

**Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák  
Doktori Iskola**

**Kör keresztmetszetű fémhuzalok húzási technológiájá-  
nak számítógéppel támogatott tervezése és komplex  
optimalizálása**

PhD értekezés tézisei

**Kovács Sándor**  
okleveles anyagmérnök  
okleveles matematikus

Tudományos vezető:  
**Dr. Mertinger Valéria**  
egyetemi docens



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

Miskolc  
2012

# I. Az elvégzett kutatás összefoglalása

A huzalgyártás napjainkban is nélkülözhetetlen része a világ termelő-iparának. Termékeit a villamosipartól, a telekommunikációs ipartól kezdve, járműiparon, vasúti közlekedésen keresztül, gumiabroncs-, kerítés-, betonfeszítő huzal-, izzószál-, sodronykötél-gyártásig széleskörűen felhasználják. Magyarországon is több jelentős cég foglalkozik (jellemzően acél-, alumínium- és rézötvtözet alapanyagú) huzalok, rudak gyártásával, mint a Fux Zrt., D&D-Drótárú Zrt., Prysmian MKM Kft., Steelvent Kft., Archelormittal Szentgotthárd Kft., Inotal Alumíniumfeldolgozó Zrt., GE. Az, hogy 2012. augusztus végén a városban neyedikként Gustav Wolf Miskolci Drótygyár átadásra került, illetve a D&D-Drótárú Zrt. gyártókapacitása meghaladja a 100000 tonnát, és a Prysmian Group 2010-es eladásai meghaladták a 7 milliárd eurót, jól illusztrálják az iparág fontosságát.

A huzal- és rúdgyártás egyik legelterjedtebb gyártó-eljárása a húzás, mellyel méretpontos, kiváló felületi minőségű termék készíthető. A többi gyártási módszerhez képest olcsó és termelékeny a húzás, ez az oka, hogy a magyar huzalgyártók mindegyikénél megtalálható ez az eljárás.

A húzott terméket gyártó cégek, ha fennmaradásukat és fejlődésüket biztosítani akarják, akkor napra készen kell rendelkezésre állniuk az egyedi vevői igények számára, termékpalettájuknak folyamatosan változniuk kell. Ezen igényekhez tervezett termékekre és szolgáltatásokra történő specializálódás során a kutatás-fejlesztésre való összpontosítás elengedhetetlen. Az egyedi igényeknek megfelelően a kapacitások megújítása a termékek és a gyártási eljárások terén rendkívül rövid határidővel, előre megjósolhatatlan időpontokban bekövetkezhetnek. Ekkor a technológia tervezését gyorsan és hatékonyan kell végrehajtani úgy, hogy egyrészt a végtermék a kívánalmaknak megfelelő legyen, másrészt a gyártás is a lehető leghatékonyabb legyen mind költség, mind termelékenység szempontjából, ezáltal egy versenyképes árajánlatot kínálva az vevőnek. A tudományos igényű vizsgálati módszerek megtartása mellett, munkám e gyakorlati tények által inspirálva készült.

Egy alapvetően elméleti jellegű vizsgálat keretében (és úgy vélem, hogy egy PhD értekezéssel szemben ez az egyik alapvető követelmény) nem a technológiai részletek, hanem az általános, vagy általánosítható alapelvek megfogalmazása a cél. Ennek megfelelően nem foglalkoztam például olyan „gyakorlati” kérdésekkel, mint például a kenőanyag megválasztása, a húzószerszám hűtése stb., **hanem az olyan alapvető technológiai paramétereket kívántam elemezni, mint a szükséges (átlagos és maximális) húzófeszültség és a kilépő huzalanyag hőmérséklete, a huzal sebessége és a húzószerszám kúpszöge.** Elsősorban ezek a paraméterek határozzák meg egy húzástechnológiai terv részleteit. Ennek megfelelően a hozzáférhető, nagyszámú kísérleti adatokat közlő szakcikkek közül értekezésemben csak azokat dolgozom fel, amelyekben találtam ténylegesen mért húzóerőket, illetve hőmérsékleteket és a hozzájuk tartozó technológia paramétereket, hogy az eredmények felhasználhatóak legyenek a későbbi számítási/modelllezési feladatokban is.

A huzalhúzási technológiai folyamatokkal foglalkozó irodalomban nagy számban található olyan elméleti munkák is, amelyben a feszültségviszonyokat, húzó-

erő-igényt, és más paramétereket írják le különféle módokon. **Ebből kifolyólag, munkámban nem egy „n+1-ik” modell felírása volt a célom, hanem a technológiai folyamat egy új, globális, ipari környezethez illesztett tervezői szempontból való megközelítése.**

A huzalhúzás technológia tervezését segítő optimalizáló célfüggvényeket irodalma már nem rendelkezik a modellekhez fogható számossággal. A legismertebb ezek közül az egy fokozatú húzás esetén az optimális kúpszög megválasztása, mely a minimális erő-igényhez (és ezáltal teljesítmény-igényhez) tartozik. További ismert tervezői korlátok az irodalomban a hőmérsékleti korlát és az elméleti kihasználtsági tényezőre vonatkozó korlát.

Egy korábbi Dr. Reisz Gyula által írt, a Miskolci Egyetem Kohómérnöki Karán készült doktori disszertáció a húzásra vonatkozó tervezői korlátokat kiterjesztette. Az így kapott húzási „munkaterület” (a lehetséges és betartandó határgörbékét) kijelölte ugyan, de nem tért ki arra, hogy a nagyszámú munkapont választása között milyen eltérés lehet, azaz van-e, létezik-e a határgörbék közötti területen belül jobb, esetleg optimális munkapont, illetve ennek mik a konkrét technológiai paraméterei.

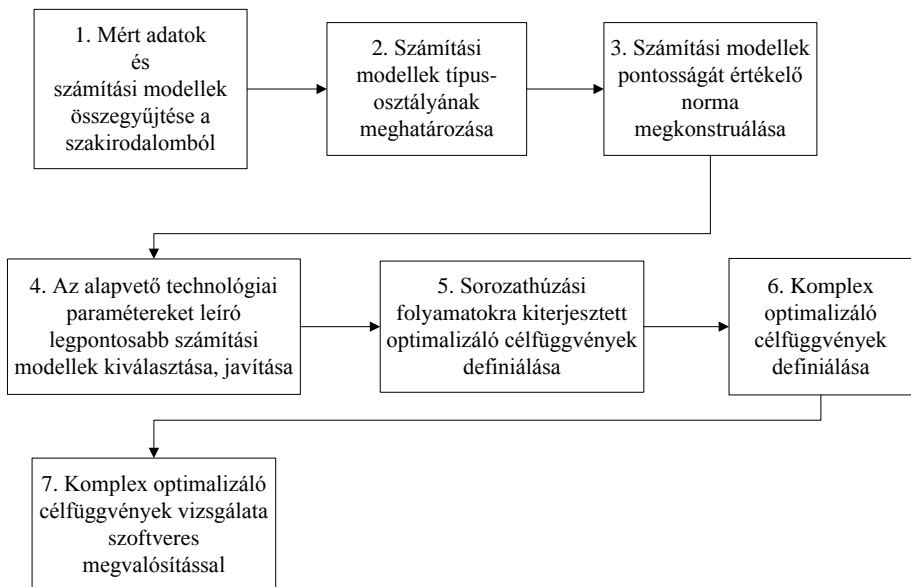
**Munkámban olyan komplex optimalizáló eljárás kifejlesztésre törekedtem, mellyel gyártáshatékonysági és minőségbiztosítási szempontok figyelembevételével olyan optimális technológia tervezhető, mely mind a gyártó, mind a vevő érdekeit a legjobban szem előtt tartja: az általános ipari gyakorlatban előforduló, vevői elvárásoknak megfelelő termékminőséget biztosít, a termelékenység maximalizálásával, a legkisebb gyártási költséggel. Az optimalizáló eljárás kis számítási igényét is biztosítani kívántam, hogy ezáltal az optimalizáló eljárást ipari környezetben is fel lehessen használni, a gyors technológia-tervezést segítve. Az általam megszerzett ismeretanyag alapján szoftvert fejlesztettem, mellyel a technológia tervezés kis számítási idő mellett elvégezhető.**

A disszertációm elsődrendű célkitűzése által kijelölt irány alapján az 1. ábrában bemutatott főbb pontok szerint épül fel.

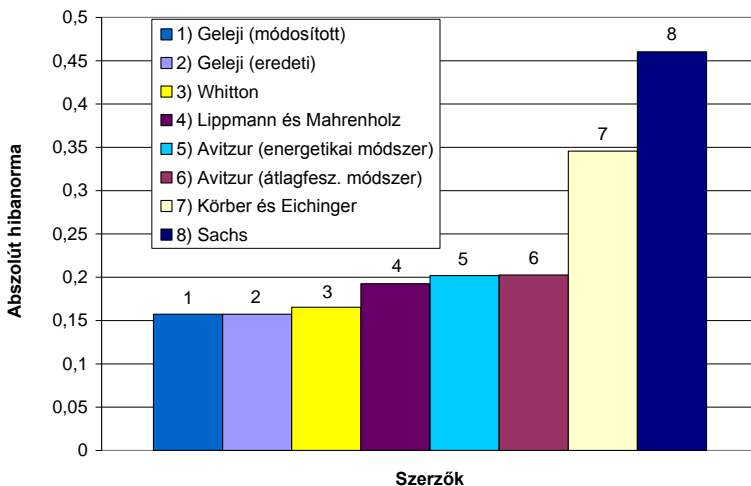
Munkám első pontja az irodalomkutatás, mely során összegyűjtöttem az összes számomra hasznos mérési adatokat és számítási modelleket tartalmazó cikkeket.

Következő pontban a számítási modellek osztályait szelektáltam annak érdekében, hogy a komplex optimalizáló eljárás tulajdonságai a legkedvezőbbek legyenek. Megmutattam, hogy matematikai leírásuk egyszerűségéből következően, kis számítási igénnyel rendelkező zárt, explicit analitikus formulákkal leírt modellek pontossága megegyezik a komplexebb véges elemes modellekével is huzalhúzás esetén. Ebből kifolyólag a kiválasztott modell-osztály a zárt, explicit formulával leírt modellek halmaza.

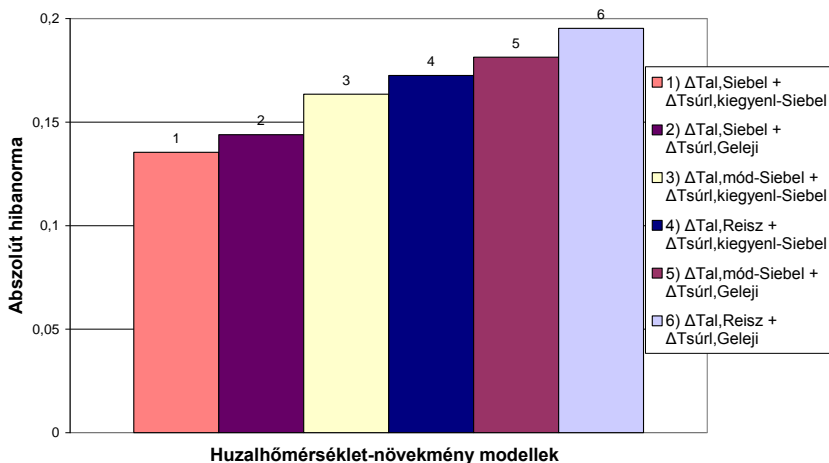
Ezt követően (3. pont) a választott modellekre értelmeztem egy értékelő normát, mellyel a rendelkezésre álló mérési adatok halmazán egy adott módszer pontossága meghatározható. A definiált abszolút és kvadratikusan hibanormákat a matematikában használt  $N$  dimenziós euklideszi tereken értelmezett 1-és 2-normák illetve a relatív hiba kompozíciójával állítottam elő.



1. ábra. A disszertáció szerkezeti felépítését vázoló folyamatábra.



2. ábra. A hűzőerőt leíró modellek abszolút hibanormái ellenhúzással történő alakítás esetén



3. ábra. Az alakváltozási és a súrlódási hőmérsékletemelkedésre felírt modellek különböző párosításaira kapott abszolút hibanormák.

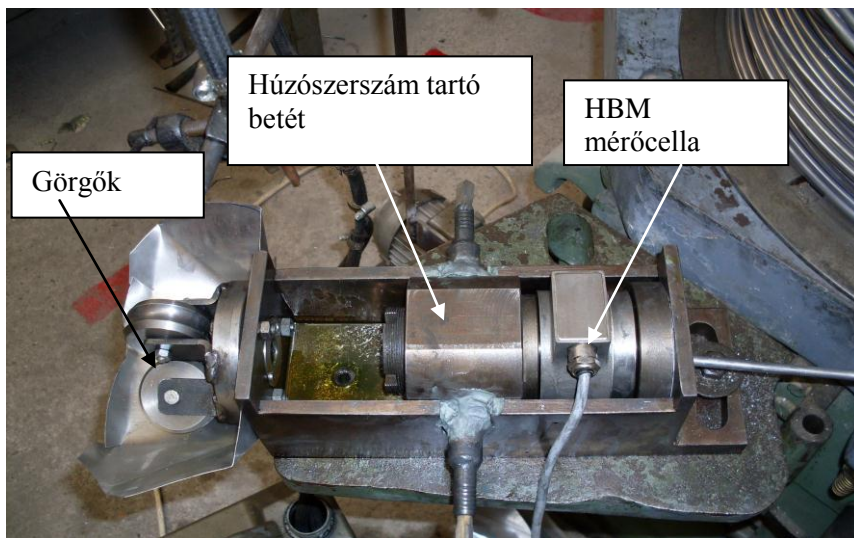
Ezt követő 4. pontban a meghatározott modellhalmazból és normákkal kiválasztottam a technológiai paramétereket legpontosabban leíró modelleket. A bázis adathalmazt 20 cikk mérési adatai képezték, melyek számossága megfeleltethető az adott euklideszi tér dimenzió számának. Erre a bázis adathalmazra vonatkozóan vizsgáltam a modellek által számított adathalmazok norma által meghatározott eltérését, azaz a különböző modellek pontosságát. A kapott normaértékek alapján a modellekre vonatkozó „ranglistát” kaptam, melyből kiválasztható a legjobb pontossággal rendelkező elméleti leírás (2. és 3. ábra).

További paraméterek esetén az irodalomban közölt leírásokat már nem találtam kielégítőnek, ezért a már meglévő modelleket módosítottam, teoretikusan vagy mérések segítségével javítottam. A huzal keresztmetszetén ébredő maximális húzófeszültségre felírt Geleji-féle modellben kisebb alakváltozások esetén elvi hibát találtam, melyre több javítási lehetőséget javasoltam.

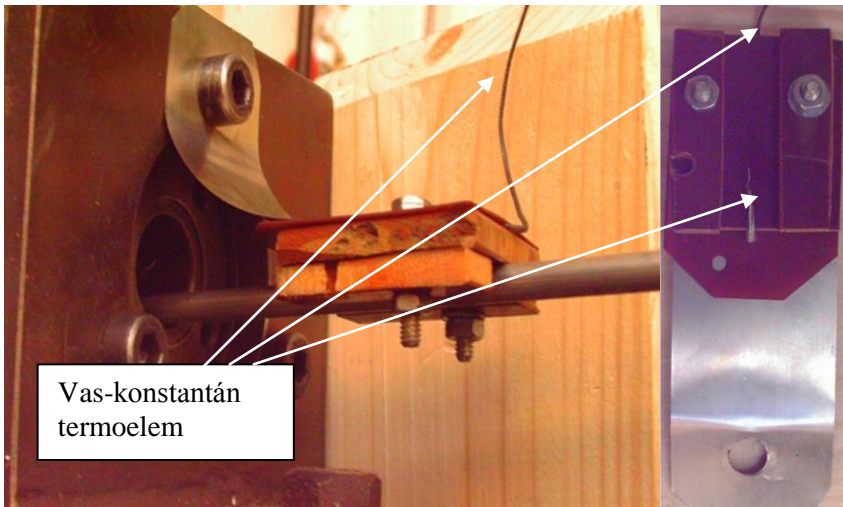
A vázolt eljárással egy olyan komplex modellt definiáltam, mely az alapvető technológiai paramétereket pusztán a geometriai és a sebesség viszonyok ismeretében pontosan számítani tudja, azaz a technológiai beállítások ismeretében, külön mérés eredményeképpen kapott adatot nem igényel. Ebben a lépésben az adott módszerek viselkedését illetve tulajdonságait külön is megvizsgálom. Az elméleti levezetésekben történő módosításokkal javítom, illetve kiegészítő mérésekkel teljessé teszem a modelleket.

A modellek korrekt definiálásához, illetve a hőmérsékleti adatok számának gyarapításához (melyre vonatkozó kísérletek az irodalomban csak kis számban található) huzalhúzási kísérleteket végeztem a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet Képlékenyalakító Laboratóriumában, vertikális elrendezésű

egyfokozatú durvahúzógépen, Al99,5 anyagminőségű Properzi durvahuzallal, MOL Fortilmo AWD 150 Special olajjal történő nedves kenéssel. A kísérletekben húzási sebességet, a húzóerőt (HBM mérőcellával), húzalhőmérsékletet (termoelemes egyedi mérőkonstrukcióval) mértem (4. és 5. ábra). Az elvégzett kísérletek segítségével a súrlódási tényező pontosított sebességfüggését is kidolgoztam az adott kenési viszonyra.



4. ábra. A szerszámtartó szekrény, bevezető görgőkkel.



5. ábra. A szerszámtartó szekrényre felszerelt hőmérsékletmérő eszköz oldalnézeti, illetve az alulnézeti képe.

Ezt követően (az 5. pontban) optimalizálási célfüggvények meghatározása a cél, egyrészt eddig nem leírt célfüggvény leírásával, másrészt a már a meglévő optimalizáló módszer módosításával (úgy, hogy az az ipari körülmények közötti sorozathúzás esetére is értelmezetté váljon).

A következőket dolgoztam ki:

- fokozatonkénti - a huzal anyagának károsodásának kivédése mellett - alakváltozási maximumot kereső célfüggvényt,
- a technológiai sorban a hőkezelés helyének meghatározásával a fajlagos alakváltozási munkát minimalizáló célfüggvényt,
- a kúpszögek nagyságának megválasztásával a meghajtás teljesítményigényét minimalizáló célfüggvényt.

Munkám 6. pontjában huzalhúzás esetén még irodalomban nem publikált optimalizáló célfüggvények: a komplex optimalizáló célfüggvények meghatározása a célom, melyek az előző pontban definiált célfüggvényekből épülnek fel. Ezáltal egy olyan komplex optimalizáló eljárást fejlesztve, mely eredményként 7 technológiai paraméter (húzóerő, maximális húzófeszültség, fokozatonkénti alakváltozás, fokozatszám, huzalhőmérséklet, fajlagos alakítási munka, meghajtás teljesítményfelvétele) optimális értékei, illetve a hozzájuk tartozó optimum-helyek (kúpszögek, lágyításig elvégzendő alakváltozás, kihasználtsági tényezők) egyszerre megkaphatók, így a sorozathúzási technológiatervezés egyszerűbbé, ugyanakkor kidolgozottabbá válik.

A két komplex optimalizáló célfüggvényt írok fel:

- minden fokozatban azonos szerszám-küpszöget kereső komplex optimalizáló eljárást,
- fokozatonként tetszőleges szerszám-küpszöget kereső komplex optimalizáló eljárást.

Az utolsó pontban a definiált komplex optimalizáló célfüggvényeket, a komplex modell segítségével szoftveresen megvalósítom (6. ábra), ezáltal szerevve információt a számítási igényekről és az eredményként kapott optimumok matematikai szerkezetéről.

SzerszámFéköszög (°)	Húzásmérf(kftűt)	Húzási sebesség(kftűt)	Sűrűdsi egyűthtő	Hűzőerő(N)	Elenerő(N)	Hőkezelések száma	Technológia optimalizálás
0 : 4,2	0 : 20	0 : 0,2	0 : 0	0 : 0	0 : 0	<input type="radio"/> Acél(C10)	Átlagos khasználtság (térvező(°0,01))
1 : 4,2	1 : 18,17	1 : 0,2	1 : 0,16	1 : 32878,1	1 : 0	<input type="radio"/> Alumínium(A99.9)	50 <input type="text"/>
2 : 4,2	2 : 16,96	2 : 0,15	2 : 0,15	2 : 31029,2	2 : 7897,1	<input type="radio"/> Rez(CuE)	
3 : 4,2	3 : 15,91	3 : 0,3	3 : 0,15	3 : 27382,3	3 : 7547,4		Maximális khasználtság (térvező(°0,01))
4 : 4,2	4 : 14,98	4 : 0,4	4 : 0,14	4 : 24121,9	4 : 6660,4		55 <input type="text"/>
5 : 4,2	5 : 14,13	5 : 0,4	5 : 0,13	5 : 21476,7	5 : 5877,3		<input checked="" type="checkbox"/> Elenerő felép-e
6 : 4,2	6 : 13,33	6 : 0,5	6 : 0,13	6 : 19022,8	6 : 5192,5		
7 : 4,2	7 : 12,58	7 : 0,5	7 : 0,12	7 : 17057,1	7 : 4627		
8 : 4,2	8 : 11,96	8 : 0,6	8 : 0,11	8 : 15366,3	8 : 4148,9		
9 : 4,2	9 : 11,16	9 : 0,7	9 : 0,11	9 : 13825,6	9 : 3737,6		
10 : 4,2	10 : 10,49	10 : 0,8	10 : 0,1	10 : 12385,5	10 : 3362,9		
11 : 4,2	11 : 9,85	11 : 0,9	11 : 0,09	11 : 11042,3	11 : 3012,6		
12 : 4,2	12 : 9,24	12 : 1	12 : 0,08	12 : 9788,2	12 : 2685,9		
13 : 4,2	13 : 8,65	13 : 1,2	13 : 0,08	13 : 8654,2	13 : 2383,2		
14 : 4,2	14 : 8,09	14 : 1,3	14 : 0,07	14 : 7616,3	14 : 2105		
15 : 4,2	15 : 7,55	15 : 1,5	15 : 0,07	15 : 6669,7	15 : 1852,5		Végtebesség az első húzási sorozatban(m/s)
16 : 4,2	16 : 7,04	16 : 1,8	16 : 0,06	16 : 5821,7	16 : 1622,3		5 <input type="text"/>
17 : 4,2	17 : 6,56	17 : 2	17 : 0,05	17 : 5058,4	17 : 1416		
18 : 4,2	18 : 6,1	18 : 2,4	18 : 0,05	18 : 4383,6	18 : 1230,4		
19 : 4,2	19 : 5,67	19 : 2,7	19 : 0,04	19 : 3783,3	19 : 1086,2		
20 : 4,2	20 : 5,27	20 : 3,2	20 : 0,04	20 : 3259,8	20 : 950,2		Végtebesség a második húzási sorozatban(m/s)
21 : 4,2	21 : 4,89	21 : 3,7	21 : 0,03	21 : 2803,6	21 : 792,6		5 <input type="text"/>
22 : 4,2	22 : 4,54	22 : 4,3	22 : 0,03	22 : 2406,9	22 : 681,9		
23 : 4,2	23 : 4,24	23 : 5	23 : 0,02	23 : 1993,3	23 : 585,4		
Lágyítás	Lágyítás	Lágyítás	Lágyítás	Lágyítás	Lágyítás	Összes logaritmus alakváltozás	Össz TeljesítményFévhőtel(W)
1 : 4,2	1 : 3,94	1 : 0,3	1 : 0,15	1 : 1611,7	1 : 9	5,99146454710798	348977,0 <input type="text"/>
2 : 4,2	2 : 3,57	2 : 0,3	2 : 0,14	2 : 1501,1	2 : 392		
3 : 4,2	3 : 3,35	3 : 0,4	3 : 0,14	3 : 1314,9	3 : 365,1		Végtebesség a harmadik húzási sorozatban(m/s)
4 : 4,2	4 : 3,14	4 : 0,5	4 : 0,13	4 : 1150,7	4 : 319,8		1 <input type="text"/>
5 : 4,2	5 : 2,96	5 : 0,5	5 : 0,12	5 : 1013,6	5 : 279,8		
6 : 4,2	6 : 2,79	6 : 0,6	6 : 0,11	6 : 900	6 : 246,5	Megengedett logaritmus alakváltozás	
7 : 4,2	7 : 2,62	7 : 0,7	7 : 0,11	7 : 803,1	7 : 219,9	3,6	
8 : 4,2	8 : 2,46	8 : 0,8	8 : 0,1	8 : 720,6	8 : 195,3		
9 : 4,2	9 : 2,31	9 : 0,9	9 : 0,09	9 : 644,3	9 : 175,2	Hőkezelések száma	
10 : 4,2	10 : 2,17	10 : 1	10 : 0,09	10 : 571,5	10 : 156,7	1	
11 : 4,2	11 : 2,03	11 : 1,2	11 : 0,08	11 : 505,9	11 : 139	<input type="button" value="Hőkezelés"/>	<input type="button" value="Optimalizálás"/>
12 : 4,2	12 : 1,89	12 : 1,3	12 : 0,07	12 : 445,8	12 : 123		
13 : 4,2	13 : 1,77	13 : 1,5	13 : 0,07	13 : 398,8	13 : 108,4		
14 : 4,2	14 : 1,65	14 : 1,8	14 : 0,06	14 : 340,5	14 : 94,8		
15 : 4,2	15 : 1,53	15 : 2,1	15 : 0,05	15 : 296,4	15 : 82,8		
16 : 4,2	16 : 1,43	16 : 2,4	16 : 0,05	16 : 256	16 : 72,1		
17 : 4,2	17 : 1,33	17 : 2,8	17 : 0,04	17 : 221,2	17 : 62,2		
18 : 4,2	18 : 1,23	18 : 3,2	18 : 0,04	18 : 190,8	18 : 53,8		
19 : 4,2	19 : 1,14	19 : 3,7	19 : 0,03	19 : 164,1	19 : 46,4		
20 : 4,2	20 : 1,06	20 : 4,4	20 : 0,03	20 : 140,7	20 : 39,9		
21 : 4,2	21 : 1	21 : 4,9	21 : 0,02	21 : 111,5	21 : 34,2		

6. ábra. Azonos szögű komplex optimalizáló szoftver kezelői felülete; komplex optimalizálást követően.



## II. Új tudományos eredmények

1 Kidolgoztam egy értékelő eljárást, amely az abszolút és a kvadratikus hibanormákon alapul, és segítségével kiválasztható a mért adatokat legpontosabban közelítő modell, – a már publikált – húzástechnológiai paraméterek elméleti leírásai közül. Az értékelő eljárás értelmezési tartományának a húzalhúzási paramétereket zárt (explicit) analitikus formulákkal leíró modellek halmazát adtam meg, figyelembe véve azt a tényt, hogy ezen modellek a legkisebb számítási igényvel, és – amint azt kimutattam – azonos pontossággal rendelkeznek a többi húzástechnológiai leírással összevetve. Az értékelő eljárás segítségével egy olyan komplex húzástechnológiai modellt dolgoztam ki, mely a szabályozható (húzási folyamatokat befolyásoló) paraméterértékek ismeretében minden alapvető technológiai paramétert pontosan meghatároz - a húzalgyártó ipari gyakorlatban általánosan használt acél, alumínium és réz anyagcsoportok esetén. A komplex modell az anyagminőségek nagy családjára jól kikutatott Hajduk-féle alakítási szilárdság modell mellett az alábbiakból épül fel:

1.1 Az abszolút és kvadratikus hibanormák segítségével igazoltam, hogy a fokozatonként fellépő húzóerő nagyságát, a (1,2) egyenletek segítségével írható le legpontosabban, ha az ellenhúzóerő is felléphet a húzási folyamatban.

$$F = k_{k, Ellen} \cdot \Delta A \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right) + 0,77 \cdot A_2 k_{fk} \cdot \alpha + F_{Ellen} \quad (1)$$

$$k_{k, Ellen} = \frac{k_{fk} (1 - 0,385\alpha) - \sigma_{Ellen}}{1 + \frac{\Delta A}{2A_2} \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right)} \quad (2)$$

1.2 Az abszolút és kvadratikus hibanormák segítségével igazoltam, hogy a fokozatonként fellépő hőmérsékletnövekedést a (3) egyenlet írja le a legpontosabban.

$$\Delta T = k_{fk} \frac{\varphi + \alpha}{\rho c} + \frac{1 - \left(1 - \frac{2b}{D_2}\right)^2}{3} \cdot 1,22 v_{súrt} \mu k_{fk} v_{át} \left(\frac{t_{al}}{\lambda c \rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

- 1.3 Kimutattam, hogy az 1.1 pontban elfogadott, legpontosabb húzóerő modellből származtatott, Geleji által felírt analitikus maximális feszültség modell elvi hibát tartalmaz kis alakváltozások esetében. Kidolgoztam a (4) egyenletekkel leírt modellt, mely a Geleji modell hibáját javítja, és a maximális feszültség jó analitikus leírását adja.

$$\sigma_{\max} = k_{fk} \left( \left( 1 - 0,385\alpha \right) \varepsilon \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \frac{1}{1 + \varepsilon \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} \right)} + \alpha \left( 1,27 + \frac{1}{\varepsilon \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} \right)} \right) e^{\frac{-0,03}{\varepsilon}} \right) \quad (4)$$

- 1.4 Pontosítottam MOL Fortilmo AWD 150 Special olajjal történő nedves kenés esetére, a Stribeck diagram alapján, félszáraz (vegyes) súrlódási szakaszra felírható hiperbolikus függvényt, mely a húzáskor a huzal és a szerszám között fellépő súrlódási viszonyokat jól jellemzi. Ennek érdekében húzási kísérleteket végeztem, mellyel meghatároztam a hiperbolikus függvény paramétereit. A mérésekkel  $R^2=0,99986$  korrelációt mutató egyenlet a következő:

$$\mu(v) = 0,0072 + \frac{1}{6,93 \cdot v + 5,1} \quad (5)$$

- 2 Optimalizáló célfüggvényeket dolgoztam ki, melyek értelmezettek az ipari körülmények közötti, gyakorlati sorozathúzás esetére is.

- 2.1 Kidolgoztam az átlagos és maximális kihasználtsági tényezők által korlátozott értelmezési tartományon a (6) alakváltozást maximalizáló célfüggvényt.

$$\max \left\{ \varphi \mid \xi = \text{konst}, \zeta = \text{konst} \right\} \quad (6)$$

A célfüggvényt pontosítottam úgy, hogy a feltételben szereplő gyakorlati átlagos és maximális kihasználtsági tényezők értékeit meghatároztam. A gyakorlati kihasználtsági tényező értékek a következők:

$$\xi_{\text{gyak}} = (0,5 \dots 0,55),$$

$$\zeta_{\text{gyak}} = (0,5 \dots 0,55).$$

A gyakorlati kihasználtsági tényezők beállításával minimalizálódik a huzaltermék károsodása és a felszakadások, repedések, felületi hibák valószínűsége. A maximális alakváltozással a húzási fokozatszám minimalizálódik, és ebből kifolyólag a termelés költsége is.

- 2.2 Kidolgoztam a fajlagos alakítási munkát minimalizáló célfüggvényt. A célfüggvény azon esetben értelmezett, amikor a húzási folyamattal megvalósítandó alakváltozás nagyobb, mint a huzalanyag alakváltozó-képessége. Ekkor a húzási folyamat közben egy lágyítást kell végezni. A célfüggvény eredménye a lágyítás előtt megvalósítandó alakváltozás nagysága, melynél a (7) fajlagos alakítási integrálfüggvény értéke minimális.

$$W = \int_0^{\varphi_{\text{lágyítás}}} k_f(\varphi) d\varphi + \int_0^{\varphi - \varphi_{\text{lágyítás}}} k_f(\varphi) d\varphi \quad (7)$$

A fajlagos alakítási munkával a fajlagos energiafelhasználás, és így a termelési költség is minimalizálódik.

- 2.3 Kidolgoztam sorozathúzás esetére a teljesítményt (erőt) minimalizáló célfüggvényt, a már létező egy fokozatú húzásra kidolgozott célfüggvény módosításával és kiegészítésével. Az általam meghatározott célfüggvény eredménye a húzószerszámok kúpszögeinek sorozata, mely értékeknél a meghajtás teljesítményét leíró (8) függvény minimalizálódik.

$$P_{\text{össz}} = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{N_h-1} \frac{F_i v_i + (F_i - F_{\text{Ellen},i+1}) v_{\text{rel},i}}{\eta_{\text{meghajtás},i}} + F_{N_h} v_{N_h} \quad (8)$$

A meghajtás teljesítmény-igényének minimalizálásával a fajlagos energiafelhasználás, és így a termelési költség is minimalizálódik.

- 3 Kidolgoztam, a huzalhúzási folyamatokra két komplex optimalizáló célfüggvényt, amelyeknek az értelmezési tartományát nem csak egyenletek és egyenlőtlenségek, hanem más optimalizáló célfüggvények is korlátozzák. (Huzal- és dróthúzás irodalmában ilyen típusú optimalizáló célfüggvényt nem publikáltak eddig.) A komplex optimalizáló eljárás elsődrendű célfüggvénye a teljesítmény-igényt optimalizáló célfüggvény, melynek feltételrendszerében vannak a fajlagos alakítási munkát, a fokozatonkénti alakváltozást optimalizáló célfüggvények, illetve az átlagos huzalhőmérsékletre vonatkozó felső korlát, mely az ipari tapasztalatok alapján lett megállapítva. Egy további feltételnek a feltételrendszerbe beépítésével az azonos-szögű komplex optimalizáló célfüggvényt definiáltam. A feltétel az a megkötés volt, hogy az optimumhoz tartozó kúpszögeknek azonosaknak kell lenniük. Ez tovább szűkíti a célfüggvény értelmezési tartományát, viszont a számítási igényét is tovább csökkenti. Az azonos-szögűség feltételének elhagyásával a változószögű komplex optimalizációt kapjuk. A komplex optimalizáló célfüggvény által a technoló-

gia tervezés egy eljárás keretein belül elvégezhető, az eddigi tervezői procesz-  
szusokhoz képest kidolgozottabb módon.

- 4 Bizonyítottam, hogy az azonos-szögű és a változószögű komplex optimalizáló eljárások által eredményül kapott teljesítmény-igények különbsége olajba mártással történő „nedves” húzás esetén finom-,közép-, durvahuzal esetén nagyon kicsi. A komplex optimumok közötti eltérés abszolút hibanormája 0,04 alatt van. A huzalanyagok alakváltozó képességéig történő húzás esetén a húzási sorozat fokozatszámja maximálisan 1-2 fokozattal csökken.
  - 4.1 Bizonyítottam, hogy az azonos-szögű és a változószögű komplex optimalizáló eljárások eredményének különbsége a huzalhúzási sebességtől függ. A sebesség növekedtével monoton módon nő az optimális teljesítmény-igények különbsége. A különbség a vázolt összefüggés szerint, hozzávetőlegesen 10 m/s húzási sebesség alatt még elhanyagolható mértékű, abszolút hibanormája 0,08 alatti.
  - 4.2 Bizonyítottam, hogy finom-, közép-, durvahuzalok mérettartományában (huzalátmérő: 0,5...20 mm) a huzalátmérő nem befolyásolja a komplex optimumok közötti különbséget; az abszolút hibanorma jellemzően 0,04 alatti. Kisebb átmérők esetén az eltérés abszolút hibanormája nagy meredekségű növekedést mutat.
  - 4.3 Bizonyítottam, hogy a komplex optimalizációk eredményének eltérése a huzal anyagminőségétől elhanyagolhatóan kis mértékben függ. Kimutattam az Al99,5, CuE, C10 anyagminőségeken végzett vizsgálatokkal, hogy a keményedési kitevők különbségének a hatása jelentkezik az abszolút hibanormák értékében, viszont közöttük az eltérés 0,01-nél kisebb tetszőleges két anyag összehasonlítása esetén. Az anyagminőség függvényében számolt abszolút hibanormák 0,045 alattiak voltak. Ezen eredmények alapján, megállapítottam, hogy az azonos-szögű és a változószögű komplex optimalizáció hozzávetőlegesen azonos pontossággal bír az anyagminőségtől függetlenül.

Megállapítottam, hogy huzalhúzási technológia tervezésekor a kisebb számítási igényű azonos-szögű komplex optimalizáló célfüggvény alkalmazható a változószögű optimalizáló célfüggvénnyel hozzávetőlegesen azonos pontossággal, a gyártó által megválasztható technológiai paraméterekre vonatkozó feltételek teljesülése mellett: 10m/s-nál kisebb húzási sebesség, 0,5...20mm huzalátmérő (tetszőleges huzalanyag).

## Jelölések:

F	húzóerő [N]
F <sub>Ellen</sub>	ellen-húzóerő [N]
v	húzási sebesség [m/s]
A	keresztmetszet [mm <sup>2</sup> ]
k <sub>f</sub>	alakítási szilárdság [N/mm <sup>2</sup> ]
k <sub>k</sub>	szerszám felületén fellépő közepes alakítási ellenállás [N/mm <sup>2</sup> ]
A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub>	adott fokozatban a huzal belépő, illetve kilépő keresztmetszete [mm <sup>2</sup> ]
ΔA	= A <sub>1</sub> -A <sub>2</sub> [mm <sup>2</sup> ]
k <sub>f1</sub> , k <sub>f2</sub>	adott fokozatban a huzal belépő, illetve kilépő alakítási szilárdsága [N/mm <sup>2</sup> ]
k <sub>k</sub>	=(k <sub>f1</sub> +k <sub>f2</sub> )/2 [N/mm <sup>2</sup> ]
v <sub>1</sub> , v <sub>2</sub>	adott fokozatban a huzal belépő, illetve kilépő sebessége [m/s]
D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub>	adott fokozatban a huzal belépő, illetve kilépő átmérője [mm]
μ	súrlódási tényező a szerszámban [-]
α	húzószerszám félkúpszöge [°]
ε	relatív fogyás (mérnöki nyúlás) [-]
φ	logaritmikus alakváltozás [-]
σ <sub>Ellen</sub>	átlagos ellenhúzó feszültség [N/mm <sup>2</sup> ]
k <sub>k, Ellen</sub>	alakítási ellenállás ellenhúzó erő felléptekor [N/mm <sup>2</sup> ]
ΔT	hőmérsékletnövekedés a huzalban [°C]
ρ	huzal anyagának a sűrűsége [kg/m <sup>3</sup> ]
c	huzal fajlagos hőkapacitása [J/(kg*°C)]
v <sub>súrl</sub>	a súrlódási hő megoszlási hányadosa [-]
t <sub>al</sub>	huzal egy anyagi pontjának az alakítási zónában töltött átlagos ideje [s]
λ	huzal hővezetési tényezője [W/(m*°C)]
b	súrlódási hő behatolási mélységéhez [m]
V <sub>átl</sub>	=(v <sub>1</sub> +v <sub>2</sub> )/2 [m/s]
ξ, ξ <sub>gyak</sub>	átlagos kihasználtsági tényező, gyakorlati átlagos kihasználtsági tényező [-]
ζ, ζ <sub>gyak</sub>	maximális kihasználtsági tényező, gyakorlati maximális kihasználtsági tényező [-]
P <sub>össz</sub>	meghajtás által felvett összes teljesítmény [W]
Φ <sub>lággyítás</sub>	adott húzási sorozatban a lággyító hőkezelésig elvégzett alakváltozás [-]
W	fajlagos alakítási munka [N/mm <sup>2</sup> ]
v <sub>rel</sub>	tárcsa vagy dob kerületi sebessége és a huzal sebessége közötti különbség [m/s]
η <sub>meghajtás</sub>	meghajtás hatásfoka [-]
i	fokozat sorszáma [-]
N <sub>h</sub>	h-dik sorozat fokozatainak a száma [-]
h	húzási sorozat sorszáma [-]
H	húzási sorozatok száma [-]

### **III. Az értekezés tudományos eredményeinek jelentősége és hasznosításuk lehetőségei**

Munkám fő motivációja a rúd- és huzalhúzás technológiájának ipari körülmények között történő tervezésének újragondolásával, kidolgozottabbá és egyszerűbbé tétele, illetve számítógépes támogatással a tervezési idő rövidítése.

Komplex huzalhúzási folyamatot leíró modellt határoztam meg, mely az összes alapvető húzási paramétereket gyorsan, és pontosan számolja ki. A meghatározás alapja egy kiválasztási eljárás volt, mellyel a már publikált húzástechnikai modellek összehasonlíthatóvá váltak. Ezáltal az irodalomban egyedülálló módon, a nagyszámosságú húzástechnikai modellek összevetését végeztem el azzal a céllal, hogy kiválasszam a mért adatokat legpontosabban megközelítő elméleti leírást.

A huzal- és rúdgyártó cégek jellemzően nem alkalmaznak az alapvető technológiai paramétereket (mint a húzóerőt, huzalhőmérsékletet) ellenőrző mérési rendszereket, a költségek csökkentésének érdekében. Az általam definiált komplex modell segítségével ezek az alapvető technológiai paraméterek pontosan meghatározhatóvá válnak e termelő cégek számára is.

Az irodalomban eddig szintén egyedülálló módon kidolgoztam a huzalhúzási technológiára két komplex optimalizáló célfüggvényt, melyek szintén eddig nem publikált, általam definiált optimalizáló célfüggvényekből lettek felépítve. A komplex optimalizáló célfüggvény előnye, hogy egyetlen eljárásban a vevői és gyártói igényeket komplex módon figyelembe véve határoz meg egy optimális technológiát.

A két komplex optimalizáló célfüggvény összevetéséből kimutattam, hogy a magyar ipari adottságoknak megfelelő körülmények között az optimumok hatékonysága megegyezik. A kisebb számítási igénnyel rendelkező azonos-szögű optimalizáló eljárással szoftvert fejlesztettem.

Régióink fejlődő huzal- és drótygyártó iparának fennmaradásához szükséges, hogy a cégek naprakészen változó termékpalettával rendelkezzenek, és az új vevői igényeknek megfelelően bármikor rendelkezésre álljanak. Ebből következően egy új technológia lehető legkörültekintőbb megtervezésénél a hatékonyság mellett fontos tényezővé válik a tervező folyamat rövid idő alatt történő végrehajtása. Ezen cégek adottságait figyelembe vevő és az azonos-szögű komplex optimalizáló eljárás alapuló szoftver az új helyzet által megkövetelt számítási időre vonatkozó, és hatékonysági szempontok mindegyikének megfelel, és ipari körülmények közötti technológiatervezésre alkalmazható.

A disszertációmban elért eredményeket a Miskolci Egyetemen, Műszaki Anyagtudományi Karán folyó BSC és MSC képzés hőkezelő és képlékenyalakító szakirány tananyagába beépülnek.

## IV. Summary

The main purpose of dissertation was to promote the planning of industrial technology as well as to increase its effectiveness. A further aim helping the realization of the main purpose was to choose the most suitable model of the models describing the technological parameters published in the references as well as to perform wire-drawing experiments by using a vertical one-step drawing machine operating in the Laboratory of Plastic Deformation of Institute of Physical Metallurgy, Plastic Deformation and Nanotechnology in order to obtain further information about the temperature conditions and the behaviour of friction coefficient. In accordance with my main purpose, the development of the new optimization methods of wire drawing processes was described in my dissertation by which the planning of industrial technology could be promoted in an effective way. It is a very important aspect to define the model describing/calculating the technological parameters for an effective optimization process where the computability of explicit optimums is very important. Therefore two mathematical norms were interpreted to the set of models published in the references by which it can numerically be determined how the measured data are approximated by the given model. By means of (31, 32), a goodness sequence can be stated among the models and the theoretical description approximating the measured values in the best way can be chosen. Most of the values of measured data and the experimental values of parameters belonging to them were also found in the references but I myself performed wire drawing experiments too in the Laboratory of Plastic Deformation of the Faculty increasing by this the number of wire-temperature data.

The technological parameters to be modelled were the drawing force, drawing stress, wire temperature, deformation strength and friction coefficient. The sphere of these modelling theories was reduced taking into consideration the complexity of optimization calculation methods. It can be concluded from the mathematical structure of methods describing the technological parameters of multi-step drawing processes that their optimization is a non-linear optimization. In case of a non-linear optimization, the quickness of method calculating the optimum value is very important in addition to the places and computability of extreme values. Therefore the methods approximating well the measured data and can quickly be calculated were selected in the course of choosing the models. These models belong to the set of methods described by the closed explicit analytical equations so the theoretical descriptions giving the measurement data in the most exact way were found among them. In this dissertation, it has been pointed out that in case of wire drawing – owing to the simple geometry belonging to the deformation - the models described by closed, explicit analytical formulas can give the same exactness which can be obtained by the finite element methods requiring much longer time of calculation. (In this case the time of calculation can be longer by more orders of magnitude). It can be concluded from the aforementioned facts that the methods described by

closed, explicit analytical formulas are satisfactory not only from the point of view of the length of time of calculation but from the point of view of the exactness as well therefore the most suitable model was found in the model-set produced by them by means of the error-norms. The following models describing the technological parameters were found the best ones in case of using the error-norms during multi-step wire drawing: the theories defined by the equations (36,37) were accepted for the drawing force developing at each stage and the theories defined by the equations (52) were accepted for the growth of wire temperature in each stage.

The descriptions concerning the other remaining parameters published in the references seemed to be not satisfactory therefore the existing models were modified and improved theoretically or by means of measurement. A theoretical inaccuracy was found in case of the minor deformations in the Geleji model described for the maximum value of drawing stress arising in the cross section of wire and more different correction methods were suggested in order to correct it. At last the model (45) was developed for correcting the inaccuracy. The behaviour of friction coefficient depending on the velocity can well be explained by the Stribeck diagram though its hyperbolic decrease could be given by the drawing experiments performed in the Laboratory of Plastic Deformation for the case of wet lubrication by using the MOL Fortilmo AWD 150 Special oil.

The widespread Hajduk-model of high accuracy was accepted for describing the deformation strength defining by it such a complex multi-step wire drawing model the parameters of which can be calculated without performing experimental measurements. So a result showing an exact conformity with the real measurement data can be obtained from this complex model by using merely the means of computer technology.

In the further part of my work, optimizing objective functions searching for the optimums of material quality, the cost-effectiveness and productivity were described for most of the technological parameters that can be controlled directly. First the objective function optimizing the deformations arising in each pass was described; its condition-system determining its definition domain (61, 62) was given by the practical limits of utilization factors. A drawing sequence with a minimum number of passes can be obtained by it ensuring at the same time the high quality of product. Next – by minimising the equation of specific deformation work (72) – the objective optimization function determining the place of annealing was described. This objective function shall be involved in the multi-step wire drawing process owing to the deformability of material. As a result, a deformation is obtained where it is necessary to anneal the drawn product minimising by it the specific consumption and as a consequence the costs as well. In the course of the third step, the above-mentioned performance-optimization was extended for the case of multi-step drawing. This objective function searches for the minimum value of function (73) expressing the consumption necessary for driving on the limited set of cone angles (30-300). At last the industrial limits concerning the temperature of lubricant was extended to the average temperature of wire; it gives the upper limit of wire velocity.



One complex optimization objective function was described from the determined optimization objective functions. The complex objective function has a condition system limiting its definition domain where other different optimization objective functions can be found instead of equations and equalities. As far as I know, no complex optimization method relating to the parameters of multi-step drawing technology has been described in the references for the time being yet. Therefore the objective function described by me opens new perspectives in order to make the planning of technology of multi-step wire drawing simpler and more accurate.

The prime objective function of complex optimization method is the objective function which optimizes the consumption and the condition-system of which comprises the objective functions optimizing the specific deformation work, the deformation in each pass and the wire temperature.

A further optimization objective function was obtained by including another condition in the condition-system. It is prescribed by this condition that the cone angles belonging to the optimum value must be identical. By this, the definition domain of objective function reduces further but the time necessary for the calculation becomes shorter as well.

Owing to the non-linearity of complex optimizing objective function, its result cannot be obtained analytically; it can only be calculated by means of algorithmic, recursive methods. During the next step of my work, the two complex optimizing objective functions (with identical and variable angles) were compared on the basis of the calculated optimums and the length of time necessary for their calculation.

The difference between the lengths of time necessary for the calculation of the two objective functions was determined by the algorithmization of the complex optimization processes. It was stated that the difference between the lengths time of calculation is at least of 2 orders of magnitude i.e. 100 times more (e.g. run time lasting for some minutes versus for a day).

The complex optimization methods were realized by means of a software as well. The differences between the complex optimums were determined by comparing the results of software runs with the consumption necessary for driving and the total number of passes. As a result it could be stated that the absolute error-norm of difference is below 0.04 i.e. the two kinds of complex optimizations shows a good conformity in general. After performing more detailed investigations, it could be concluded that the optimizing method with identical angles requiring much shorter time for calculation is suitable for the most effective realization of planning the industrial technology independent of the quality of material of fine-medium- and coarse wires (diameter 0.5...20 mm) if the final velocity is less than 10 m/s. A complex optimization with variable angles is suggested for planning the technology of multi-step drawing in case if the values of velocity and diameter differ from the aforementioned values and our purpose is to increase the effectiveness of industrial technology.

## V. Az értekezés témakörében megjelent publikációk

1. Kovács, S., Voith, M.: **Optimization of the cold-drawing technology.** 4th International Conference Processing and Structure of Materials (PSM4), Palic, Serbia, 2010, pp.:187-193
2. Kovács, S., Voith, M.: **Searching the optimal drawing stresses for adequate product quality at the drawing technology design.** INTECH Conference, Prague, Czech Republic, 2010, pp.: 363-367
3. Kovács, S.: **Optimization of the power requirement of the multi-stage cold drawing technology.** Doktoranduszok Fóruma, 2010, Miskolci Egyetemi Kiadvány, pp. 9-16
4. Kovács, S.: **Hideghúzási folyamatok modellezése.** XIV. Képlékenyalakító Konferencia, Miskolc, 2012, pp.: 108-113
5. Kovács, S.: **Kör keresztmetszetű huzalhúzás technológiai paramétereinek modellezése, Modelling of technological parameters of drawing of round cross-section wire.** Anyagmérnöki Tudományok, 37. kötet, 1.szám (2012), pp.:237-247
6. Kovács, S., Mertinger, V.: **Development of complex analytical model for optimizing software of wire drawing technology** Journal of Materials Science Forum, Vol. 729 (2013), pp.: 156-161