

Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák
Doktori Iskola



**PLATTÍROZOTT ALUMÍNIUM LEMEZEK KOMPLEX
GYÁRTÁSTECHNOLÓGIAI OPTIMALIZÁCIÓJA**

DOKTORI (PH.D.) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

SZABÓ GÁBOR

OKLEVELES ANYAGMÉRNÖK

TUDOMÁNYOS VEZETŐ:

PROF. DR. MERTINGER VALÉRIA

EGYETEMI TANÁR

MISKOLC

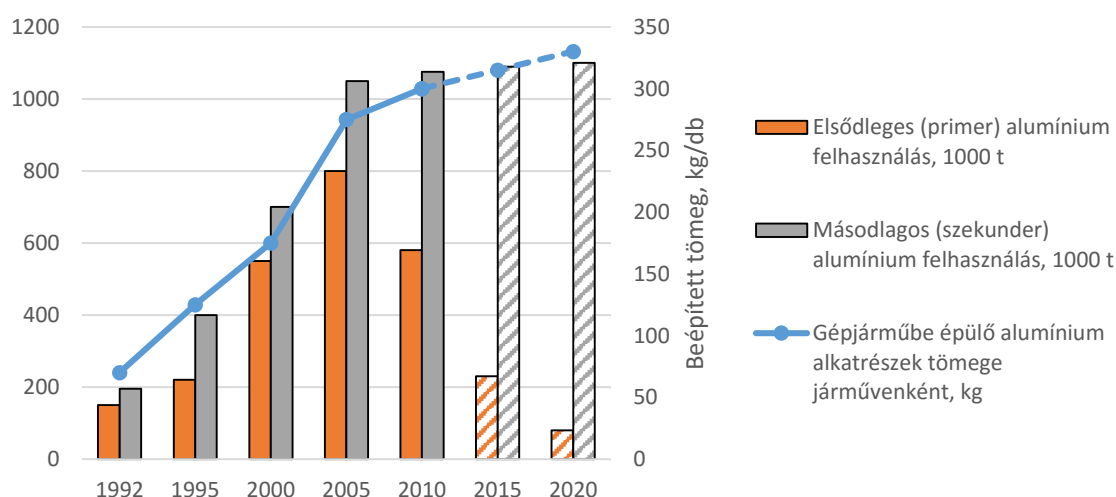
2016

I. BEVEZETÉS, AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITÚZÉSEI

Napjainkban az egyre növekvő energiaárak mellett a fenntartható fejlődés is egyre inkább előtérbe kerül. A fajlagos költségek csökkentésének komoly hajtóereje van a műszaki kutatásokban. A cégek jelentős része törekszik arra, hogy magas minőségű és nagy hozzáadott értékkel rendelkező termékeket állítson elő. Ennek köszönhetően sok helyen a technológiai infrastruktúra modernizációja mellett a jól bevált és éveken át azonos módon gyártott termékek optimális előállításának kérdése is központi szerepbe került.

Doktori kutatásom során ezért egy olyan problémával foglalkoztam, amely ugyan több évtizedes múltra tekint vissza, mégis a folyamat részletei manapság sem teljesen ismertek. A képlékenyalakítási eljárásokkal előállított termékek jelentős része hengerelt termék, azonban a hengerelt termékek csak kis hányada készül plattírozással. A plattírozással előállított termékek stratégiai termékeknek számítanak a magas hozzáadott értéküknek köszönhetően. Egy kis túlzással kimondható, hogy egy vállalat piaci stratégiájának tervezése szempontjából egyre inkább csak felületkezelte, vagy felületbevont termékeket érdemes hengerelni!

Az alumínium-iparág fejlődését az elmúlt évek gazdasági nehézségei sem vetették vissza. Például az autó, valamint a repülőgépipar alumínium felhasználása évről évre növekszik (1. ábra). A felhasználói igények változása szükségessé teszi az újabb és egyre innovatívabb anyagok alkalmazását, melyek előállítása egyre több kihívást jelent az alapanyag gyártóknak.



1. ábra – Alumínium felhasználása az autópiparban¹

¹ <http://solarenergyengineering.asmedigitalcollection.asme.org/data/Journals/JSEEDO/28300/019102j.4.jpeg> alapján

A felgyorsult technikai fejlődés eredményeként ma már széleskörűen alkalmazzák a plattírozott termékeket, azonban a plattírozási művelet alapkérdése, hogy mi szükséges a fedőréteg megfelelő „tapadásához”, mai napig sem kellőképpen tisztázott. Ezért kutatásom céljául tűztem ki, hogy az iparban jellemzően tapasztalati eredményekre alapozott, nagy selejtarányú gyártási folyamathoz, nagyszámú célzott kísérleti és modell eredményen alapuló komplex módon optimalizált, tudományosan megalapozott ismereteket nyújtsak, az alábbiak szerint:

- Az iparban alkalmazott, a gyártás biztonsága és a termék minősége szempontjából fontos tényezők megvizsgálását, a lehetséges hibaokok feltárását, kizárását.
- Olyan egyszerű és gyors vizsgálati módszer kidolgozását,
 - o mellyel gyorsan eldönthető, hogy két tetszőlegesen kiválasztott alumínium ötvözet várhatóan egymáshoz plattírozható-e vagy sem.
 - o mellyel gyorsan, akár hengerlés közben is eldönthető, hogy a kötés függvényében a hengerlés továbbfolytatható-e a tapasztósúráások után.
- Olyan mérőszám és/vagy határérték kidolgozását, amivel a kialakult kötés erőssége számszerűen is jellemezhető, és a végtermék megfelelő minősége is biztosítható.
- Olyan kísérleti technológia és modell kialakítását, melynek segítségével egyszerű határgörbék lehet felvenni a többrétegű vékonylemez gyárthatóságának szempontjából.
- Olyan program (szoftver) kidolgozását, mellyel egy tetszőleges anyag-kombinációval összeállított háromrétegű pakett esetében olyan szűrasterv készíthető, amely szerint hengerelve a tapadás feltételei mindvégig "megmaradnak", azaz a teljes szélesség mentén egyenletes megnyúlás biztosítható, ezáltal a felszakadás veszélyét el lehet kerülni.

II. KUTATÓMUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA

A minimális hőmérséklet és alakváltozás mellett is megfelelően jó hegedést eredményező plattírozási technológia paramétereinek meghatározását, vagyis optimalizálását kísérleti körülmények között célszerű elvégezni. Csak az itt nyert tapasztalatok birtokában gazdaságos annak ipari alkalmazása, ezért értekezésemben kétféle laboratóriumi kísérletsorozatra fókuszáltam.

Egyrészt ki kívántam dolgozni egy olyan gyorsan elvégezhető minősítő eljárás, mellyel nagy valószínűség szerint két tetszőlegesen kiválasztott alumínium ötvözetről egyértelműen eldönthető, hogy hengerléssel plattírozható-e vagy sem, másrészt meleghengerlési kísérleteket kívántam végezni három vagy többretegű pakettekkel különböző ötvözetkombinációkkal és pakett geometriákkal az ún. tapasztószúrások optimális szúrástervének meghatározásához

II.I. VIZSGÁLATI BERENDEZÉSEK BEMUTATÁSA

Vizsgálataim alapját képező hengerlési kísérleteimet a Miskolci Egyetem Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet Von Roll gyártmányú kísérleti hengerállványán végeztem. A hengerlés során felmerülő gyakorlati feladatok megoldásához az Intézet több oktatójának és munkatársának a segítségét kellett kérnem. A hengersort az Intézet a székesfehérvári ALCOA-KÖFÉM Kft.-től kapta. A 2. ábra a hengerállványt meleghengerlés közben mutatom be.



2. ábra - A Von-Roll gyártmányú hengerállvány meleghengerlés közben

A hengerállvány főbb paraméterei:

- A hengersonon megengedhető legnagyobb hengerlési erő: 1MN.
- A megengedhető hengerlési nyomaték: 1kNm.

A hengerlés duó, vagy kvartó üzemmódban is történhet.

Az alkalmazható hengerek méretei:

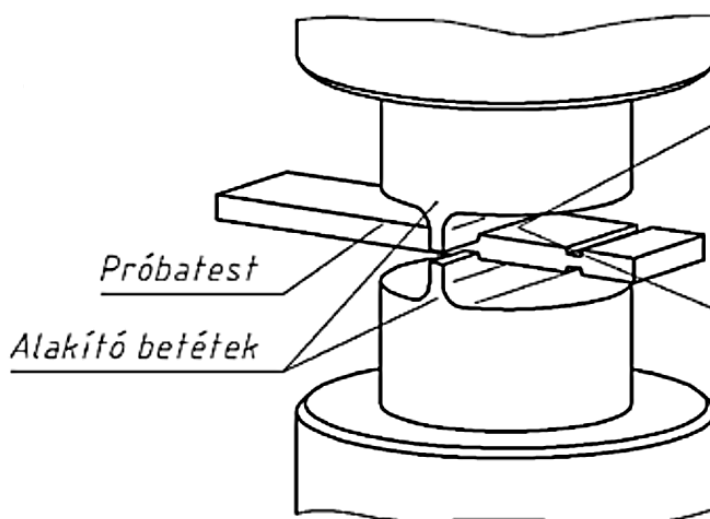
- Duó hengerátmérő: 220 mm
- Kvartó támhenger átmérő: 220 mm
- Kvartó munkahenger átmérő: 100 mm

- Hengertesthossz: 220 mm
- Legnagyobb kiinduló magasság duó üzemmódban 65 mm.

A hengersor a csévélőről-csévélőre történő szalaghengerlés mellett táblalemez hengerlési üzemmódban is használható.

II.II. PLATTÍROZÁSI ALAPKÍSÉRLETEK FORD SZERSZÁMMAL

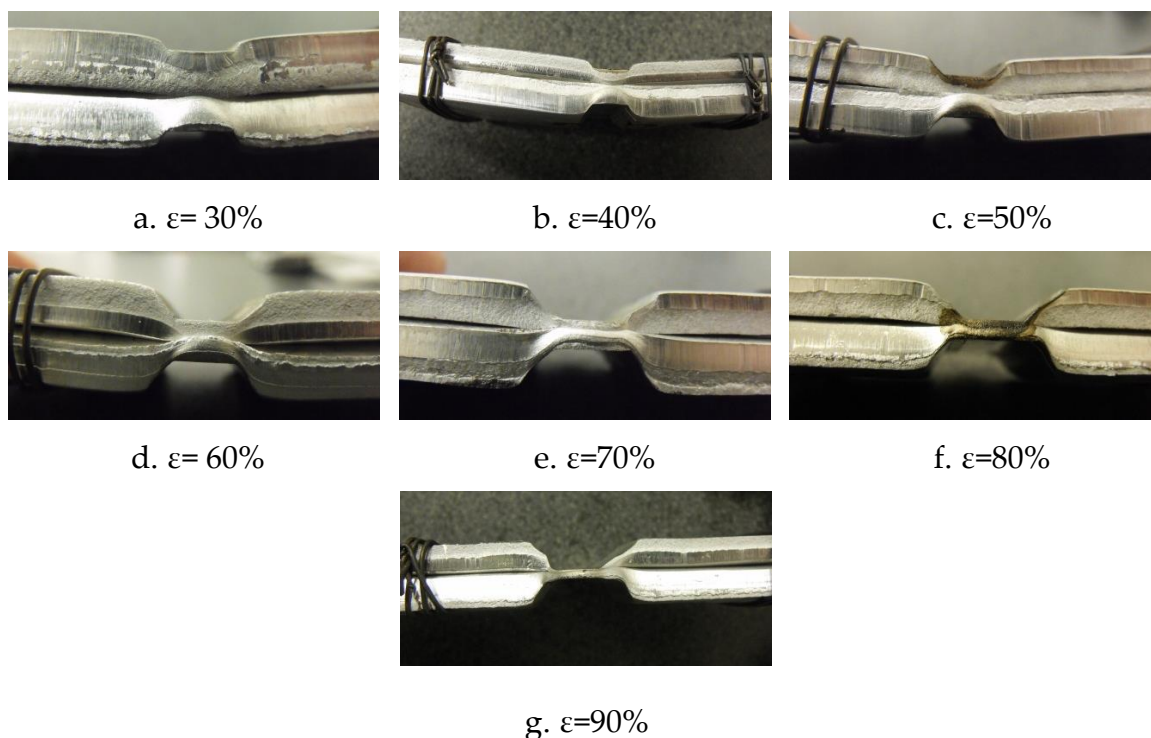
Ahhoz, hogy vizsgálni tudjam két réteg alakítás közben kialakuló egymáshoz tapadását és ezeket össze is tudjam hasonlítani, egy olyan „tapasztási” módszert választottam, amelynél a különböző mértékű alakváltozások hatására az „összetapasztandó” felületek nagysága nem változik. Erre a célra a Ford szerszámmal történő alakítást használtam, melynek elvét és vázlatát a 3. ábra - A Ford próba vizsgálati elrendezéseszemlélteti.



3. ábra - A Ford próba vizsgálati elrendezése²

A darabokat az alakítás után (4. ábra) szabad levegőn hűtöttem, majd szaktógépen húzó igénybevételnek vetettem alá. Az így szétválasztott rétegekről mikroszkópos felvételeket készítettem. Az így nyert vizuális információk feldolgozásából következtetni lehet az adott paraméterek szerint végzett plattírozás során kialakuló kötés valószínűségére.

² http://eda.eme.ro/bitstream/handle/10598/14815/13_FMTU2008%20_%20Kecskes%20Bertalan%20_%2020143-146%20ok.pdf?sequence=1



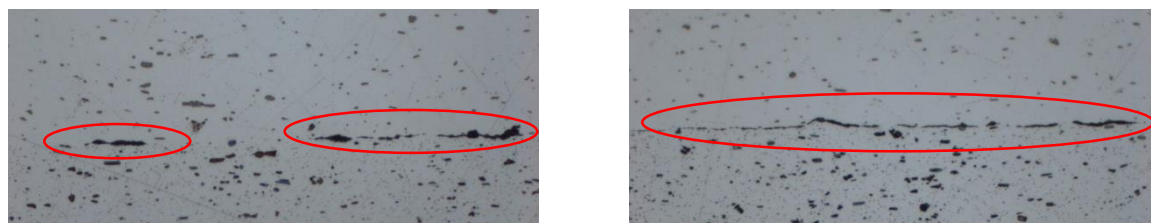
4. ábra - Különböző mértékű alakítás hatására összetapadt rétegek

A metallográfiai vizsgálatok segítségével feltárhatóak a két réteg közötti légbezáródások, illetve a nem megfelelően tapadt részek. Az 5– 6. ábrákon bemutatom a már elszakított próbatestekből kimunkált csiszolatok szövetképeit kiemelve a hegedési hibákat.



5. ábra - Az alakítás hatására nem megfelelően összehegedt felületek a darab szélén

Relatív alakváltozás $\varepsilon = 60 \%$



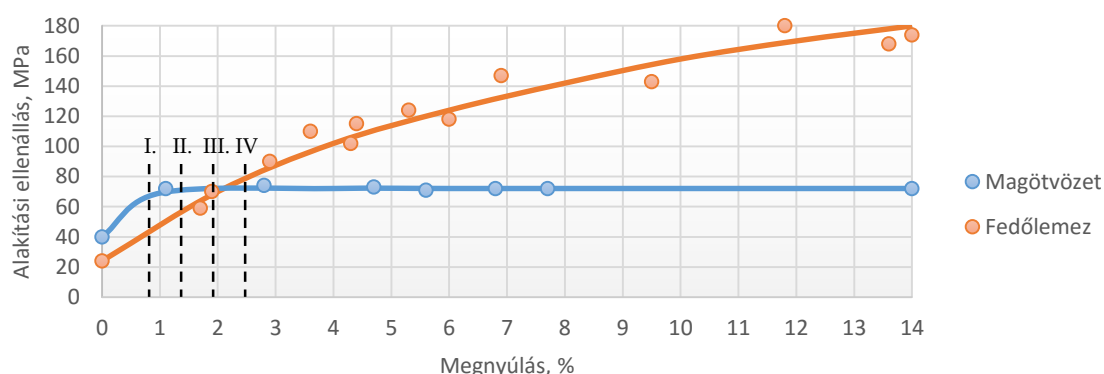
6. ábra - Az alakítás hatására nem megfelelően összehegedt felületek a darab közepén

Relatív alakváltozás $\varepsilon = 60 \%$

Megállapítható, hogy a Ford szerszámmal történő plattírozás alkalmas a hengerléssel történő plattírozás alapkísérletének, továbbá olyan gyorsan elvégezhető kísérleti eljárás is egyben, mellyel eldönthető, hogy 2 tetszőlegesen kiválasztott és megfelelően előkészített alumínium ötvözet valószínűsíthetően plattírozható-e vagy sem.

II.III. HENGERLÉSI KÍSÉRLETEK

Hengerlési előkísérleteim során megállapítottam, hogy ha az első ún. „tapasztó szúrások” relatív alakváltozás szempontjából túl kicsinek vagy túl nagyak bizonyulnak szemmel látható kötés nem alakul ki. Ahhoz, hogy az egyes ötvözetek eltérő tulajdonságait figyelembe tudjam venni, az optimális szúrásterv kidolgozásához külön hengereltem mag valamint fedőlemezeket. Az így hengerelt lemezek esetén vizsgáltam a lemezek alakítási ellenállását a megnyúlás függvényében (7. ábra).



7. ábra - Alakítási ellenállás a megnyúlás függvényében

1. táblázat - Szúrástervek a „tapasztó” szúrásokhoz

I. szúrásterv						
Sorsz.	h_{be} , mm	Δh , mm	h_{ki} , mm	ϵ , %	$\epsilon_{össz}$, %	Kötés?
1.	34,2	0,3	33,9	0,88%	0,88%	✗
2.	33,9	0,3	33,6	0,88%	1,75%	✗
3.	33,6	0,3	33,3	0,89%	2,63%	✗
4.	33,3	0,3	33	0,90%	3,51%	✗
5.	33	0,4	32,6	1,21%	4,68%	✗
6.	32,6	0,4	32,2	1,23%	5,85%	✗
7.	32,2	0,5	31,7	1,55%	7,31%	✗

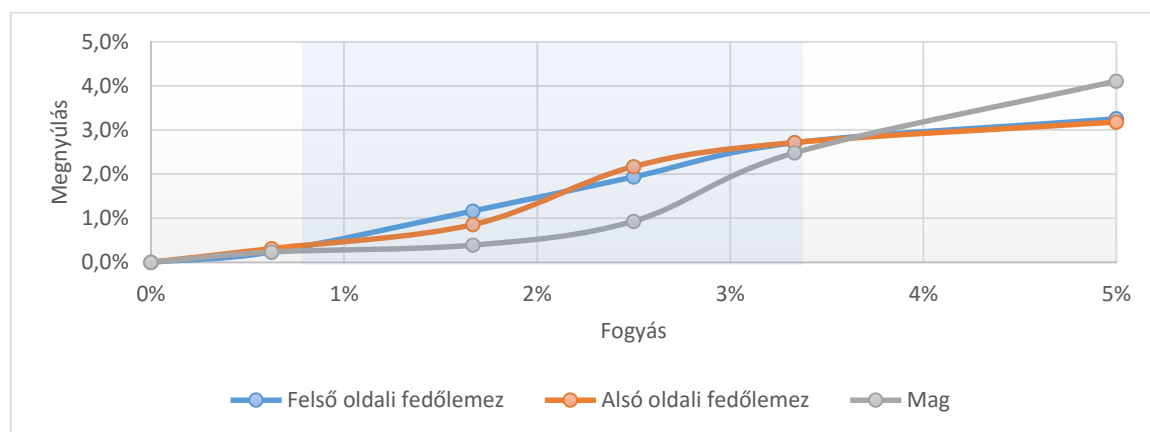
II. szúrásterv						
Sorsz.	h_{be} , mm	Δh , mm	h_{ki} , mm	ϵ , %	$\epsilon_{össz}$, %	Kötés?
1.	34,2	0,4	33,8	1,17%	1,17%	✓
2.	33,8	0,4	33,4	1,18%	2,34%	✓
3.	33,4	0,4	33	1,20%	3,51%	✓
4.	33	0,4	32,6	1,21%	4,68%	✓
5.	32,6	0,5	32,1	1,53%	6,14%	✓
6.	32,1	0,5	31,6	1,56%	7,60%	✓
7.	31,6	0,6	31	1,90%	9,36%	✓

III. szúrásterv						
Sorsz.	h_{be} , mm	Δh , mm	h_{ki} , mm	ϵ , %	$\epsilon_{össz}$, %	Kötés?
1.	34,2	0,5	33,7	1,46%	1,46%	✓
2.	33,7	0,5	33,2	1,48%	2,92%	✓
3.	33,2	0,5	32,7	1,51%	4,39%	✗
4.	32,7	0,5	32,2	1,53%	5,85%	✗
5.	32,2	0,6	31,6	1,86%	7,60%	✗
6.	31,6	0,6	31	1,90%	9,36%	✗
7.	31	0,8	30,2	2,58%	11,70%	✗

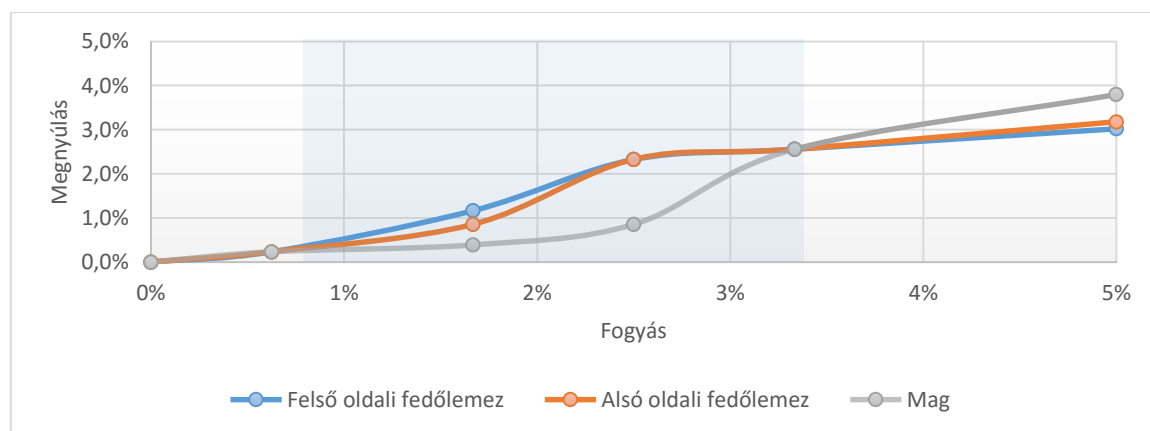
IV. szúrásterv						
Sorsz.	h_{be} , mm	Δh , mm	h_{ki} , mm	ϵ , %	$\epsilon_{össz}$, %	Kötés?
1.	34,2	0,6	33,6	1,75%	1,75%	✗
2.	33,6	0,6	33	1,79%	3,51%	✗
3.	33	0,6	32,4	1,82%	5,26%	✗
4.	32,4	0,6	31,8	1,85%	7,02%	✗
5.	31,8	0,8	31	2,52%	9,36%	✗
6.	31	0,8	30,2	2,58%	11,70%	✗
7.	30,2	1,2	29	3,97%	15,20%	✗

Feltételezésem szerint a kötés kialakulásának valószínűsége ott a legnagyobb, ahol az egyes rétegek alakítási ellenállása közel azonos ugyanazon megnyúlás mellett. Ezeket figyelembe véve négy különböző szűrastervet dolgoztam ki a tapasztószűrásokhoz, amelyeket az 11. táblázatban mutatok be.

A táblázatrészleteken látható, hogy az egyes szűrastervek első szűrásaiban az alakváltozások 0,9; 1,2; 1,5 és 1,8% körül mozognak. Az utolsó oszlopban jelöltem, hogy a kötés a magtuskó mindkét oldalán szabad szemmel látható hiba nélkül kialakult-e? Amennyiben csak az egyik oldalon, vagy szemmel láthatóan nem teljes hosszban valósult meg, úgy a plattírozást nem tekintettem elfogadhatónak. Gyakorlatilag csak a II. szűrasterv biztosította az elvárt kötés kialakulását. Ezért szükségesnek tartottam megvizsgálni azt is, hogy a különböző szűrásokban hogyan változik a fedőlemez és a maganyag hosszirányú mérete. A 8 – 9. ábra mutatják az egyes rétegek megnyúlását a teljes pakett relatív magasságcsökkenése (fogyása) függvényében.



8. ábra - Egyes rétegek megnyúlása a pakett magasságcsökkenése függvényében (A sorozat)

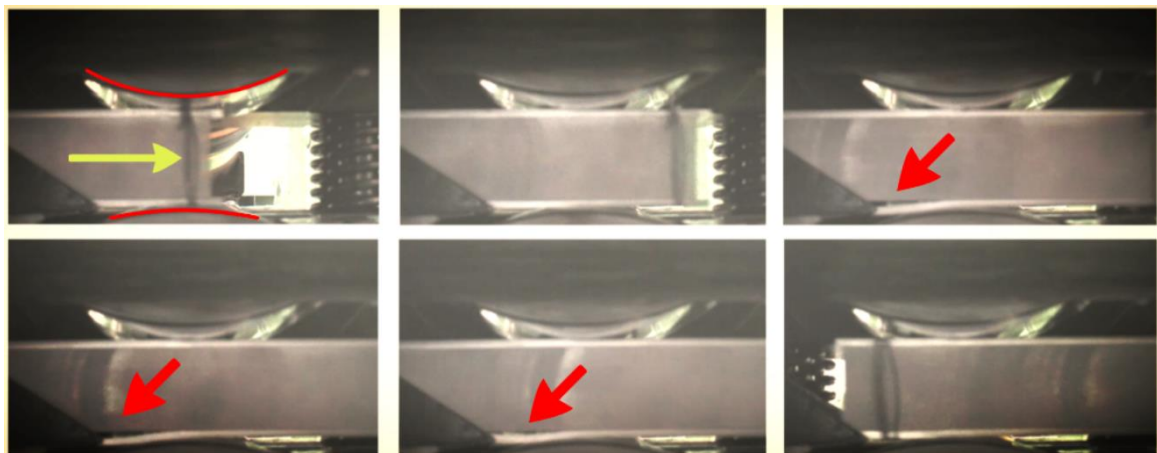


9. ábra - Egyes rétegek megnyúlása a pakett magasságcsökkenése függvényében (B sorozat)

Kísérleteim során azt tapasztaltam, hogy az egyes rétegek között csak abban az esetben alakul ki szemmel is látható kötés, ha a fedőlemez megnyúlása nagyobb, mint a magé. Megállapítottam, azt is, hogy a fedőlemez nagyobb mértékű keményedésének köszönhetően ez csak egy szűk tartományban biztosítható. Látható, hogy ez a szűk tartomány kb. 0,8 és 3,3 % közötti alakváltozás között van, ami 34 mm vastagságú pakettnél 0,3 – 1,1 mm közötti magasságcsökkenést jelent.

Ezek alapján feltehető az a kérdés, hogy igaz-e az a – több szerző által tett – megállapítás, miszerint egy adott küszöb értéket elérve a kötés kialakulása megtörténik, és az erőssége egyre nő, míg egy felső határt elér?

Megállapítottam, hogy egy felső határnál nagyobb alakváltozással járó szűrés esetén (a felületi nyomás felső küszöbértékének túllépésekor) a kötés kialakítása nem biztosítható, mert az érintkező felületek között kialakul ugyan a kötés, de a geometriából adódó eltérő sebesség, és nyúlási viszonyok miatt a hengerrésből kilépve azonnal fel is szakad (10. ábra).

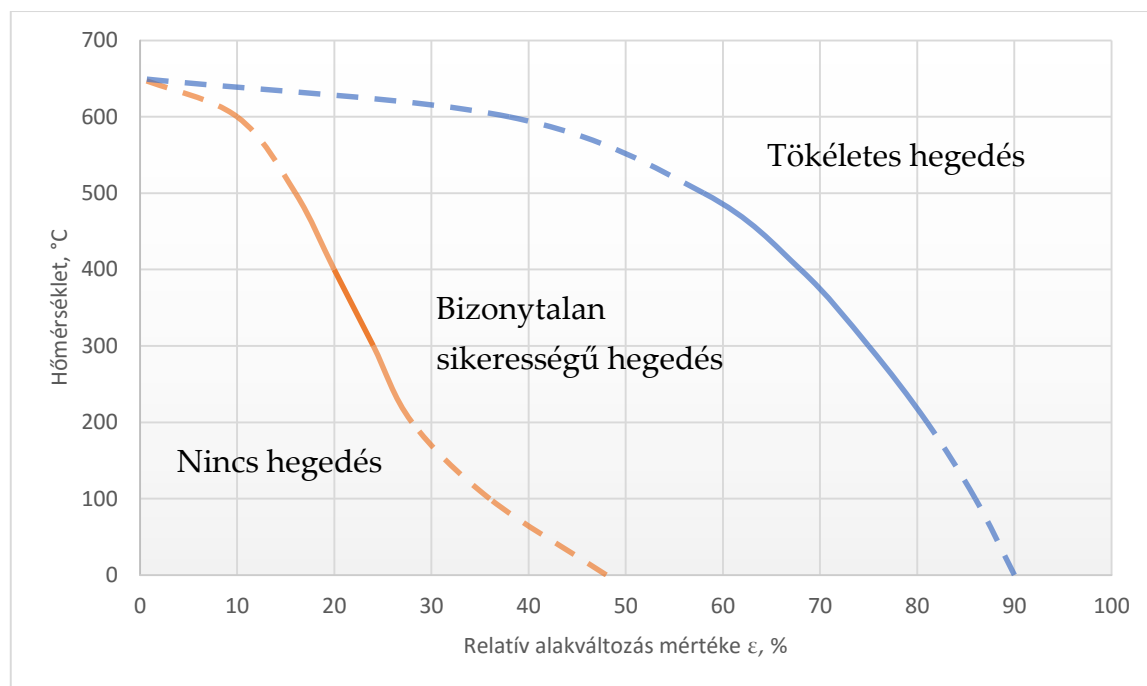


10. ábra - A már korábban kialakult kötés felszakadása az egyes rétegek eltérő nyúlásviszonyainak köszönhetően.

A kísérletek végeredménye a 11. ábrán szemléltetett határgörbe-diagram lehet. Ezen egyértelműen bemutatatható a két hőmérséklet-alakváltozási határgörbe, amely a diagram területét három részre osztja. Ezek a területek:

- A hegedést (tapadást) egyáltalán nem eredményező terület.
- A megbízható kötést eredményező terület (ennek az elérése a cél!).
- A két mező közötti, bizonytalan „vagy sikerül, vagy nem” terület, amit természetesen nem szabad a gyakorlati hengerrésznél megengedni.

Az ábrán a határgörbék felső és alsó szakaszát szaggatott vonallal húztam meg.



11. ábra – Határdiagram a várható kötés kialakulásához az alakváltozás és a plattírozási hőmérséklet függvényében

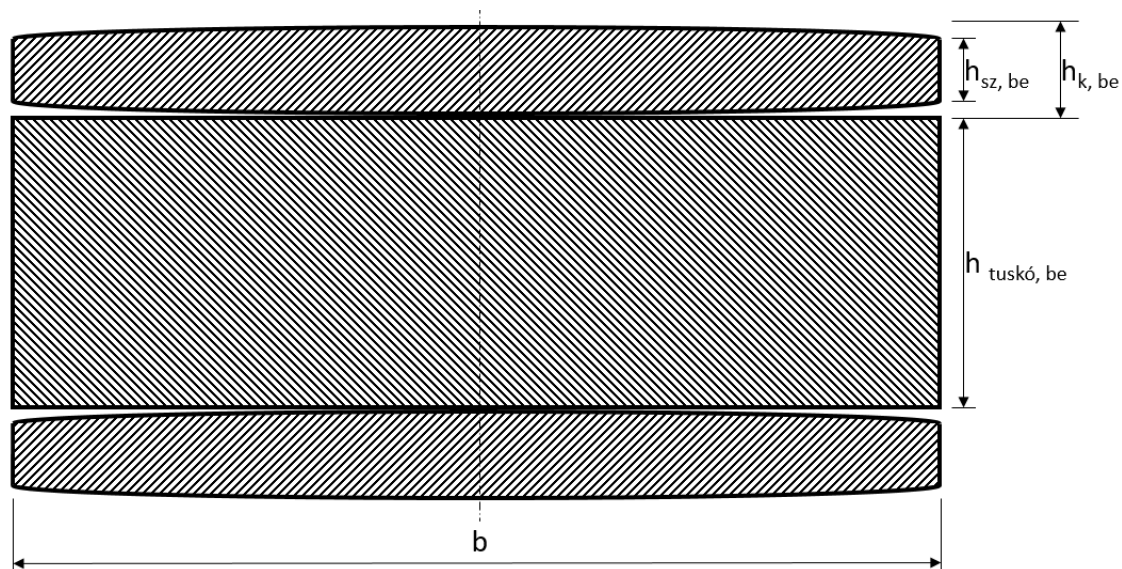
Ennek magyarázata, hogy az újrakristályosodási hőmérséklet alatt nem beszélhetünk meleghengerről és van egy olyan felső hőmérséklet határ is, amelyet nem célszerű túllépni, hiszen ez már olyan közel van az egyik anyagminőség olvadáspontjához, hogy emiatt lesz selejtes a darabunk. Például: megindul a durva újrakristályosodás, vagy a kenőanyag nélkül végzendő tapasztósúrások során a munkahengerek a nagyon erős feltapadás miatt „kitéphetnek” a felületből kis anyagrészeket.

II.IV. PLATTÍROZOTT TERMÉK MELEGHENGERRÉSI TECHNOLÓGIÁJÁNAK OPTIMALIZÁLÁSA ÜZEMI VISZONYOK KÖZÖTT

A meleghengerréssel végzett plattírozást a laboratóriumi kísérleti hengerléseknél használt keskeny pakettekkel szemben 1000 mm feletti szélesség tartományban végzik, 400-600 mm teljes magasságú kiinduló alapanyagokból. A laboratóriumi kísérleti eredmények birtokában azonban vizsgálni kell azt is, hogy a javasolt paramétereknek a megvalósítása ipari körülmények között (széles tuskó-méreteken) hogyan lehetséges. Ennek a vizsgálatnak az első lépése a hengerek, illetve ez esetben a henger-rendszer viselkedésének az elemzése.

A 12. ábra bemutatja a hengerlésre előkészített „pakettet”, vagyis az öntött és utána tuskómaróval párhuzamos felületűre megmunkált (plánparallel) magtuskó, valamint a melegen hengerelt borítólemezek összeállítását. A borítóle-

mezek keresztmetszete általában nem szabályos téglalap, hanem középen vastagabb („pozitív lencsésesség”). Ez a borítólemezek meleghengerréssel történő előállításának következménye.



12. ábra - A hengerlési pakett geometriája

Ahhoz, hogy hengerlés közben a szalag a hengertestek középvonalában maradjon, szükség van a lemez pozitív lencsésességére. A szélesség menti alakváltozás elemzése. Ezek figyelembevételével lehetséges az egyes jellemző hengerléstechnológiai paraméterek számítása. Melyet az alábbiak szerint célszerű elvégezni: A kiinduló lemez-pakett lencsésességét alapul véve, akkora magasságcsökkenést (hengerlési erőt) kell létrehozni, hogy a kifutó termék relatív lencsésége ne változzon, de a „hegedéshez” szükséges nagyságú legyen. Ez általában csak úgy érhető el, hogy a munkahengerek köszörült alapdomborítását előre kiszámoljuk, illetve előírjuk. Ehhez a hengerlési erő nagyságának a megbízható számítása nem nélkülözhető. A hengerlési erőt meghatározó összefüggésben – többek között – döntő szerepe van az anyagminőségnek, vagyis az alapanyag és a borítólemezek alakítási szilárdságának.

A hengerléstechnológiai paraméterek meghatározására alkalmas elméleti összefüggések általában nehezen kezelhető, bonyolult egyenletrendszereket képviselnek. Az egyenletek megoldásakor számos olyan adat, tényező fordul elő, amelyeket a konkrét feltételeknek megfelelően csak laboratóriumi vagy üzemi kísérletekkel lehet megállapítani. Ráadásul ezek az összefüggések csak „direkt” számításokra alkalmasak; explicit megoldásokat csak iterációval lehet nyerni. Márpedig a plattírozott lemezek hengerlésekor a „végeredményt” kell meghatározni, így a „bemenő” paraméterek változtatásával iterációt (iterációkat) kell lefolytatni. Ilyen

iterációra van például szükség az első tapasztó szűrásban szükséges hengerdomborítás számításához, majd az így elfogadott értékkel kell tudni optimális eredménnyel elvégezni a további szűrásokat (például mert nem lehet két szűrás között hengert cserélni, a domborítást legfeljebb külső hengerhajlítással – ha van ilyen – lehet megváltoztatni, stb.).

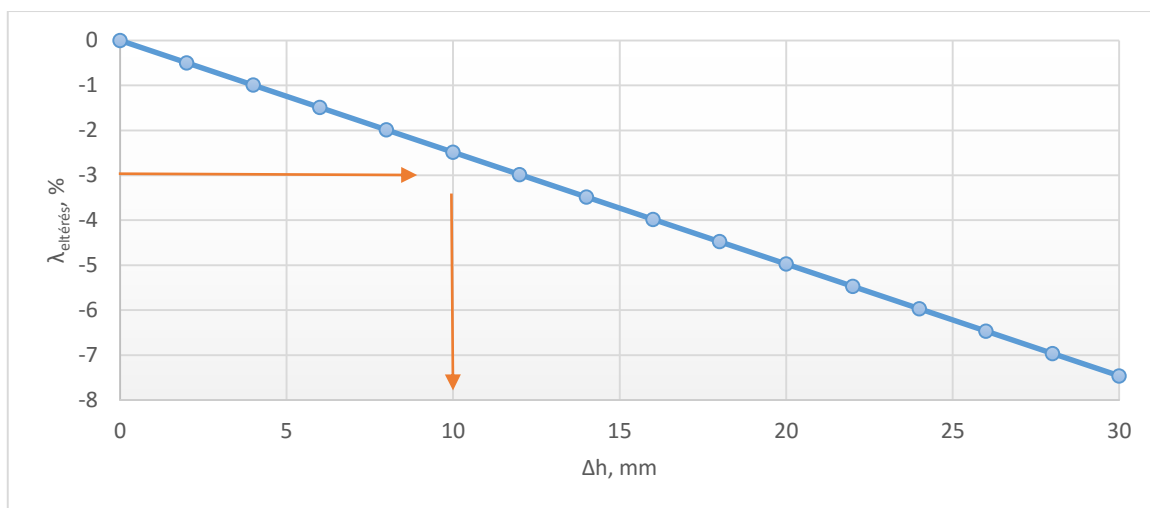
Az első tapasztó szűrás paramétereinek meghatározása

Az összeállított, és a fedőlemezek rögzítése után a pakett első szűrását a jó tapadás megkezdése érdekében úgy kell elvégezni, hogy a szélesség mentén az elemi szálak megnyúlása azonos legyen.

Az első szűrásban – a lemez szélesség mentén egyenletes nyúlás biztosítása érdekében – a hengerek alapdomborítását kell meghatározni (kiszámítani). Ekkor a többi hengerlési paramétert a reális tartományon belül szabadon lehet megválasztani, vagy felvenni. Meg kell például választani az alkalmazni kívánt hengersor gépészeti és geometriai adatait, a kiinduló pakett vastagságát és szélességét, beleértve a mag- és a fedőlemezek vastagságát és anyagminőségét is. Továbbá meg kell határozni a hengerlési kezdőhőmérsékletet (figyelembe véve a fémtanilag lehetséges korlátokat és a sok szűrás közben várható lehűlést), a kívánt hengerlési sebességet, és a kívánt magasságcsökkenést is. Ezek ismeretében meghatározhatók ennek az első szűrásnak a paraméterei, elsősorban beleértve azt a kívánt alapdomborítást, ami az egyenletes nyúlás feltételét kielégíti. Ez az így kiszámított alapdomborítás az összes további szűrásban már meglévő adatnak számít!

A további szűrésok paramétereinek meghatározása

A további szűrésok paramétereinek meghatározásához az első szűrásra vonatkozó programot mintegy meg kellett fordítanom, ugyanis itt a kiinduló értékek közé az első szűrásban megállapított hengerdomborítás tartozik, és ehhez kell keresni azt a (Δh) magasságcsökkenést, amely jó találati valószínűséggel biztosítja a szélesség menti egyenletes alakváltozást. Itt is a kiinduló adat a magasságcsökkenés, azonban ennek alkalmazásakor a szélesség menti alakváltozás nem lehet teljesen azonos, (kivéve ha a hengerállvány rendelkezik hengerhajlító berendezéssel). A kapott eredmény ebben az esetben a középső és a szélső szál közötti megnyúlás, illetve azok eltérése abszolút értékekben. Ha hengerhajlító nélküli berendezéssel hengerlünk, akkor ennek a százalékos eltérésnek egy „tűrésmezőt” kell megengedni. Javaslatom szerint ennek nagysága $\pm 2,5\%$, tehát a 13. ábra szerint a második tapasztó szűrásban maximum $\Delta h = 10$ mm engedhető meg. Ekkora magasságcsökkenéshez tartozó számértékek: biztosító 5. vagy 6. szűrás lehet), a súrlódási tényező számértékét át kell írni.



13. ábra - Szélesség menti nyújtási tényező eltérés a magasságcsökkenés függvényében

III. ÖSSZEFOGLALÁS, A KAPOTT EREDMÉNYEK FELHASZNÁLHATÓSÁGA

Értekezésemben a bevonatos fémlamezek gyártástechnológiájának egy „szeletével” foglalkoztam. Ma már egyre inkább csak a különféle felületvédelemmel ellátott fémlamezeket lehet eladni, hiszen ezek piaci ára – a viszonylag csekély hozzáadott érték ellenére – nagyobb vagy jelentősen nagyobb, mint az e nélkülieké. A közvetlen felhasználás előtt esetenként a védőréteget eltávolítják (például lemossák), de nagy részüknél olyan célszerű védőréteget visznek fel az alapfémre, amelyik többféle, hasznos alkalmazhatósággal is rendelkezik. Ezek egy része például a forrasztható fedőréteggel ellátott termék (például az autók hűtőegysége); de van olyan eljárás, amelyik a kész szerkezet hosszútávú korrózióállóságát van hivatva biztosítani.

Utóbbira jó példát az alumíniumötvözetek családjánál találhatunk: Egyre inkább szeretnék a mozgó berendezésekben található acél-lemezeket nagyszilárdságú alumíniumötvözetekkel helyettesíteni (repülőgép, autó). Sajnálatos tény azonban, hogy az acél szilárdságát megközelítő alumíniumötvözeteknek még a légköri korróziója is veszély-helyzeteket idéz elő. Ezért találták ki azt, hogy ezeket a nem-korrózióálló, de nagy szilárdságú és kis sűrűségű alumínium-lemezeket és szalagokat már a gyártás (hengerlés) közben mindkét oldalán beborítják jó korrózióálló képességű ötvöztelen (jellemzően: Al99,5 jelű) alumínium lemezekkel. Ez a megoldás legalább két, egymással ellentétes követelmény kielégítését vonja maga után. Egyrészt a borítás vastagságának a megállapítása: Ugyanis minél vastagabb

a borítólemez ugyanazon beépítési vastagság esetén, annál többet „ront” a teherbíró képességen. A túl vékonyra választott fedőlemez viszont a hengerlés folyamán kiszakadhat. Másrészt olyan hengerléstechnológiát kell alkalmazni, ami a megbízható és tartós „tapadást” eredményezi.

Értekezésemben is két nagyobb témakört elemeztem. Az egyik annak a vizsgálata, hogy gazdaságos körülmények között miként lehet a hengerlési paramétereket úgy beállítani, hogy a tapadás az alapfém és a fedőlemezek között kielégítő, sőt jó legyen. Ehhez a nagyméretű, üzemi körülmények között végzett hengerlés nehezen elképzelhető út, mivel a sikertelen kísérletek okozta selejtvesztély túl sok járulékos költségeket eredményezne. Ennek elkerülése érdekében kialakítottam egy, laboratóriumi körülmények között végrehajtható hengerlési-tapadási kísérletsorozat metodikáját. A vizsgálatok kiterjedtek különböző fém-kombinációkra, alakváltozásokra, hőmérsékletekre, az érintkező felületek előkészítésére, stb. A kis anyagmennyiséget igénylő (kb. 50 mm széles, és kb. 200 mm kezdő hosszúságú, de különböző anyagminőségű és vastagság-kombinációjú) kiinduló próbatestek kísérleti vizsgálatának a számát – a laboratóriumi viszonyok miatt – szintetizálva lehet növelni. Vizsgálható volt az első néhány, úgynevezett „tapasztó” szúrás számának, és a közben megvalósítható alakváltozás nagyságának a hatása (a tapasztószúrásokat szárazon kell elvégezni, annak érdekében, hogy az egyébként szokásosan alkalmazott hűtő-kenőanyag ne hatoljon be a még megfelelően össze nem hegedt lemezfelületek közé); valamint kialakítottam egy olyan minősítő eljárást is, amely a tapadás milyenségét és erősségét van hivatva ellenőrizni. Erre mérőszámot is javasoltam.

Az értekezésem másik témaköre az volt, hogy a laboratóriumi eredményeket átültessem üzemi viszonyok közé. Laboratóriumban ugyanis csak az optimális hengerlés-technológiai paraméterek egy részét lehetett optimalizálni. A valóságban azonban a hengerlésre előkészített pakettek igen szélesek (a hengersortól függően megközelítik akár a két métert is), azaz a vizsgálataimat ki kellett terjeszteni a henger-rendszernek a széles darabok hengerlése közbeni vizsgálatára is. Ennek keretében módszert dolgoztam ki arra vonatkozóan, hogy a henger-rendszer (általában kvartó elrendezésű hengerállványt használnak), rugalmas alakváltozása, ami a mindenkor hengerlési erő hatására mindig bekövetkezik, hogyan befolyásolja azt, hogy a szúrásokban soha se szakadjon fel a már elkezdődő összehegedés.

Az üzemi vizsgálataim során külön kellett választanom a legelső „tapasztó” szúrást, illetve az ez után végrehajtott további szúrások elemzését. Ennek magyarázata az, hogy az első szúráshoz szükséges legjobb köszörült alapidomborítású munkahengerekkel (a támhengereket nem célszerű köszörült alapidomborítással

ellátni) kell a hengerlést folytatni, illetve befejezni. Az optimális köszörült alapidomborítás nagyságán azt a hengerbombírt értem, amely mellett a szélesség mentén (az egyes „elemi” szálakban) egyenletes az alakváltozás. Ezt azonban csak az első szűrés paramétereinek ismeretében lehet kiszámítani. A további szűrésokban ezzel az alapidomborítással kell elérni az egyenletes szélesség menti alakváltozást, tehát ezekben a szűrésenkénti legnagyobb megengedhető alakváltozás nagyságát kellett kiszámolnom.

Tekintettel arra, hogy a fenti szűrásterv-készítés nagy számítástechnikai háttérrel igényel, számológépi programokat dolgoztam ki a kétféle alapvariációhoz szükséges optimalizálási feltételek biztosításához szükséges paraméterek meghatározásához. A számítógépi programok Excel alapon működnek, és olyan megoldást választottam, hogy azt viszonylag kis számítás-technikai ismeretekkel rendelkező munkatárs is használni tudja.

IV. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK (TÉZISEK)

1. Nagyszámú, 3 rétegű, AlSi10-AlMnCu-AlSi10 és AlSi10-AlMnSi-AlSi10, pakett alkalmazásával végrehajtott, laboratóriumi illetve félüzemi körülmények között végzett kísérletek alapján a módszertani célkitűzéseimnek megfelelően megállapítottam, hogy:

1.1. Ford szerszámmal, 10-90%-os alakváltozási tartományban végzett melegalakító tesztek eredménye alapján megadható az a szükséges alakítási mérték (ha adott körülmények között létezik), amelynél az alakított zóna fajlagos kötés szilárdsága eléri az alapanyag fajlagos szilárdságát, vagyis információt ad két alumínium ötvözet hengerléssel történő plattírozhatóságáról.

1.2. A tapasztószűrésok (az első néhány, kenőanyag nélküli, kis alakváltozással történő szűrésok) végén a kötés kialakulásának megfelelőségére a hengerrésből kilépő pakett felületének hőmérséklet mérése jó módszer. A tapasztószűrésok végére bekövetkező felületi hőmérséklet csökkenés mértékének (abszolút értéke függ az alkalmazott geometriai rendszertől) ismeretében lehet arról dönteni, hogy a pakett továbbhengerelhető e.

1.3. A végtermék (0,2-0,5 mm vastagság) minősége szempontjából megfelelő az a kötés, amelyben a lefejtő erő ($F_{\text{lefejtő}}$) által a fedőlemezben (keresztmetszete A) létesített feszültség érték és a fedőlemez alakítási szilárdsága között a következő összefüggés fenn áll:

$$\sigma_{lefejtő} = \frac{F_{lefejtő}}{A} \geq \beta \cdot Rp_{0,2},$$

ahol az általam kísérleti eredményekre alapozott β korrekciós tényező értéke 0,33.

2. A Von Roll kísérleti hengerállványon, 3 rétegű AlSi10-AlMnCu-AlSi10 és AlSi10-AlMnSi-AlSi10 paketteken végzett nagyszámú plattírozási kísérlet alapján az összetapadás feltételeivel kapcsolatosan igazoltam, hogy:

2.1. Az egyes rétegek közötti kötéseknél a tapasztószúrások alatt kell kialakulniuk. Ha a tapasztószúrások alatt nem alakul ki kötés, akkor a további hengerlés alatt sem fog.

2.2. A melegalakítás hőmérséklet-tartományának felső határáról kezdődő, a teljes melegalakítás során legalább 60%-os összalakítás szükséges ahhoz, hogy a tapadás az érintkező felületek egészen létrejöjjön, ami biztosítja a végtermék megfelelő minőségét.

2.3. Az általam vizsgált paraméter intervallumon belül a megfelelő kötés kialakulására a melegalakítás hőmérsékletének van a legjelentősebb hatása (már a kezdő alakítás hőmérsékletének pár 10 °C felületi hőmérséklet-csökkenés is nagymértékben rontja a kötés kialakulásának esélyeit). Az összetapasztani kívánt felületek érdessége és tisztasága kevésbé, az ötvözetek magnézium tartalma pedig legkevésbé hat a kialakuló kötés minőségére.

2.4. Az általam vizsgált paraméter-intervallumon belül, kísérleti módszerrel megállapítható az alakítási mérték, alakváltozási sebesség, és alakítás hőmérséklet függvényében az a technológiai ablak, melynek alkalmazásával a többrétegű végtermék gyártása félüzemi körülmények között biztonságosan megvalósítható.

2.5. A 3 rétegű AlSi10-AlMnCu-AlSi10 pakett hengerlése esetén a tapasztó szúrásokban a minőségi végtermék előállítása szempontjából a következő technológiai ablak alkalmazható: Hengerlési hőmérséklet 480 – 520 °C, hengerlési sebesség 5-8 m/min, relatív alakváltozás szúrásonként $\varepsilon = 0,8 - 1,2 \%$.

3. Kidolgoztam egy szúrásterv készítő algoritmust, amellyel alapozva nagyszámú laborkísérleteim eredményeire megadható az első tapasztószúráásban szükséges köszörült henger-alapdomborítás mértéke, melynek alkalmazásával a darab

szélesség menti alakváltozása azonos lesz. Az algoritmus segítségével kiszámítható a további tapasztó szűrésokban alkalmazható maximális magasságcsökkenés értéke, amelynek alkalmazásával a szélesség menti alakváltozás-különbség egy tetszőlegesen felvett határértéket, ami a javaslatom alapján $\pm 2,5\%$, nem halad meg. Ezen feltételek alkalmazása mellett a többrétegű termék ipari körülmények közötti hengerlése a szélesség menti felszakadások nélkül megvalósítható, vagyis minőségi termék gyártható.

V. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN SZÜLETETT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

- [1] SZABÓ G. és MERTINGER V., „Alumínium lemezek plattírozási technológiájának optimalizálása,” *Bányászati és Kohászati Lapok (Kohászat)*, 145:(3) pp. 25-28. (2012).
- [2] ROÓSZ A., RÓNAFÖLDI A., ZUPKÓ I., SZABÓ G., PUSKÁS CS. S. és BÁN R., „Eljárás sokrétegű szendvicsszerkezetű lemez előállítására”. Magyarország Szabadalom száma: P1500350, 2015. 07. 29..
- [3] G. SZABÓ és V. MERTINGER, „Investigation of typical bonding faults of plated Al sheets developed during rolling,” *Materials Science Forum Vol. 812* (2015) pp 387-392.
- [4] SZABÓ G., MERTINGER V., ZUPKÓ I., MIKÓ T. és ROÓSZ A., „Meleghengerléssel plattírozott többrétegű alumíniumlemezek technológiai vizsgálata,” *Bányászati és Kohászati Lapok (Kohászat)*, 148 (3) pp. 38-41. (2015).
- [5] SZABÓ G. és ZUPKÓ I., „Plattírozási kísérletek a Von Roll hengerállványon brazing alapanyagok hengerléséhez,” *Bányászati és Kohászati Lapok (Kohászat)*, 145 (3) pp. 21-24. (2012).
- [6] SZABÓ G. és MERTINGER V., „Plattírozott alumínium lemezek kötési viszonyainak technológiai vizsgálata,” *Miskolci Egyetem Közleményei: Anyagmérnöki Tudományok*, 37:(1) pp. 371-380. (2012).
- [7] G. SZABÓ, V. MERTINGER, I. ZUPKÓ és T. MIKÓ, „Technological investigation of clad sheet bonding by hot rolling,” *Key Engineering Materials Vol. 651-653* (2015) pp 243-247.
- [8] G. SZABÓ és V. MERTINGER, „Technological investigation of plated aluminium sheets,” *Materials Science Forum Vol. 729* (2013) pp 482-486.

