, MATERIALS SCIENCE FORUM 752, (2013), pp. 115-124.
2. Pálinkás Sándor, Krállics György, Bézi Zoltán: Kordában tartott lencsesség: Hideghengerlési folyamat végelelemes modellezése, GYÁRTÁSTREND (2012/12), pp. 30-32.
3. Pálinkás Sándor: Hidegen hengerelt alumínium szalag lencsességének vizsgálata, MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYEI. 2. SOROZAT, ANYAGMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK 37, (2012), pp. 309-319.
4. Pálinkás Sándor: Hengerelt szalagok lencsességének mérése egyedileg fejlesztett mérőeszközzel, Bányászati Kohászati Lapok-Kohászat 145. (2012/2) pp. 1-3.
5. Sándor Pálinkás, János Tóth: Investigation of the flatness of rolled aluminium sheet, INTERNATIONAL REVIEW OF APPLIED SCIENCES AND ENGINEERING, Vol. 2, No. 1, (2011), pp. 57-62.

Konferencia kiadványban megjelent publikációk:

6. Pálinkás Sándor, Krállics György, Bézi Zoltán: Hidegen hengerelt alumínium lemez hullámosságának modellezése, Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2013), Debrecen, Magyarország, 2013.10.10-2013.10.11. Debreceni Egyetem Műszaki Kar, pp. 143-152. (ISBN:978-963-473-623-3)
7. Pálinkás Sándor: Hengerelt lemezek lencsességének mérése egyedileg fejlesztett mérőeszközzel, XIV. Képlékenyalakító konferencia, Miskolc, Magyarország, 2012.02.16-2012.02.18., Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, pp. 241-248. (ISBN:978-963-661-985-5)
8. Sándor Pálinkás, János Tóth: Investigation of profile of cold rolled aluminium strip, XVII. Épületgépészeti, Gépészeti és Építőipari Szakmai Napok: Szakkiállítás és Nemzetközi Tudományos Konferencia, Debrecen, Magyarország, 2011.10.13-2011.10.14. Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, pp. 88-95. (ISBN:978 963 473 464 2)
9. Pálinkás Sándor: Hidegen hengerelt alumínium szalag profiljának vizsgálata, Doktorandusz fórum, Miskolc, Magyarország, 2011.11.08. Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Szekciókiadványa, pp. 25-30.
10. Sándor Pálinkás: Investigation of the shape of roll gap of experimental mill stand, IN-TECH 2010. Prague, Csehország, 2010.09.14-2010.09.16. pp. 436-439. (ISBN:978-80-904502-2-6)

11. Sándor Pálincás, János Tóth: Investigation of the flatness of rolled aluminium sheet, 16th Building Services, Mechanical and Building Industry Days. Debrecen, Magyarország, 2010.10.14-2010.10.15. Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, pp. 88-95. (ISBN:978-963-473-423-9)

Az értekezéshez szervesen nem kapcsolódó folyóiratcikk:

12. Sándor Pálincás, János Tóth: Experimental optimization of the die forging technology of pliers, METALURGIJA JOURNAL OF METALLURGY 17 (2011), pp. 157-163. (ISSN 0354-6306)

