

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



**Kör keresztmetszetű fémhuzalok húzási
technológiájának számítógéppel támogatott tervezése
és komplex optimalizálása**

DOKTORI (Ph.D.) ÉRTEKEZÉS

Kovács Sándor
okleveles anyagmérnök
okleveles matematikus

Tudományos vezető:
Dr. Mertinger Valéria
egyetemi docens

Miskolc
2012

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	1
2.	Technológiai áttekintés	4
3.	A huzalhúzás paramétereit leíró modell kiválasztása.....	14
3.1.	Analitikus és végeselemes modellek összevetése	18
3.2.	Húzóerő modell kiválasztása egy-húzásos esetre.....	22
3.3.	Húzóerő modell kiválasztása sorozat húzásos esetre	29
3.4.	A maximális húzófeszültség modell megkonstruálása.....	34
3.5.	Hőmérsékleti modell kiválasztása	38
3.6.	Egyéb paramétereket leíró modellek.....	50
3.6.1.	Súrlódási tényező.....	50
3.6.2.	Alakítási szilárdság	52
4.	A huzalhúzás paramétereinek optimalizálása	54
4.1.	Kihasználtsági tényezőkkel történő optimalizálás	57
4.2.	Optimális fajlagos alakítási munkához tartozó lágyító hőkezelés helyének meghatározása a technológiai sorban	67
4.3.	Optimális teljesítményfelvételhez tartozó kúpszög meghatározása	70
4.4.	Huzalhőmérséklet felső korlátja	72
5.	Komplex optimalizálás.....	73
5.1.	Komplex optimumok meghatározása a fokozatonkénti kúpszög választás függvényében	73
5.2.	Szoftverfejlesztés	80
5.3.	A komplex optimumok összevetése	87
6.	Összefoglalás és a kapott eredmények felhasználhatósága	92
7.	Summary	94
8.	Tézisek.....	98
9.	Irodalomjegyzék.....	103
10.	Az alkalmazott főbb jelölések összefoglalása.....	107

1. Bevezetés

A huzalgyártás napjainkban is nélkülözhetetlen része a világ termelőiparának. 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 rézötvözet 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 negyedikként Gustav Wolf Miskolci Drótgár 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 gyártóeljárása a húzás, mellyel méretpontos, kiváló felületi minőségű termék készíthető. A többi (profilos hengerlés, kovácsolás) gyártási módszerhez képest olcsó és termelékeny, ez az oka, hogy a huzalgyártás legelterjedtebb eljárása a húzás.

A húzott-terméket gyártó cégek, ha fennmaradásukat és fejlődésüket biztosítani akarják, akkor naprakészen 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 termék palettát és a gyártási eljárásokat rendkívül rövid határidővel, előre megjósolhatatlan időpontokban meg kell változtatni. 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 (ami 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.

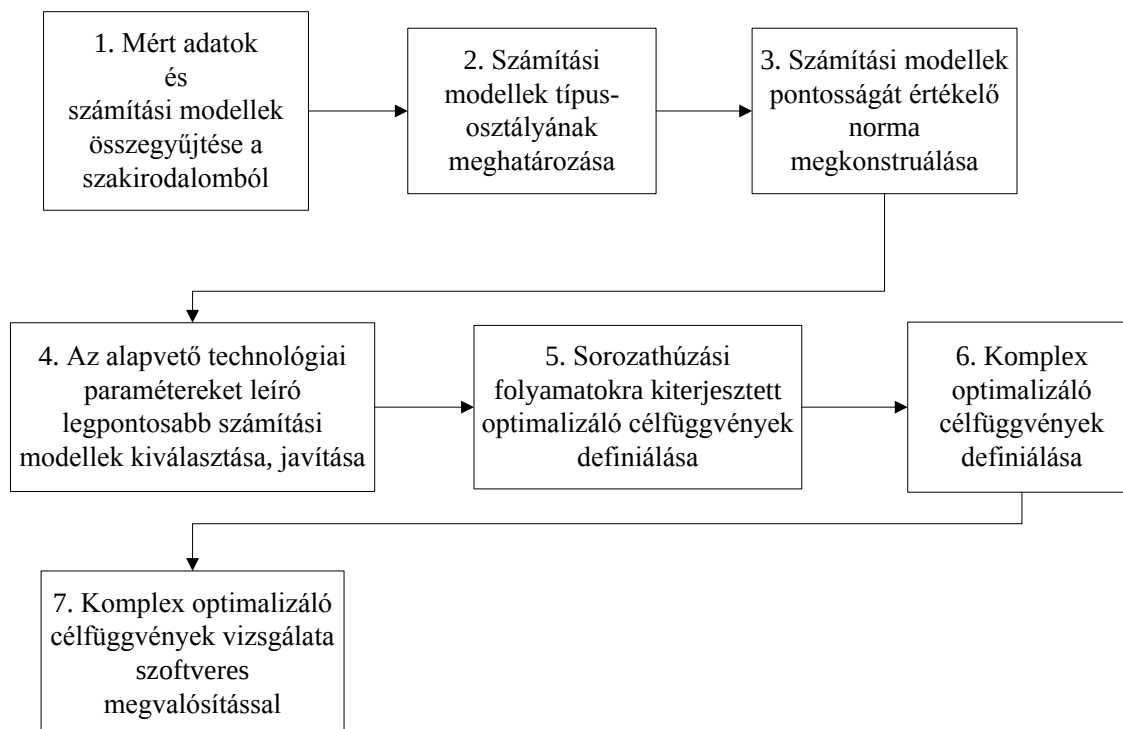
A huzalhúzási technológiai folyamatokkal foglalkozó irodalomban nagyszámban találhatók olyan elméleti munkák is, amelyben a feszültségviszonyokat, húzóerő-igényt, és más paramétereket írják le különféle módokon. **Ebből kifolyólag, munkámban nem egy „n+1-ik” modell felírása volt a célom, hanem a technológiai folyamat egy új,**

globális, ipari környezethez illesztett tervezői szempontból való megközelítése. A huzalhúzás technológia tervezését segítő optimalizáló célfüggvények irodalma már nem rendelkezik a modellekhez fogható számossággal. A legismertebb ezek közül az egy fokozatú húzás esetén az optimális kúpszög megválasztása, mely a minimális húzóerő-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 [1] a húzásra vonatkozó tervezői korlátokat kiterjesztette. Az így kapott húzási „munkaterületet” (a lehetséges és betartandó határgörbéket) 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 legkisebb gyártási költséget eredményező energiateljesítmény-, és termelékenység optimalizálással. Az optimalizáló eljárás kis számítási igényét is biztosítani kívántam, hogy ezáltal az eljárást ipari környezetben is fel lehessen használni, a gyors technológia-tervezést segítve. Az általam megszerzett ismeretanyag alapján kialakítottam egy számítógépes algoritmust, és szoftvert, amelynek segítségével a technológiatervezés kis számítási idő mellett elvégezhető.

Disszertációm az elsőrendű célkitűzés által kijelölt irány alapján az 1. ábrában bemutatott főbb pontok szerint épül fel.



1. ábra. A disszertáció szerkezeti felépítését vázoló folyamatábra.

Munkám első lépése az irodalomkutatás, melynek során összegyűjtöttem az összes számomra hasznos mérési adatokat és számítási modelleket tartalmazó cikket.

Következő lépésben a számítási modellek osztályait szelektáltam annak érdekében, hogy a komplex optimalizáló eljárás tulajdonságai a legkedvezőbbek legyenek. Ezt követően a választott modellekre értelmeztem egy értékelő normát, mellyel a rendelkezésre álló mérési adatok halmazán egy adott módszer pontossága meghatározható.

Ezt követő lépésben a meghatározott modellhalmazból és normákkal kiválasztottam a technológiai paramétereket legpontosabban leíró modelleket. Ezáltal 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 megvizsgáltam. Az elméleti levezetésekben történő módosításokkal javítottam, illetve kiegészítő mérésekkel teljessé tettem a modelleket.

A modellek korrekt definiálásához, illetve a hőmérsékleti adatok számának gyarapításához (melyre vonatkozó kísérletek az irodalomban csak kis számban találhatók) huzalhúzási kísérleteket a ME Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet Képlékenyalakító Laboratóriumában végeztem, vertikális elrendezésű egyfokozatú durvahúzógépen Al99,5 anyagminőségű Properzi durvahuzallal, MOL Fortilmo AWD 150 Special olajjal történő kenéssel. A kísérletekben húzási sebességet (tachodinomóval), a húzóerőt (HBM mérőcellával), és a huzalhőmérsékletet (termoelemes egyedi mérőkonstrukcióval) mértem.

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

Mivel az „irodalmi előzmények” a disszertációm eddig felsorolt pontjainak szerves részei (a komplex modell és az optimalizáló célfüggvények megalkotásában ezen cikkek eredményeit felhasználtam) ezért nem szenteltem nekik külön fejezet, hanem a hivatkozások megjelennek végig - alkalmazásuk szerint - a disszertáció szövegében.

Munkám 6. pontjában huzalhúzás esetén még irodalomban nem publikált optimalizáló célfüggvények: a komplex optimalizáló célfüggvények meghatározása volt 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.

Az utolsó pontban a definiált komplex optimalizáló célfüggvényeket, a komplex modell segítségével szoftveresen megvalósítva, szereztem információt a számítási igényekről és az eredményként kapott optimumok matematikai szerkezetéről.

2. Technológiai áttekintés

A húzási művelet célja olyan kör, vagy alakos keresztmetszetű, méretpontos, valamint kiváló felületi minőségű, és mechanikai tulajdonságokkal rendelkező termék előállítása, amelyet meleg képlékenyalakító eljárással (például hengerléssel vagy kisajtolással) nem lehet gyártani.

A hideghúzás gyűjtőnevé képlékenyalakítás során a kiinduló alapanyagot fokozatosan (rendszerint kúposan) csökkenő keresztmetszetű szerszámon húzzák keresztül, a kilépő szálra gyakorolt erővel. Az előállított termék keresztmetszete, elhanyagolhatóan kis rugalmas alakváltozástól eltekintve, pontosan megegyezik a húzószerszám keresztmetszetével. A készgyártmány általában több egymást követő műveletben (húzási fokozatban) alakul ki. Ezek száma az anyag alakíthatóságától is függ. Ha a húzott anyag alakváltozása elér egy bizonyos mértéket (ezt az alakíthatóság határértékének nevezhetjük), a műveletsort meg kell szakítani és a terméket hőkezeléssel (lágyítás) újra képlékennyé kell tenni, majd következhetnek a további alakváltozási lépések.

A hideghúzási műveleteket – többek között – olyan szempontból is lehet két csoportra osztani, hogy a gyártás „szálban” vagy „tekercsben” történik. Értelemszerűen feltekercselni csak a kisebb és szimmetrikus (legtöbbször kör) keresztmetszetű terméket lehet, sőt, ha az hosszú (és erre az órateljesítmény növelése és a hulladékok csökkentése érdekében), szükséges is ez a minden húzási lépés utáni felcsévélés. Szálban történő alakításkor két egymás utáni művelet közötti úgynevezett közdőben több rész-feladatot kell elvégezni: a szálát vissza kell juttatni a befutó oldalra és esetleg újra kell hegyezni, vagy nagyobb alakváltozás után lágyítani.

A húzóüzemek az alapanyagot rúd-, illetve dróthengerműből, vagy kisajtoló üzemből kaphatják. A huzalhúzás kiinduló anyaga öntve-hengerelt (pl. alumínium-ötvözeteknél Properzi-eljárással) és feltekercselt állapotban is érkezik. A legkényesebb igényeket kielégítő nagy villamos-vezetőképességű rézhuzal alapanyagának gyártása „rákristályosító-alakító” eljárással történik. A rúdhúzás alapanyaga – a hengerlés mellett – kisajtolással is készülhet. Utóbbi a kisebb mennyiségben gyártandó könnyű- és színesfémekre jellemző. Az acélhuzal-gyártás alapanyaga a melegen hengerelt ún. hengerhuzal.

Acélok meleg-hengerlésekor vagy hőkezelésekor a felület oxidálódik: reve képződik. Amennyiben a kemény és rideg reverteget nem távolítják el, az nagyon gyorsan elkoptatja a húzószerszámot. A húzóüzemekbe beszállított alapanyagot ezért alakítás előtt revetlenítik. A húzószerszámban fellépő súrlódás csökkentésére szolgáló kenőanyag jó tapadásának elősegítésére az alapanyag felületén kenőanyag-hordozó réteget hoznak létre. Ez a réteg jól tapad az alapfémhez, durva felületű, porózus szerkezetű, ezért elősegíti a kenőanyag adszorpcióját és a húzórésbe való bejutását. A felület-előkészítés mész-, alkáli-, réz-, bórax- vagy foszfát- kenőanyag hordozó-réteg létrehozásából áll.

A húzással történő alakítást csak úgy lehet elkezdni, illetve az alapanyagot csak úgy lehet a húzószerszámba bevezetni, ha az elejét meghegyezik. A hegyezett huzalhossznak legalább olyan hosszúnak kell lennie, hogy azt átfűzve a húzószerszámon, a behúzó fogóval meg lehessen fogni. A hegyezéshez lehetőleg hidegalakítást kell használni, hogy a huzalvég keményedjen, és rendelkezzen a húzáshoz szükséges erő átviteléhez szükséges szilárdsággal. A hegyezést nagyobb méretek esetén például légkalapácson, kisebb méreteknél körforgó kovácsológéppel,

valamint (a kovácshengerhez hasonló elven működő) hegyező géppel, mely a kerület mentén csökkenő keresztmetszetű kör szelvényű hengerüreggel kialakított hegyező hengerpárral alakítja a rúd-, illetve huzalvéget. A hegyezési műveletet vékony huzaloknál illetve profiloknál, például savba való bemártással is elvégezhetik. Hatszög-, illetve más a körszelvénytől eltérő profilokat marással illetve köszörüléssel hegyezik. Kisebb méretű drótok húzásakor használhatnak elektromos hegyezőgépet: ezek a szálát villamos árammal felhevítik, majd elszakítják. A szakadáskor kontrahált átmérő már befűzhető az alakító szerszámba. Kontrakciós hegyezést kézzel is szoktak végezni, ahol a vékony huzal egy köracélra ráfeszítve, húzó erő hatására elszakad.

A megfelelően előkészített felületű alapanyagot a súrlódás csökkentése érdekében húzáskor kenni kell. A kenőanyagok csökkentik a fémes érintkezést a húzószerszám és a húzott anyag között, ezáltal csökken a kifejtendő húzóerő nagysága, ami energia-megtakarítást, illetve költségcsökkentést jelent, és javul a húzott termék felületi minősége, valamint mérséklődik a szerszámkopás, így hosszabb lesz a szerszám-élettartam. A megfelelő kenéssel elkerülhető a kihúzás jelensége, mikor a húzószerszám percek alatt elkopik, valamint a huzal anyagának a húzószerszám-üregbe való feltapadása is megelőzhető.

A kenőanyag választásánál fontos szempont, hogy jól tapadjon a huzalfelületre, és a kenőanyagra még folytonosságának megszakadása nélkül viselje el az alakváltozást, jó legyen a stabilitása, hőállósága és a hőelvonó képessége, valamint a késztermékről a további felhasználás előtt könnyen eltávolítható legyen. Ezen feltételek teljesülése mellett, a kenőanyagokból a lehető legkisebb nyírószilárdságú választása az optimális. A kenőanyag – a technológia és az anyagminőség függvényében – lehet szilárd halmazállapotú (finom vagy közepes szemcsézettségű sztearát porok), vagy folyékony (emulziók vagy speciális olajok). Utóbbinak hűtőhatása is van, ami a többfokozatú és nagy sebességű berendezéseken szinte nélkülözhetetlen. A szivattyú által megfelelő mennyiségben szállított húzóolaj az olajkiömlő nyílásokon keresztül jut a huzalra. Nagyon fontos a nedves húzási rendszernél a megfelelő kenőanyag-áramlás biztosítása, a megfelelő időben végzett tisztítás, illetve lehetőleg a maximum 60-65 °C üzemi hőmérséklet betartása. A kenőfilm kialakulására és a kenés súrlódáscsökkentő hatására a kenőanyag minősége mellett, az első húzási fokozat előtt felvett kenőanyag mennyisége van döntő befolyással. A további fokozatokban újonnan felvett kenőanyag mennyisége és hatása lényegesen kisebb.

Első húzási fokozatban a hengerhuzal alak- és felülethibáit, valamint a mérettűréseit is figyelembe kell venni, így ott csak kisebb alakváltozást szokás alkalmazni.

A húzószerszámok kör keresztmetszetű fémhuzalok esetén túlnyomó részben csonka-kúp geometriájú alakító-üreggel rendelkeznek. A szerszám dolgozó felületére ható nagy nyomás és a felületén fellépő intenzív súrlódó, koptató hatás és az azzal együtt járó intenzív hőfejlődés a szerszám anyagával szemben speciális igényeket támaszt. Rúdhúzás esetén jellemzően ötvöztetett szerszámacélból, dróthúzógépek esetén a vastagabb méreteknél keményfémből (wolfrámkarbid, titánkarbid és vas, nikkel vagy kobalt kötőanyag), a vékonyabbaknál ipari gyémántból készülnek, megfelelő befogással.

A keményfém szerszámoknál a nagy keménységet a fémkarbidok, míg a vas, nikkel, vagy kobalt tartalom a mag szívósságát, hajlítószilárdságát biztosítják. A keményfém szerszámmagokat vagy (A60, C45, C60 anyagminőségű) acélgyűrűbe foglalva, vagy közvetlen foglalat nélkül készítik. Az utóbbi esetben olyan speciális, szerelhető szerszámkialakításra van szükség, amely a keményfém szerszámmagban megfelelő

radiális előfeszítést tud létrehozni, és így a keményfém húzás közbeni törését, szétrobbanását megakadályozza. A zsugorkötéssel (felmelegített foglalatba helyezve a magot), vagy szerelhető szerszám esetén kúpos, gyorsszorító patronba sajtolással megvalósítható előfeszítés következtében a szerszámmag anyagában nyomófeszültségek ébrednek, amit a keményfém szilárdsági és anyagszerkezeti tulajdonságaiból adódóan képes elviselni. A húzáskor fellépő nagy felületi nyomás okozta „feltágulással” járó tangenciális irányú húzófeszültségek elviselésére a keményfém gyakorlatilag alkalmatlan. A keményfém-mag előfeszítéséről valamilyen formában mindig gondoskodni kell. Az előfeszítés mértékének nagyobbnak kell lennie a huzal alakításából származó, a szerszámmagban ébredő húzófeszültség várható értékénél. A szerszámmag üzem közbeni felmelegszik, miközben a foglalat hideg marad, és a szerszám így kialakuló hőmérséklet eloszlása tovább növeli az előfeszítést.

A használat közben képződő csíkozódások, nagymértékű gyűrűs kopások és az ovalitás a szerszám felújításával (csiszolással, polírozással) megszüntethetők, és ezáltal egy következő, nagyobb méreten történő húzásra alkalmasak lesznek. Egy szerszámot a kifutó átmérőtől függően akár 10-20-szor lehet felújítani a teljes élettartama során.

A megkívánt összes alakváltozás általában egyetlen alakítással nem érhető el. Az egymás után következő alakváltozások húzástervének kialakításakor a fontosabb meghatározó paraméterek:

- anyagminőség,
- kenőanyag minőség,
- a húzószerszám geometriája,
- az alakváltozás nagysága (összes és fokozatonkénti),
- húzási sebesség,
- a húzás erőszükséglete,
- a húzás teljesítményszükséglete,
- hőmérsékleti viszonyok.

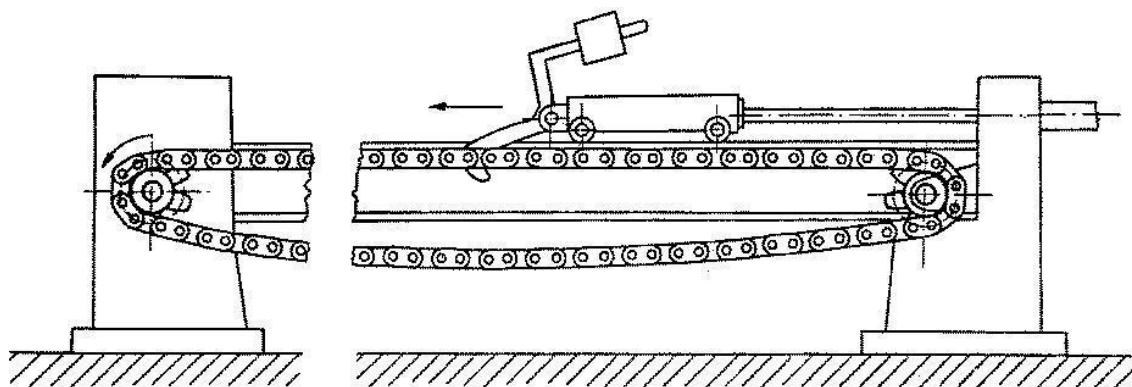
Az anyagminőségtől függően, egy bizonyos mértékű összes keresztmetszet-csökkentésen túl az anyag további alakítást repedés, szakadás nélkül már nem bír el, ezért a húzott anyagot lágyítani kell. Célszerű hőkezelní a húzóműbe beérkező alapanyagot is, az egyenletes mechanikai tulajdonságok biztosítása érdekében. A húzott készterméket – a megrendelés szerint – lágyítják, normalizálják, edzik vagy nemesítik.

A rudakat egyenes vonalú mozgást végző húzópadokon alakítják. Az egyeneses vonalú mozgást hevederes láncsal (Gall-lánc), drótkötéssel, fogaslécsl, hidraulikus hengerrel, vagy különleges kulisszás hajtóművel mozgatott úgynevezett húzószánnal (másképpen: befogó kocslval) valósítják meg. A befogó kocsl megfogja a rúd hegyezett végét és áthúzza a húzószerszámon a rudat teljes hosszában.

A láncos húzópadok legtöbbljén a befogó kocsl vonóhorgát folyamatosan mozgó, végtelenített hevederes láncba akasztják, és ezzel megindul a húzás (2. ábra). A húzás befejezésekor a húzóerő megszűnik, a láncba kapaszkodó vonóhorog tehermentesül, mire a horoghoz tartozó ellensúly kiemeli azt, így a befogó kocsl láncirányú mozgása megszűnik. A befogó kocsl visszafutására több fajta kiépítése létezik a húzópadnak. Az egyik esetben az I-gerendákból álló húzópálya lejtős, a befogó húzókocsl önmagától visszafut a szerszámtartó felé. Gyorsabb visszafutást lehet elérni, ha külön motorral hajtott visszahúzóberendezés van beépítve a húzópadba. A húzószerszámot jellemzően önbeálló betétel építik be a szerszámtartóba, mellyel a termék húzás közbeni

elgörbülését lehet megakadályozni. A korszerű láncos húzópadok teljesítőképességét az alábbi megoldásokkal növelik:

- többrudas húzást alkalmaznak (akár 10 rúd egyidejű húzásával),
- húzási sebességet fokozzák és szabályozzák,
- a rúd megfogást és a horogbeakasztást automatizálják,
- a rudak gépesített átrakásával a húzópadról a tárolóállványra,
- a szálak elejét pneumatikus vagy hidraulikus betoló berendezéssel juttatják be a húzószerszámba, ami feleslegessé teszi a szálvégek előzetes (külön munkamenetben történő) hegyezését.



2. ábra. Vonóláncba akasztható kocsival működő láncos húzópad elve.[2]

A fogasléces húzópad esetében a pályán mindkét irányba lehet húzni, ezáltal a befogó húzókocsi teljes mozgási ideje hasznos munkára fordítható. A fogaskerék-hajtással mozgatott fogasléchez kapcsolódó húzókocsiba a befogópofák mindkét oldalán be vannak építve. A húzószerszámtartó a kiegészítő hegyező marófejekkel a gépen mindig párosan fordul elő.

A drótkötéllel működtetett korszerű húzópadokat nagy húzóerő kifejtésekor alkalmazzák.

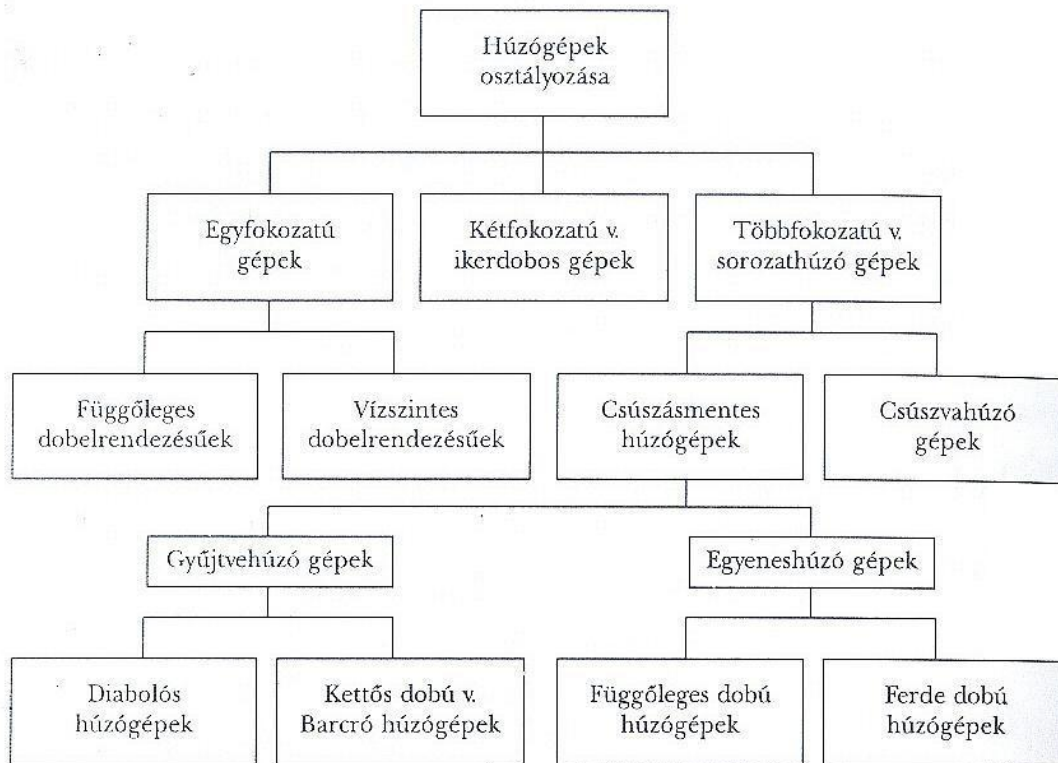
A hidraulikus húzópadokon a húzókocsit két, párhuzamosan elhelyezett olajnyomással működtetett kéthatású dugattyú mozgatja. Az olajhidraulikus rendszer lehetővé teszi a húzási sebesség finom szabályozását. A hidraulikus húzópad előnye a láncos húzópadokkal szemben a kocsi sima, egyenletes futása. A padot ezen kívül erőmérővel szokták felszerelni. A húzókocsi visszafutását a visszahúzó szeleppel szabályozzák. A visszahúzó sebesség a húzási sebesség többszöröse. Tekercselt termékek, a kocsi átalakításával, előzetes feldarabolás nélkül folyamatosan húzhatók.

Olyan konstrukciók is léteznek, amelyek kiinduló anyaga feltekercselt állapotban érkezik a hengerműből. Ilyen például a Schumag-féle húzógép, ahol a rudat tekercsből folyamatosan húzzák. A tekercselt előterméket különleges fogókkal felszerelt, egymást váltó két húzópofa húzza, melyek egymással mindig ellentétes irányban mozognak. Ezek kulisszás hajtásuk révén egymástól átveszik a szálát. A gépsor alakítás után fotocellás vezérléssel az előírt méretre darabol, egyenget és políroz is. A tekercsből való húzás eredményeként a gép mellékidői nagyon csekélyek [2].

A húzási hosszúság növelhető, és a fajlagos hegyezési veszteség nagymértékben csökkenthető, ha a húzott termék egy dobra felcsévélődik. Az ilyen terméket jellemzően huzalnak vagy drótnak nevezik. A kis átmérőjű huzalokat végig felcsévélve alakítják.

A húzópadokat és a forgódobos húzógépeket összehasonlítva elmondható, hogy a láncos húzópadok húzási sebességét kb. 60 m/min fölé emelni nem gazdaságos, mert a

közidőket már nem lehet tovább csökkenteni. A forgódobos húzógépeknél a húzási sebesség tovább növelhető, és a befutó tekercs méretének növelésével a közidők is csökkenthetők. Végeredményben elmondható, hogy a dobra történő termelés termelékenyebb.



3. ábra. A forgódobos húzógépek osztályozása.[3]

A jellemzően a maximálisan 10-15mm átmérőjű huzalok húzását forgódobos húzógépekkel végzik, melyeknek típuscsaládja igen szerteágazó (3. ábra). Az igen sokféle típus osztályozását a következőkben ismertetem.

A húzó gép fokozat-száma alapján megkülönböztetnek:

- egyfokozatú húzógépet (ezeken a nagyobb átmérőjű huzalokat alakítják),
- kétfokozatú (ikerdobos) húzógépet,
- többfokozatú (sorozat-) húzógépet.

A húzó gép konstrukciója, működési elve alapján tovább lehet osztani ezen típusokat. Egyfokozatú húzógépek alosztályai:

- vízszintes tengelyű (horizontális) húzódobos,
- függőleges tengelyű (vertikális) húzódobos (4. ábra).

Többfokozatú húzógépek alosztályai:

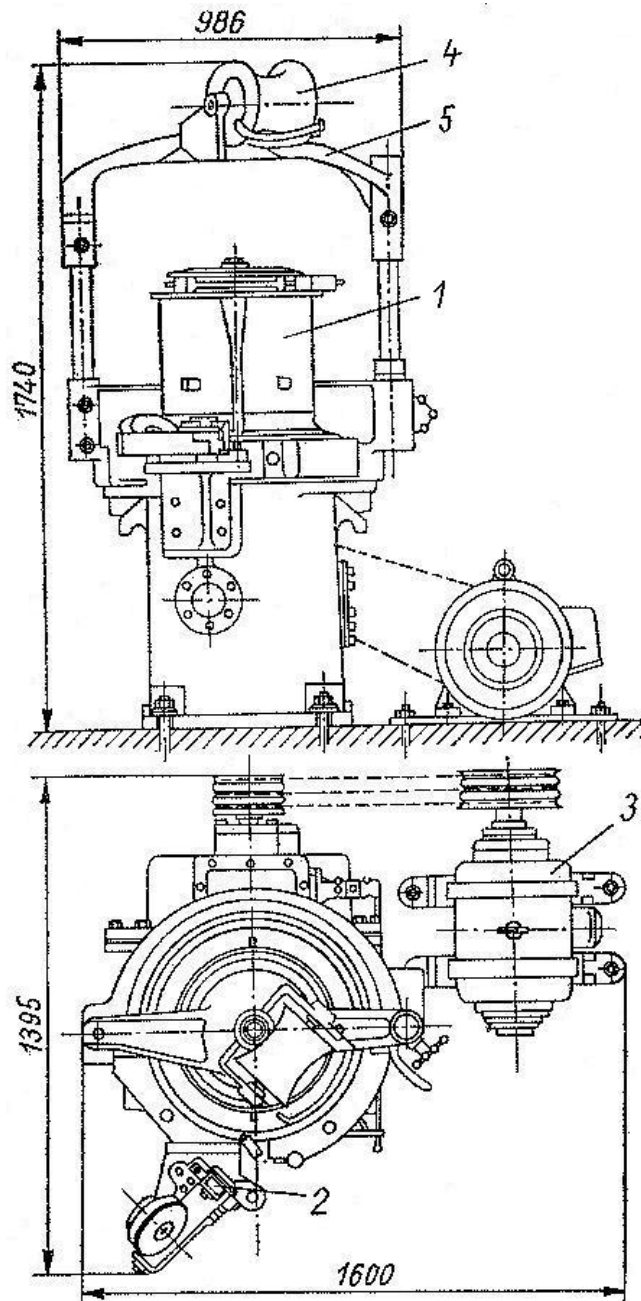
- csúszásmentesen húzógépek,
- csúszvahúzó gépek.

Csúszásmentesen húzógépeket tovább lehet osztani:

- gyűjtvehúzó gépekre,
- egyenes húzó gépekre.

A húzógépeket a kész huzal átmérője szerint is osztályozhatjuk:

- durvahúzógépek: 4,2...16 mm-es huzalok húzása; ezek a gépek általában egyfokozatúak,



4. ábra. Vertikális egyfokozatú durvahúzógép [2].

Az (1) húzódob, (2) húzógyűrű-tartó, (3) motor, (4) huzal átvzető, leszedő görgő (diaboló), (5) konzol. A húzódobot a motor ékszíjhajtáson és fogaskerék hajtóművön keresztül forgatja.

- középhúzógépek: 1,6...4,2 mm-es huzalok gyártása; ezek több fokozatban és általában csúszásmentesen húzó gépek,

- finomhúzógépek: 0,5...1,6 mm-es huzalok húzásához; többfokozatú csúszvahúzógépek,
- hajszálhúzógépek: 0,5 mm-nél kisebb átmérőjű huzalok húzásához; többfokozatú csúszvahúzógépek.

Az egyfokozatú húzógép a legrégebben elterjedt egyszerű gépforma, egyedi villamos meghajtással. A húzódob tengelyének helyzete szerint függőleges és vízszintes elrendezés használatos. Az egyfokozatú húzógépek közös jellemzője, hogy csúszásmentesen húznak, ami azt jelenti, hogy a huzal a dobon nem csúszik, és a huzalkarika a felcsévélő dobon mindig több menetben fekszik.

Hátránya, hogy nagyok a gépek kiszolgálásához szükséges mellékidők. A legnagyobb leadási sebesség 2 m/s körüli, így a gép termelékenysége kicsi. Előnye, hogy a programváltás rugalmas. A húzott termék durva- vagy középhuzal lehet. A húzódobnak speciális profilja van. A dobon a huzalt egy perem vezeti rá az alsó kúpos részre, amelynek a félkúpszöge a húzott drót mérete szerint 2...4 fok. Így a folyamatosan képződő huzalmenetek a már felcsavarodott drótot mindig feljebb tolják. Viszont 0,2...0,3 mm-nél vékonyabb drótot nem lehet kúpos húzódobra felcsévelni, mert a huzal összegubancolódik és elszakad. Az öntöttvasból készített dobok dolgozó felületét a kopás csökkentésére 30...100 mm hosszúságban 220...250 HB keménységűre kérgesítik. Lehetnek száraz- vagy folyadékkenésűek.

A kétfokozatú (ikerdobos) húzógépek függőleges dobrendezésű lépcsős kialakítású húzógépek. Az alsó dob a kisebb, a felső a nagyobb átmérőjű. Olyan speciális termékek nagy volumenű gyártására alkalmas, melyeknél a húzásszám egy vagy kettő. A géphez általában a hengerhuzal felületén található reve eltávolítására alkalmas mechanikus revétlenítő tartozik. Legtöbbször szárazhúzó, de lehetnek folyadékkenésűek is.

A sorozathúzógépeken a huzalt folyamatosan, több egymást követő húzószerszámon folyamatosan húzzák át. A fokozatok száma általában 2-től 25-ig terjed. A többfokozatú húzógépek készülhetnek közös blokkban, vagy az építőszekrény-elv alapján egyfokozatú egységekből összerakhatóan (5. ábra). A húzódobok hajtása lehet csoportos, egy közös villamos motorral áttételeken keresztül vagy egyedi, külön-külön villamos motorral [2, 3].

A csúszásmentesen húzógépek: durva- és középhúzógép – vertikális - egységekből (blokkokból) épülnek fel. Nagy átmérőtartományban dolgoznak. A huzalt egyik egységből a másikba például a húzódob felső részén elhelyezett hiperboloid felületű leszedő görgőn (diaboló) és átvezető terelőtárcsán keresztül vezetik. A húzódobon legalább annyi menetnek kell lennie, hogy a dob és a huzal közötti súrlódási erő ($F_{s,i}$) a szükséges F_i húzóerőt biztosítsa (használt jelölések jegyzéke a 10. fejezetben):

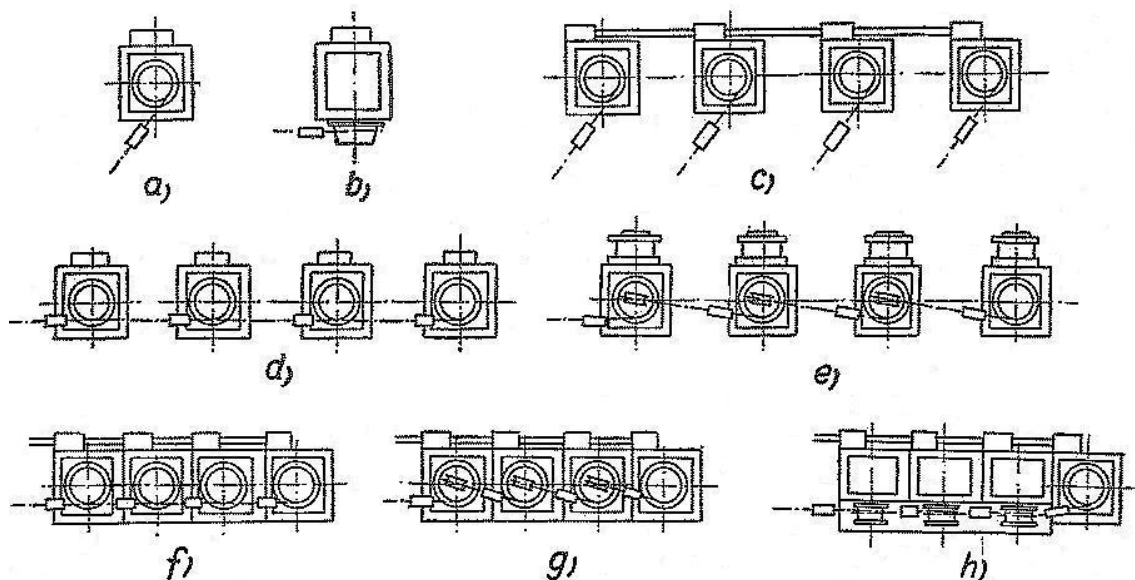
$$F_{s,i} = F_{Ellen,i+1} e^{2\pi n_{dob} \mu_{dob}} \geq F_i \quad (1)$$

ahol $F_{Ellen,i+1}$ a lecsévélő huzalágban levő feszítőerő, n húzódobon lévő menetszám, μ_{dob} a dob és a huzal közötti súrlódási tényező.

A gyűjtvehúzó gépek alosztályába tartozó berendezések egyes fokozataiban a húzódobok kerületi sebességét úgy választják meg, hogy a fogyástervből (az egymást követő alakváltozások nagyságából) és a folytonossági feltételből kiszámítható huzalsebességnél 5...10%-kal kisebb legyen:

$$v_i = \frac{1}{1,05 \dots 1,1} v_{i-1} \frac{A_{i-1}}{A_i} \quad (2)$$

ahol i a húzási fokozat sorszámát, v a dob kerületi sebességét jelöli.



5. ábra. Különálló egységekből összeállított csúszásmentesen húzógépek variációs lehetőségei: a) egyetlen függőleges, b) egyetlen vízszintes egységből álló egyszeres húzógép, c) egyszeres húzógépsor, d) és e) külön egységekből álló többszörös húzógépsor, f) és g) csoportos hajtású többszörösen húzó blokk függőleges, vagy h) vízszintes dobokkal.[2]

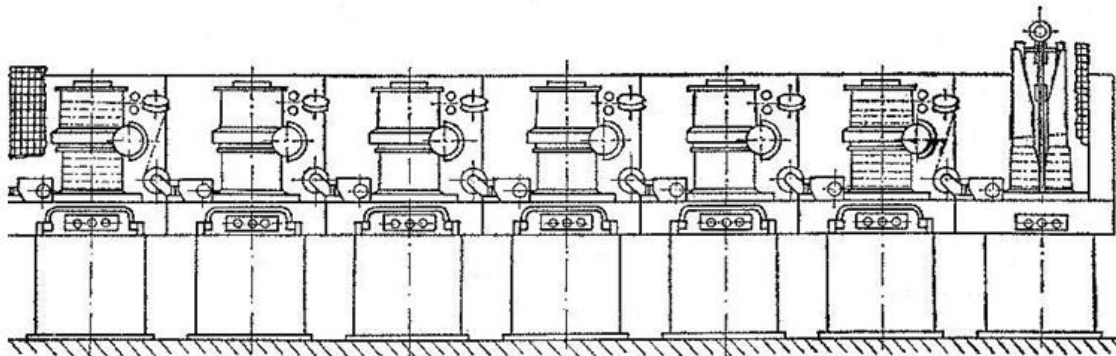
A húzódobokat automatikus gyűjtésellenőrzővel szerelik fel, amely meghatározott menetszám elérésekor a túltöltődött dobot leállítja, az ezt követő fokozatok azonban tovább dolgoznak, és a fölösleges huzalmennyiséget lefogyasztják. Ha valamelyik dobon a gyűjtött huzal mennyisége a beállított minimális menetszámmra csökken, az automatika leállítja az utána következő dobot. A gyűjtvehúzó gép hátránya, hogy a dobokon fekvő huzal növeli a forgó tömegeket, ami különösen a nagysebességű húzáskor hátrányos. Kenésmódjukat tekintve lehetnek száraz vagy folyadékkenésűek is. A gyűjtvehúzó gépeknek két fő típusa van:

- egydobos (diabolós) húzógépek,
- kettős-dobos húzógépek.

Az egydobos (diabolós) húzógépek egydobos egyedi húzóblokkokból vannak összeállítva. A huzalgyűjtés elvéből következik, hogy a húzódobok többet fordulnak, mint ahány huzalmenetet a következő fokozat táplálásához róluk lefejtene. Ennek az a következménye, hogy menetkülönbségenként egy-egy csavarás terheli a huzalt. Legnagyobb mértékű a huzal csavarása akkor, ha a húzódobot leállítjuk, az ezt követő fokozatokban pedig folytatódik a húzás. Ilyenkor minden lefejtett huzalmenetre egy-egy csavarás esik. Ezért ha valamelyik fokozatot leállítjuk, az ezt megelőző valamennyi fokozatot is le kell állítani, mert a huzal túlcsavaródás miatt elszakad.

A kettős-dobos gyűjtvehúzó vagy más néven egyenes-gyűjtvehúzó gépek esetén a húzószerszámból kifutó huzal a hajtótengelyre ékelt húzódobra kerül (6. ábra). Innen egy átvezető tárcsán át jut a felső, szabadon futó leadó dobra. A leadó dobról terelőgörgők vezetnek a huzalt a következő fokozat húzószerszámba. A húzódob és a

leadódob forgásiránya ellentétes. Az átvezető tárcsa mindkét dobon mindig azonos mennyiségű huzalmenetet biztosít, ezért a kettős-dobos gyűjtvehúzó gép torziósmentesen húz, és lehetővé teszi bármely fokozat időleges leállítását. A húzódobokat automatikus gyűjtésszabályozóval szerelik fel. Igen nagy húzási sebesség érhető el rajtuk (10 m/s felett), viszont csak kb. 6 mm-nél kisebb átmérőjű huzalt húzhatnak az átvezető görgők mérete miatt. Az ilyen problémák elkerülése végett az egydobos és a kettős-dobos gyűjtvehúzó gépeket kombinálják a húzósor összeépítésénél.



6. ábra. Kettős-dobos gyűjtvehúzó gép. [2]

Az egyeneshúzó gépek alosztályába tartozó berendezések nagy átmérőtartományban dolgoznak. Viszonylag nagy befutó huzalátmérőtől (16...22 mm) akár 0,8 mm-es készátmérőig le tudják húzni ezek a gépek a terméket. Egy dobon (tárcsán) egyszerre maximum 8-10 menet található üzem közben. Újabb konstrukciókban a tárcsákat az egyenletes kopás érdekében ferdén megdöntik. Az egyeneshúzó gépek csavarásmentesen húznak, ezért ötvöztött acélok és különleges keresztmetszetű huzalok többfokozatú húzására is alkalmasak. Az egyeneshúzó gépek ellenhúzással működnek. A gyűjtés elmaradásának az a következménye, hogy bármely fokozat leállításakor értelemeszerűen valamennyi fokozatot meg kell állítani. Az egyeneshúzó nagy sebességgel dolgoznak. Lehetnek száraz- vagy folyadékkenésűek. A húzótárcsákat egyedileg, egyenáramú vagy csúszógyűrűs váltakozó áramú motorral hajtják, minimum 30%-os fordulatszám-szabályozási lehetőséggel.

A csúszvahúzó gépek esetében két egymást követő húzószerszám között a huzalt húzótárcsa továbbítja úgy, hogy a tárcsán 1...4 huzalmenet fekszik (7. ábra). A húzótárcsa felülete és a huzal közötti súrlódás lehetővé teszi a húzóerő kifejtését. Csúszvahúzó többszörös húzógépeken a dobok kerületi sebessége 8...12%-kal nagyobb, mint a folytonossági feltételből számított sebesség:

$$v_i^{ker} = (1,08...1,12)v_i \quad (3)$$

ahol v^{ker} a dob kerületi sebessége, v a huzal sebessége az i -dik fokozatban.

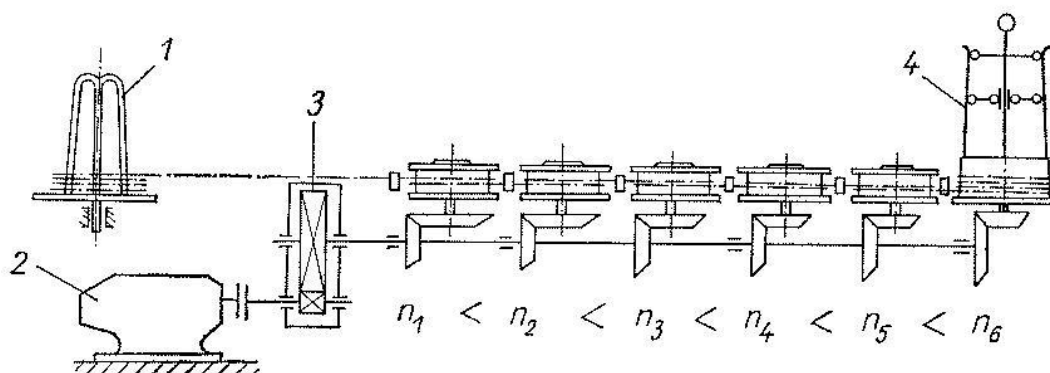
A csúszvahúzó gépek ellenhúzással működnek.

Az ellenhúzóerő nagysága az $i+1$ -dik szerszámban:

$$F_{Ellen,i+1} = \frac{F_i}{e^{2\pi n_{dob,i} \mu_{dob}}} \quad (4)$$

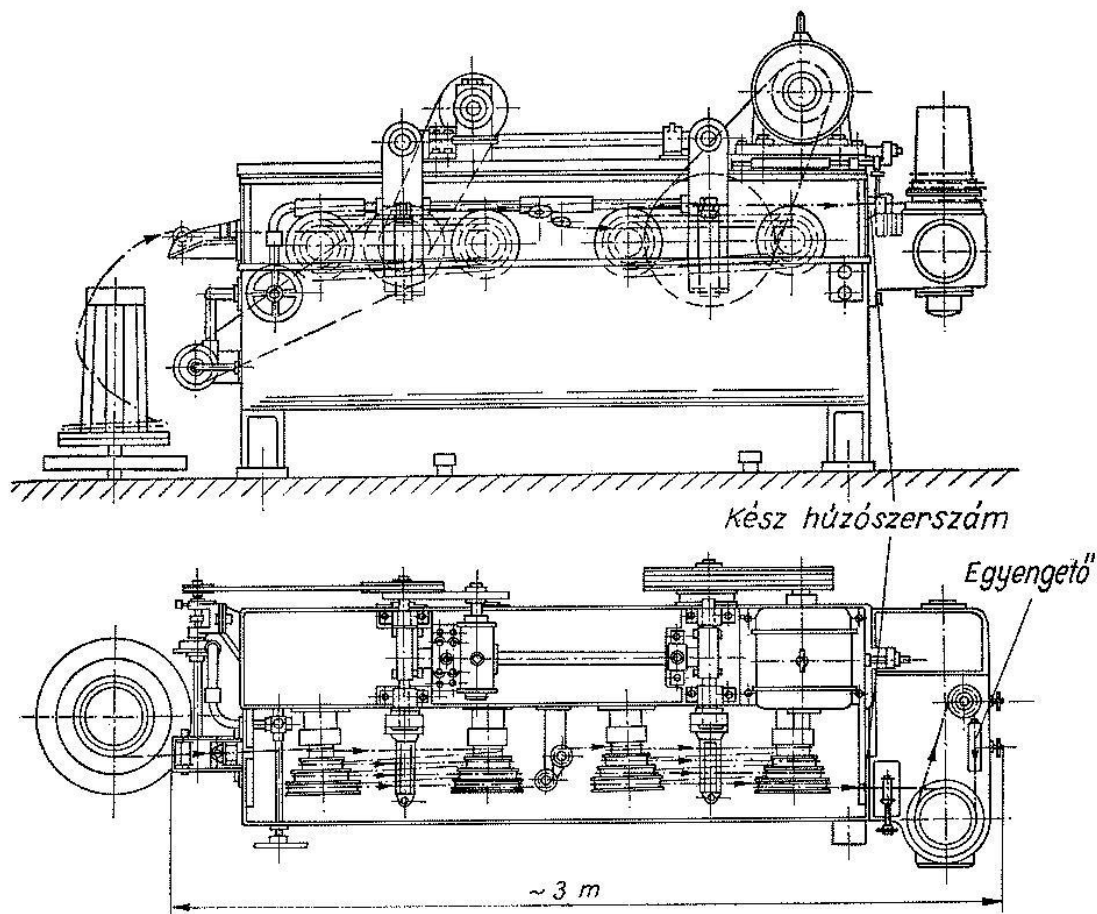
ahol $n_{dob,i}$ az i -dik húzótárcsán lévő huzalmenetek száma, μ a tárcsa és huzal felületi érintkezésénél fellépő súrlódás Coulomb súrlódási tényezője.

Ez az erő szükséges az i -dik szerszámban a F_i húzóerő kifejtéséhez. A gépek működési elvükből adódóan szükségszerűen folyadékkenésűek. A csúszvahúzó gépek vízszintes vagy függőleges tengelyű húzótárcsákkal épülnek, és főként réz-, alumínium- és lágyacél huzalok húzására alkalmasak. Acélok húzására nem alkalmasak, mert a tárcsának a dolgozó felülete erősen kopik, a huzal túlmelegszik, helyenként „besül” és felülete érdessé válik. Ha a huzal mindig ugyanazon a helyen érintkezne a tárcsával, azt gyorsan kikoptatná, ezért olyan szerkezetet használnak, amely a húzószerszámokat ide-oda mozgatja, így a huzalok a tárcsa felületén vándorolnak, a kopás egyenletes lesz. Egyenletes a tárcsák kopása akkor is, ha tengelyük $2...3$ fokos szögben ferdén helyezkedik el. Az ilyen ferde tengelyű tárcsa egész felülete egyenletesen érintkezik a huzallal [2, 3].



7. ábra. Csúszvahúzó sorozathúzógép és hajtásának rajza [2]. A húzásra kerülő huzaltekercset a szabadonfutó (1) tekercstartóra helyezik. A húzódobokat a (2) villamosmotor forgatja hajtómű és kúpfogaskerekek (3) közvetítésével. A készhuzalt az utolsó dobra (4) csévélik. Az egymást követő dobok fordulatszámja növekszik, melyet a kúpfogaskerék-áttétel csökkentésével érnek el.

Az 1 mm-nél vékonyabb huzalokat többnyire lépcsős-tárcsás húzógépeken húzzák (8. ábra). A növekvő huzalsebességet a tárcsák átmérőjének növelésével valósítják meg. A lépcsős tárcsák adott méreteiből következik, hogy a folytonossági feltétel meghatározza a gép fogyási (alakváltozási) tervét. Ettől eltérni csak akkor lehet, ha a tárcsákat cserélik. A húzótárcsák a húzószerszámokkal együtt zárt tartályban kenőanyagba merülnek. A húzószerszámokat közös tartóba építik be. A huzalt a tartók lengetésével mozgatják a húzótárcsákon. Bizonyos vastagságon alul nem lehet a huzalt a készdobra felcsévélni, mert összekuszálódik vagy elszakad. Ezért vékony drótokat orsóra kell csévélni. A húzótárcsák felületének kopása még egyenletesebb, ha a húzószerszámok lengetése mellett a húzótárcsák tengelyeit nem párhuzamosan szerelik. A lépcsős-tárcsás gépeknek általában legfeljebb négy hajtott tengelyük és legfeljebb húsz szerszámuk van.[2]



8. ábra. Lépcső-tárcsás finomhúzó gép. [2]

3. A huzalhúzás paramétereit leíró modell kiválasztása

A hideg-húzás egyik legfontosabb technológiai paramétere: az egyes fokozatokban kifejtendő **húzóerő**. Ezt a teljes képlékeny alakváltozás létrehozásához szükséges erőt a szerszámból kilépő kisebb keresztmetszetű szálban kell kifejtetni. A húzóerő pontos számíthatóságához a huzalban uralkodó feszültségi állapot ismerete szükséges. A húzott fém mechanikai viselkedését legjobban leíró anyagtörvény a rugalmas-képlékeny modell. Ez az elméleti leírás a rugalmas anyagtörvény és a képlékenységtani modell kompozíciójából készült. A képlékenységtani elmélet a rugalmasságtan konklúzióira épül, és a képlékeny folyás megindulását a rugalmas alakváltozás határesetének tekinti, ebből következőleg egy egyszerű összefüggés írható fel az adott pontbeli alakváltozási és feszültségi tenzorok között. A rugalmas alakváltozás igen kicsi a képlékeny (maradó) alakváltozáshoz képest, a húzott termék keresztmetszete igen pontosan megegyezik a húzószerszám legkisebb (kifutó) keresztmetszetével, ha a hengeres kalibráló öv szélességét helyesen választották meg. Ebből kifolyólag látható, hogy a nagy alakváltozások esetén (így huzalhúzás is) önmagában csak a képlékenységtani modellt használó (merev-képlékeny) anyagtörvény kis hibát okoz ugyan a teljes mechanikai modell leírásában, ám a formális leírás szintjén jelentősen egyszerűsödnek az egyenleteink. Merev-képlékeny anyagtörvény szerint, amikor az anyagban a

feszültségi állapot elér egy kritikus mértéket, ott a képlékeny alakváltozás (folyás) megindul. A feszültség kritikus értékét meghatározó összefüggéseket folyási-feltételeknek nevezzük, melyek már számos módon definiáltak az irodalomban (Mohr-Tresca, Huber-Mises-Hencky, stb.).

Egy technológiai alakítási művelet tisztán analitikus leírása azonban legtöbbször rendkívüli (gyakorlatilag megoldhatatlan) nehézségekbe ütközik. Ennek az oka, hogy egy test képlékeny alakváltozása rendkívül komplex jelenség: magának az alakváltozásnak illetve az alakváltozási sebességnek az eloszlása bonyolult eloszlást vehet fel, amely függ az anyag tulajdonságaitól, a kiinduló darab és a szerszám geometriájától, a sebességtől, melegalakítás esetén az alakítási hőmérséklettől, a darab és a szerszám felülete között fellépő súrlódási tényezőtől, szerszám, dolgozó felületének állapotától. Továbbá a fémek az alakváltozás elszenvedésekor keményednek, ami a folyási feltételben szereplő feszültség-felületet megváltoztatja („tágítja”). Ennek eredményeképpen az anyagbeli feszültségviszonyok illetve húzóerő explicit matematikai formulával való leírhatósága tovább nehezedik.

Ezen nehézségek miatt a plaszticitás elmélet az alakító műveletekre csak erős egyszerűsítésekkel alkalmazható, és számítható. Ezeket az egyszerűsítő feltevéseket számos szerző különféle módon tette meg számos képlékenyalakító eljárás esetében. Több szerző a mérések alapján félempirikusan vezette le az egyenleteit vagy empirikusan írta fel a modelljét. A tisztán teoretikus megfontolásokat tartalmazó módszerek három főbb csoportba oszthatók:

- analitikus formulával leírt összefüggéseket eredményező módszerek,
- véges elemes módszerek,
- grafikus, csúszóvonal módszer.

Az analitikus módszereknek viszont két főbb csoportja van:

- explicit, zárt analitikus formulával leírható modell
- implicit, iteratíván számolható analitikus formulával leírható modell.

A két módszer között a legszembevetőbb különbség, hogy az explicit zárt formulával leírható módszerek számítási igénye jelentősebb kisebb az implicit formulákkal leírható módszerekhez képest.

Az analitikus formulával leírható összefüggések jellemzően átlagfeszültség módszerrel vezethetők le. A módszer legfőbb jellemzői, hogy a vonatkoztatási koordináta rendszert úgy választják, hogy a feszültség-, illetve az alakváltozás eloszlás egydimenziósra redukálható legyen, amely irányt úgy választjuk, hogy a csúszatófeszültségek elhanyagolhatóan kicsik legyenek. Ennek érdekében a speciális koordinátarendszerek megválasztása mellett a geometria szimmetriáit és a méretarányok idealizált megválasztását használják ki. A legfontosabb egyszerűsítő feltételezés, hogy az egydimenziós változásra merőlegesen homogén (alakváltozási, feszültségi) mezőket tételezünk fel. További geometriai egyszerűsítések használhatók, illetve közelítő peremfeltételeket alkalmazhatnak a mechanikai modell megadásánál. Az anyagmodellt tovább lehet redukálni, olyan egyszerűsített folyási feltételek használatával, mint a Mohr-Tresca feltétel. További egyszerűsítő feltétel, ha állandó alakítási szilárdságot tételezünk fel az alakítás folyamán.

Az analitikus formulával leírható összefüggéseket az úgynevezett szélsőértéktételek (illetve a törőintenzitás szélsőértéktételei) segítségével is megkaphatjuk. Két típusa van ennek a módszernek. Az egyiknek, amelyet kinematikai tételnek neveznek, két

ekvivalens formalizmusa van: az energetikai, illetve a törőintenzitás felső korlát módszer, melyek egy energetikai, illetve egy törőintenzitás funkcionál minimalizálásán alapulnak [4]. Az energetikai módszer funkcionálja a következő [5]:

$$J = P_{\text{int}} + P_S - P_{\text{Külső}} = \int_V k_f \xi dV + \int_{A_S} \tau |\Delta v| dA_S - \int_{A_T} F_{\text{Külső},j} v_j \quad (5)$$

ahol az első tag a belső (interior) erők teljesítménye, a második tag az ún. szakadó felületi teljesítmény, a harmadik a külső kényszerek teljesítménye. A k_f az alakítási szilárdság, ξ az egyenértékű alakváltozási sebesség, V az alakított anyag térfogata, A_S a szakadó felület, τ a szakadó felületen fellépő nyírófeszültség, Δv a szakadó felületen fellépő irányváltásból adódó sebességváltozás, $F_{\text{Külső},j}$ az j -dik külső kényszererő mely az alakított darabra hat, és v_j a j -dik kényszererőhöz tartozó és azzal megegyező irányú sebesség, A_T a külső felület, melyen a külső kényszerek hatnak.

A módszer a következő lépésekből áll [4, 5]:

- Felveszünk egy, az alakítandó testre vonatkozóan kinematikailag lehetséges képlékeny alakváltozási sebességállapotot (sebességmezőt). A kinematikailag lehetséges sebességmező azt jelenti, hogy a mező eleget tesz a térfogatállandósági vagy kontinuitási feltételnek, és eleget tesz a test felületén a sebességi vagy az elmozdulási peremfeltételnek.
- Feltételezzük, hogy a felvett sebességmező az alakváltozás közben stacionárius marad (időben nem változik).
- A sebességmezőből feszültségtenzort kell számítani az anyagtörvényeknek megfelelően.
- Az összetartozó feszültség, sebesség/alakváltozási sebesség párokból ki lehet számítani a funkcionált.

Annak érdekében, hogy a számítás eredményeképpen egy analitikusan felírható formulát kapjunk, a sebességmezőt egy olyan egyszerű formulával leírható mezőmodellel adjuk meg, amely a ténylegesen megvalósuló alakváltozási sebességállapottól kis mértékben tér el. Ez teljesül az egyszerű geometriájú és jó szimmetriatulajdonságú darabok illetve alakváltozási térrészek esetén, így a húzószerszám-üregre is.

A törőintenzitás felső korlát módszere ekvivalens az előbbieken vázoltakkal, azzal a formai különbséggel, hogy nem közvetlenül az energetikai funkcionál, hanem egy származtatott mennyiség, a törőintenzitás minimumát keressük a sebességmező függvényében. A törőintenzitás lényegében a belső erők és a szakadó felületi teljesítményének a külső kényszerek teljesítményével képzett hányadosa, ahol az adott teljesítmények fenntartják a képlékeny alakváltozást. Több tengelyű feszültségállapotban ez a mennyiség pontosan az alakítási ellenállás és az alakítási szilárdság hányadosát jelenti [4].

A másik szélsőértéktétel a statikai tétel vagy más néven a törőintenzitás alsó korlátja. Az (5) illetve az abból származtatott törőintenzitás funkcionáljának maximumát keressük, de itt első lépésben egy statikailag lehetséges feszültség állapotot veszünk fel. A statikailag lehetséges feszültségmező eleget tesz a test belsejében az egyensúlyi egyenleteknek, eleget tesz a test felületén a feszültségi peremfeltételeknek, és nem sérti meg az anyagtörvényt. Ezután az anyagtörvényből visszafejtjük a sebességmezőt, végül kiszámoljuk az adott (5) funkcionált. Analitikus formulákat itt is csak a valóságot jól közelítő egyszerűen formalizálható feszültségmezővel kaphatunk [4].

Mechanikai modell előállítására a másik igen elterjedt módszer a végeselemes módszer. A kinetikai tételt (energetikai módszert) használják ebben az eljárásban, ám itt az alakítandó testet véges sok térfogat elemre osztják a hálózás műveletével és ezekre végzik el a számításokat. Ebből kifolyólag a módszer eredménye az esetek túlnyomó részében nem analitikus formulával írható le. A peremfeltételekből kiindulva interpolálják a feltételezett sebességmezőt a darabban, majd variációs számítást végeznek a virtuális munka elvének megfelelően. Ekkor a sebességmezőn alkalmaznak egy infinitezimálisan kicsi változást, és vizsgálják a módosítást követően számított virtuális munka nagyságát, melyet az energetikai funkcionálból vezetnek le. Ha tetszőleges módosításra a virtuális munka zérus, akkor az adott sebességmező a feladat megoldása. Természetesen ez a megoldás is közelítő, hiszen az adott interpoláló függvényosztálynak a valóságos sebességmezőt legjobban közelítő tagját kapjuk eredményül.

A harmadik fő csoportba a grafikus, csúszóvonal módszer tartozik. A csúszóvonalak a feszültségmezőt leíró differenciálegyenlet-rendszer megoldásait ábrázoló görbesereg burkológörbéi. A burkológörbék síkban ortogonálisak, és a főirányok irányszögeinek összege pontjaikban változatlan marad. A módszer képlékeny sík alakváltozásra jól kidolgozott, ám a csúszóvonalrendszer megszerkesztése bonyolult eljárás.[4]

A hideg-húzás másik legfontosabb paramétere: a húzóberendezés meghajtásához szükséges **teljesítmény**. A kialakított mechanikai modell és számolt feszültségeloszlás alapján a teljesítmény könnyen számítható. Egy adott berendezés esetén a teljesítményfelvételt az anyagminőség, a méret-tartomány, a húzószerszámok geometriája és száma befolyásolja a legnagyobb mértékben. Természetesen fontos szerepe van a kenőanyag kenőképességnek is, de egy üzemben a bejáratott húzási technológiához alkalmazott, adott kenőanyag esetén a húzószerszámok megfelelő megválasztása eredményezheti a legkedvezőbb teljesítmény kihasználást. Speciálisan csúszvahúzó gépek esetén figyelembe kell venni a tárcsán való súrlódását is a huzalnak, mely tovább növeli a meghajtás teljesítményszükségletét.

Egy további, szintén alapvető paraméter a **hőmérséklet** alakulása. A hőmérséklet modellezéséhez fontos ismernünk az adott alakítás mechanikai modelljét, hogy a hőfejlődést megfelelően számolhassunk. A pontos számítás érdekében azt is figyelembe kell venni, hogy a hőmérsékletváltozás a mechanikai modellen is változtat, mivel az több hőmérsékletfüggő paramétert tartalmaz. A hőmérsékletváltozás modellezésének is két legfontosabb típusa, az analitikus formulákkal leírt és a végeselemes módszer. A hőmérsékletváltozás modellezésénél figyelembe kell venni, hogy annak több oldalról lehet felső korlátja. Egyrészt az anyag oldaláról (esetleg túlzottan lecsökken a kilépő szálaban a folyáshatár, vagy az anyagban annak mechanikai tulajdonságait károsan befolyásoló fémtani folyamatok is megindulhatnak, mint pl. az alakítási öregedés). Másrészt kenőanyag oldaláról (például csökken vagy megszűnik a kenőképessége), és a szerszám oldaláról (túlmelegedés esetén nő a kopásveszély, ráadásul a hőtágulás miatt is változik a kilépő darab mérete). Az elmondottak alapján célszerű, ha a húzási technológiát úgy tervezzük meg, hogy egyúttal biztosítsuk a „hőstabilitást”: mindig a szerszámhűtési (hőelvonási) lehetőségei által megszabott hőmérséklet jusson az érintkező felületen keresztül a szerszámba, biztosítva ezzel a szerszám felületének és a darab felületének közel állandó hőmérsékletét, mivel így a modellezhetőség is egyszerűsödik.

A sorozathúzás esetén a huzalok hűlési ideje kevés ahhoz, hogy a termék hőmérséklete visszacsökkenjen a környezeti értékre, így a modellbe be kell építeni azt a hőt is, ami a két fokozat közötti hőleadási periódus után a huzalban marad.

3.1. Analitikus és végeselemes modellek összevetése

Munkámban a huzalhúzás fentiekben felsorolt legfontosabb paramétereinek modellezését tűztem ki célul. Ehhez első lépésben az adott paramétereket modellező elméleti leírást kell találni. Erre a célra napjainkban a végeselemes (és véges térfogat) módszereket használják túlnyomóan, ám az analitikus egyenleteket tartalmazó modelleknek is széleskörű irodalma van. Az utóbbi modelleknek az előnye a végeselemes modellekkel szemben, hogy a számítás lényegesen kevesebb gépidőt igényel. Ezen túl az egyszerűbb szerkezetű/geometriai felépítésű képlékenyalakítási problémák esetén elvárható, hogy az analitikus explicit függvényekkel számoló eljárások pontossága megegyező (vagy ahhoz nagyon közeli) legyen a végeselemes módszerekkel. Mindez lehetőséget teremt a real-time modellezésre, azaz ipari körülmények között is azonnal tervezhetünk egy technológiát, hirtelen bejövő igényeknek megfelelően.

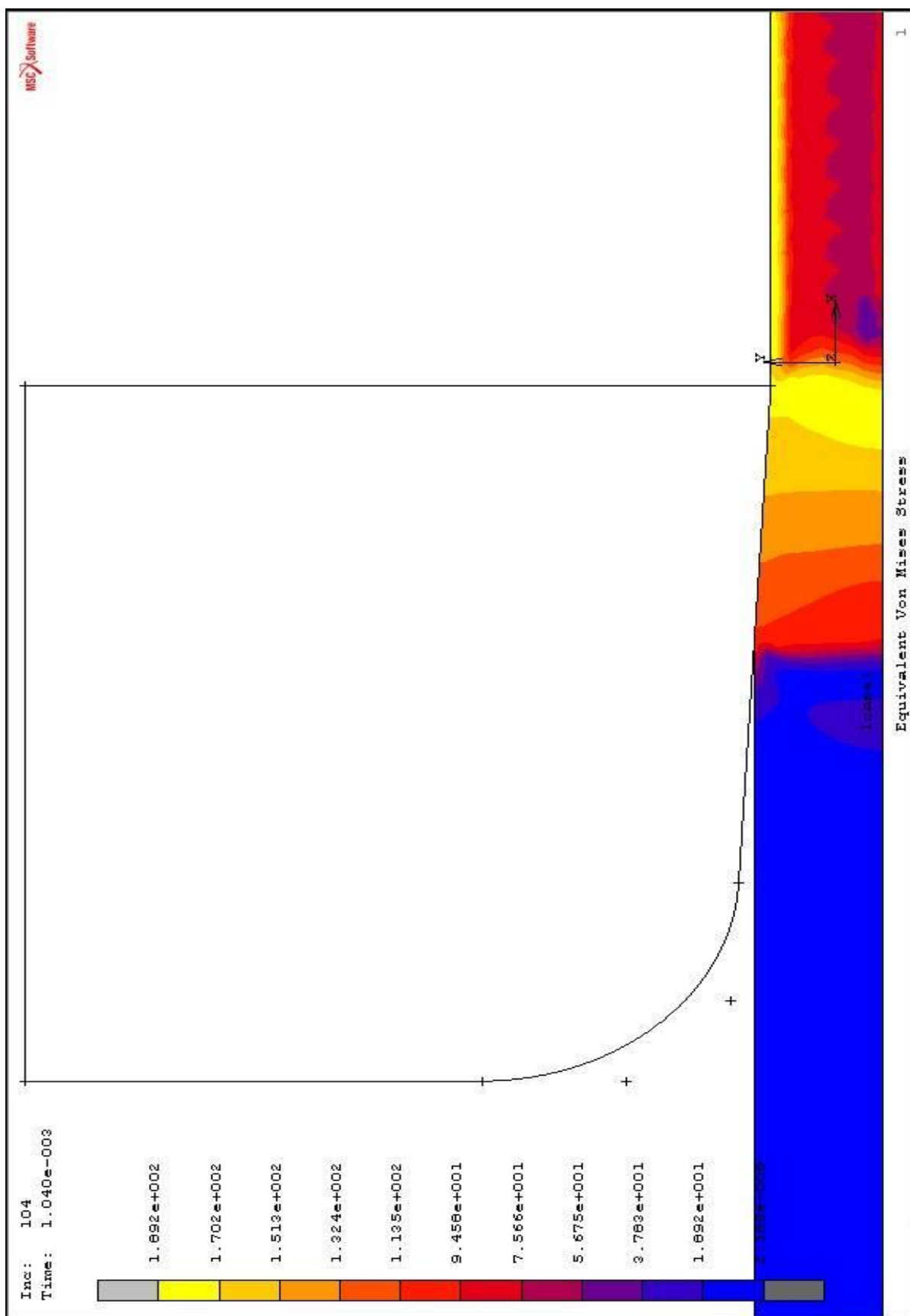
Első feladatként a módszerek pontosságára vonatkozó állítást vizsgáltam meg. A pontosság ellenőrzéséhez azokat az irodalomban talált mérési eredményeket használtam fel, melyeknek a modellezhetőséghez/számíthatósághoz szükséges kísérleti paraméterértékét közölték a szerzők. A megadott paramétereknek köszönhetően mind végeselemes módszerrel, mind analitikus formulával leírt modell segítségével kiszámolhattam az adott kísérleti konfiguráció technológiai paramétereit. A kiszámolt értékeket egymással és a mért adatokkal összevetve fel tudtam mérni a módszerek pontosságát. Egy ilyen összehasonlítást az alábbiakban mutatok be.

A mérést Nistor és Ancău végezte el [6]. A modellezéshez szükséges paraméterek a következők: a súrlódási tényező mindkét esetben $\mu=0,06$, húzási sebesség 2 m/s. A húzószerszám geometriája: kúpszög 6° , kifutó átmérő 2,57 mm. A befutó kör keresztmetszetű huzal átmérője 3 mm. A huzaltermékek acél és réz ötvözet anyagminőségek. A végeselemes modellezést az MSC MARC szoftver segítségével végeztem el. A futtatás eredményeképpen kapott feszültségmezőt a 9. ábra szemlélteti, ahol a (6) Huber-Mises-Hencky féle egyenértékű feszültségértékek egyes szintvonalait/felületeit/ láthatjuk. A legnagyobb egyenértékű feszültségérték 189,2 MPa.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (6)$$

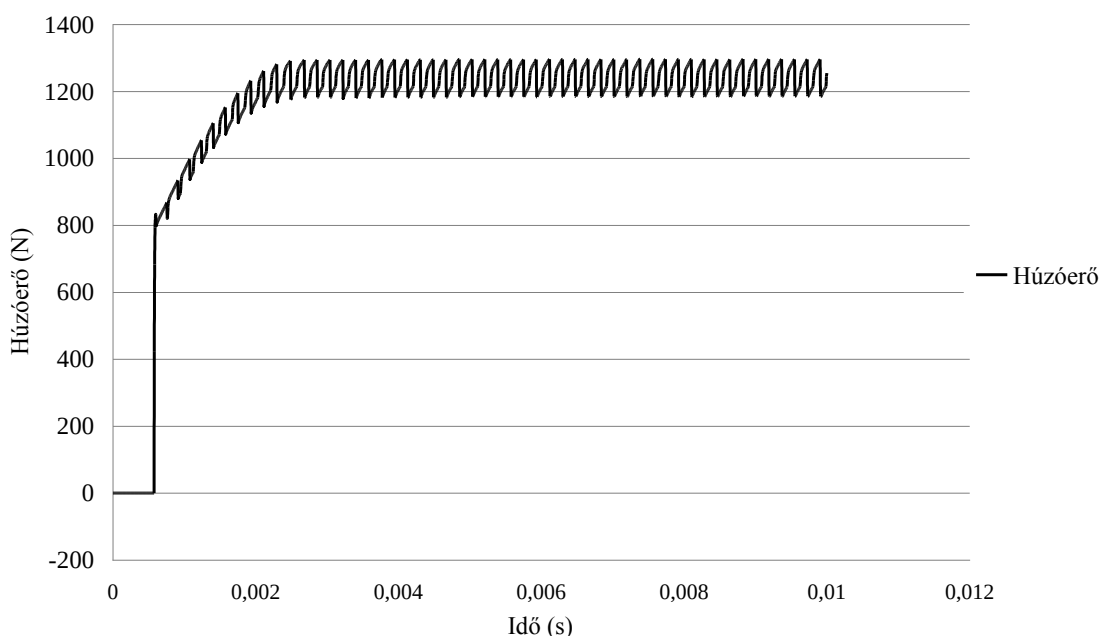
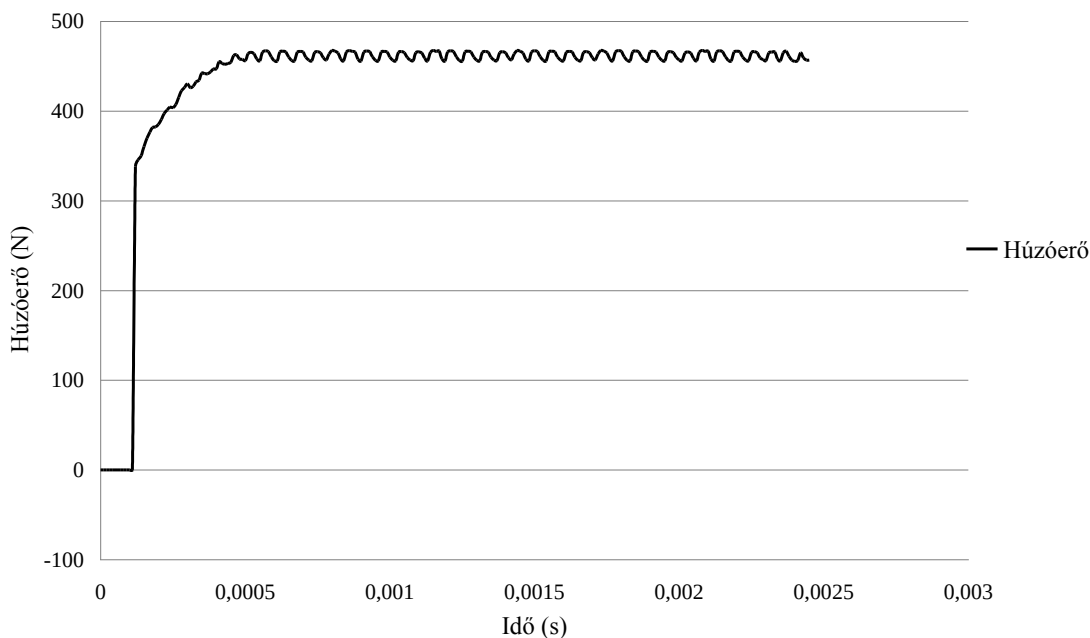
ahol $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ az adott pontban fellépő főfeszültségek.

Analitikus megoldásként a tanszéki hagyományokhoz híven a Geleji-féle állandó alakítási szilárdságot feltételező húzóerő egyenleteket használtam [7]. (Az egyenleteket később közlöm (7,8).) A két módszer összehasonlításához az MSC MARC szoftverből ki kellett nyernem a húzóerő értékeket. Ezeket az értékeket a huzalhúzás elkezdésétől eltelt idő (időlépések) függvényében lehet ábrázolni, mint azt a 10. és a 11. ábrák is mutatják. Látható, hogy az adott szerszámban a húzás elkezdését követő néhány ezred másodperc eltelte után a húzóerő érték állandósul. Az értékek periodikus oszcillációja a számolás pontatlanságából következik, ám a számítást nem érdemes tovább finomítani, mivel nagyon megnöveli a számítási időt,



9. ábra. A húzás kezdete után 104 időlépésben (increment) MSC MARC által számított feszültségállapot a réz huzalban (az egyenértékű feszültség mértékegysége MPa).

amihez képest a pontosság nagyon kis mértékben javul. Igen jó közelítéssel megkapjuk a húzóerő nagyságát, ha az állandósult intervallumban lévő erőértékeket átlagoljuk.



Az átlagolások elvégzésével nyert és az adott kísérleti paraméterek mellett Geleji módszerével meghatározott húzóerőket összevettem a [6] cikkben található mért

erőkkel (1. táblázat). Értelemszerűen a többi szerző analitikus módszerét is összevettem a végeselemes módszer által kapható számított, valamint a mért értékekkel, azonban az értekezés terjedelme miatt csak egy ilyen összehasonlítást közlök, mégpedig azt, amelyeknél ez az egyezés a legjobb volt.

	Mért adatok a [6] cikkben (N)	Analitikus (Geleji) formulával számolt értékek (N)	Végeselemes módszerrel számolt értékek (N)
Réz húzás	376	442,9	460,95
Acél húzás	1003	1225,9	1242,85

1. táblázat. A mért, az analitikus és a végeselemes módszerrel számított húzóerők összehasonlítása.

Az 1. táblázatban látható, hogy a számításokból kapott értékek kis mértékben térnek el egymástól. A néhány százalékos eltérés azt mutatja, hogy a huzalhúzás esetén a két módszer pontossága megegyezőnek mondható. Sőt a jelen vizsgálatomban a Geleji formulákkal számolt értékek némileg jobb közelítést adnak a román szerzők által mért adatokhoz.

Végeredményben elmondhatjuk, hogy a hideghúzási folyamatok leírásának esetén, létezik olyan analitikus – és ami még erősebb állítás: (a gyorsabb kalkulálást lehetővé tevő) zárt explicit analitikus – formulákkal leírható modell, amely a végeselemes módszerekkel közel megegyező pontossággal rendelkezik.

Az egyes képlékenyalakító műveletek technológiai paramétereinek modellezésekor különböző szempontoknak kell eleget tenni. Ezeket a szempontokat az adott elmélet matematikai struktúrájának, a termikus-mechanikai leírás kiinduló és egyszerűsítő feltételezéseinek, az anyagtulajdonságok idealizált egyszerűsítő megadásának, és az így létrehozott modell pontosságának megfelelően tudja teljesíteni. Ilyen elvárt szempont lehet, hogy az adott modell ipari körülmények között is felhasználható legyen, azaz kis számítási igényvel, megbízható eredményt adjon. Másik fontos szempont lehet, hogy az adott modellel a technológiai paraméterek optimalizálása kivitelezhető legyen, az optimum-keresés elvégezhető legyen, akár a már említett ipari körülményeknek megfelelő módon is.

Mint azt előzőekben is láttuk, a pontosság tekintetében elegendő a zárt explicit formulákkal leírható modellek halmazában keresnünk a huzalhúzás paramétereit legjobban leíró modellt. Ez indokolt azért is, mivel a számítási igényükben messze alulmúlják a VEM-et, ezáltal az ipari körülmények feltételeit (a gyors számíthatóság és pontosság) biztosítják az ilyen típusú modellek.

Ezen feltételek mellett kör keresztmetszetű fémhuzalok húzási technológiai paramétereit leíró modellek közül munkám további részében a zárt analitikus explicit formulával leírható módszereket vizsgáltam.

3.2. Húzóerő modell kiválasztása egy-húzásos esetre

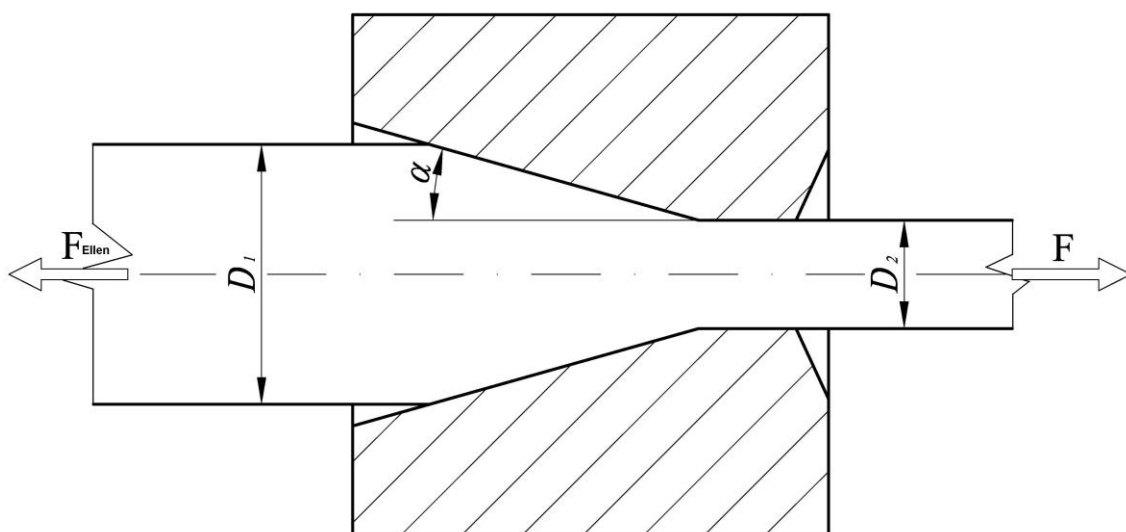
Az alakváltozás létrehozásához szükséges húzóerő nagyságának számítás útján történő meghatározására igen sok szerző publikált – egymástól lényegesen és alapvetően eltérő – zárt formulával leírt matematikai összefüggést.

A megfelelő modell kialakítása során kiterjesztettem a lehetséges megoldások körét az összes általam ismert zárt formulával leírható módszerre. Az előző fejezetben már megmutattam, hogy létezik ezek között legalább egy olyan módszer (Geleji), amely hasonlóan pontos, mint a napjainkban a valóságos mechanikai folyamatokat legjobban megközelítőként elismert végeselemes módszer, így a vizsgálatba bevont megoldások körének bővítésével további pontosságjavulást is várhatok. A szakirodalomban közölt, és egymástól lényegesen eltérő zárt formulával leírható módszereket aszerint, hogy szerzőik a levezetések során a képlékenységtani összefüggéseket milyen idealizált módon és milyen egyszerűsítésekkel írták fel, a kísérleti empirikus eredményeket milyen mértékben építették be – a következő csoportokba sorolhatjuk:

- A kísérleti eredmények alapján kialakított tisztán empirikus összefüggések.
- Félempirikus modellek, ahol elméleti levezetésbe mérési eredményeket vagy azokból kapott interpolált értékeket építenek be.
- A képlékenységtani elmélet alapjaiból célszerű egyszerűsítő feltételek mellett levezetett egyenletek.

A felsorolt három csoportba tartozó összefüggéseket vizsgáltam meg azzal a céllal, hogy kiválasszam, vagy ha szükséges módosítások segítségével megkapjam a hideghúzási folyamatokat leíró és az ébredő húzóerőt legpontosabban leíró modellt.

Első lépésben az egyfokozatú húzáskor fellépő húzóerőt leíró modelleket vizsgáltam. Ebben az esetben nem lép fel ellenőrző a húzószerszám belépő keresztmetszetén az áthúzandó huzalban vagy rúdban, azaz az 12. ábra által bemutatott sematikus rajz jelölése szerint $F_{Ellen}=0$.



12. ábra. A szerszám és a rajta áthúzott termék sematikus rajza a húzási folyamat közben.

Mint azt a technológiai alapok bemutatásánál láthattuk a húzógépek különböző típusainál csúszvahúzó gépek és az egyeneshúzó gépek kivételével ez a helyzet, így nemcsak az egy-húzásos technológiák esetén, de olyan sorozathúzó eljárásoknál, mint a gyűjtvehúzásnál is alkalmazhatók ezek a modellek.

A szakirodalomban történt kutatásom során szám szerint 23 darab különböző egy-húzásos húzóerő-számítási módszer alkalmasságát vizsgáltam meg. Ezek a modellek, melyek mindegyikében a Coulomb súrlódást használják, az alábbiak:

- Geleji modell [7], annak feltételezésével, hogy a húzóüregben az alakítási szilárdságot állandónak tekintjük (annak az átlagos értéket vesszük figyelembe, $k_f = k_{fk}$)

$$F = k_k \cdot \Delta A \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right) + 0,77 \cdot A_2 k_{fk} \cdot \alpha \quad (7)$$

ahol a közepes alakítási ellenállás:

$$k_k = \frac{k_{fk}}{1 + \frac{\Delta A}{2A_2} \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right)} \quad (8)$$

és: $\Delta A = A_1 - A_2$; $A_1 = \frac{D_1 \pi}{4}$; $A_2 = \frac{D_2 \pi}{4}$ a 12. ábra jelölései szerint. A μ a Coulomb-féle súrlódási együttható.

- Geleji modell [8], annak feltételezésével, hogy a húzóüregben az alakítási szilárdságot helytől lineárisan függőnek tekintjük:

$$F = A_2 \left[k_{f2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha + \mu}{\mu} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}} \right\} - \left\{ 2 \cdot (k_{f1} - k_{f2}) \cdot \frac{D_1 - D_2}{D_1 + D_2} + 0,385 \cdot (k_{f1} + k_{f2}) \cdot \alpha \right\} \right] \quad (9)$$

ahol k_{f1} a befutó oldali a k_{f2} a kifutó oldali alakítási szilárdsága a huzal anyagának.

- Sachs modell [9]:

$$F = k_{fk} \cdot A_2 \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] \quad (10)$$

- Sachs-Horn modell [10]:

$$F = k_{fk} \cdot A_2 \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \cdot \ln \frac{A_2}{A_1} \quad (11)$$

- Körber és Eichinger modell [11]:

$$F = k_{fk} \cdot A_2 \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] + 0,77 k_{fk} \cdot A_2 \cdot \alpha \quad (12)$$

- Kalpakjian modell [12]:

$$F = k_{fk} \cdot A_2 \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] + 0,77 k_{fk} \cdot A_2^2 \cdot \alpha^2 \cdot \frac{1}{\Delta A} \quad (13)$$

- Gavrilenko modell [10]:

$$F = k_{fk} \cdot \Delta A \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{tg} \alpha) \quad (14)$$

- Siebel modell [13]:

$$F = k_{fk} \cdot A_2 \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \cdot \ln \frac{A_1}{A_2} + \frac{2}{3} k_{fk} \cdot A_2 \cdot \alpha \quad (15)$$

- Whitton modell [14]:

$$F = k_{fk} A_2 \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] + \frac{2}{3} k_{fk} \cdot A_2 \cdot \alpha^2 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \quad (16)$$

ahol:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_1} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \quad (17)$$

- Csudakov modell [10]:

$$F = R_{\text{Max, közepes}} \cdot A_2 \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}}\right] \quad (18)$$

ahol: $R_{\text{Max, közepes}}$ a huzalanyagnak a szerszámon belüli közepes szakítószilárdsága.

- Perlin modell [15]:

$$F = R_{\text{Max, közepes}} \cdot A_2 \cdot \frac{\mu}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} \cdot \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (19)$$

- Glubkina modell [10]:

$$F = F_1 + F_2 \quad (20)$$

ahol:

$$F_1 = k_{fk} \cdot A_2 \cdot \frac{\Psi + 1}{\Psi} \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\Psi}\right] \quad (21)$$

$$\text{és } \Psi = \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} - 1;$$

$$F_2 = 0,9 \cdot k_{fk} \cdot A_2 \cdot (1 + \mu) \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (22)$$

- Perlina-Zaureva [10]:

$$F = k_{fk} \cdot A_1 \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha^*) \cdot \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (23)$$

ahol:

$$\operatorname{ctg} \alpha^* = \frac{D_1 - D_2 + 2 \cdot l_h \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(D_1 - D_2) \cdot \operatorname{tg} \alpha} \text{ és az } l_h \text{ a kalibráló öv hossza.}$$

- Lueg és Pomp tapasztalati képlete [16]:

$$F = A_2 \cdot (HB) \cdot (0,03 + 0,55 \cdot \Delta A) \quad (24)$$

$$\text{ahol: } HB \approx \frac{R_M}{0,35}.$$

- Kraszilcsikov empirikus képlete acélanyagokra [10]:

$$F = 0,6 \cdot D_1^2 \cdot R_M \cdot \sqrt{\varepsilon} \quad (25)$$

- Avitzur modell, melyet átlagfeszültség módszerrel vezetett le [17]:

$$F = k_{fk} \cdot A_2 \cdot \frac{1 + \frac{\mu}{\tan \alpha}}{\frac{\mu}{\tan \alpha} + \mu \tan \alpha} \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{1 + \frac{\mu}{\tan \alpha}}{1 - \mu \tan \alpha} - 1} \right) \quad (26)$$

- Avitzur modell, melyet az energetikai módszerrel vezetett le [17]:

$$F = \frac{k_{fk} \cdot A_2 \cdot \left(f(\alpha) \cdot \ln \frac{A_1}{A_2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \operatorname{ctg} \alpha \right) + \mu \left(\operatorname{ctg} \alpha \cdot \ln \frac{A_1}{A_2} \left(1 - \frac{1}{2} \ln \frac{A_1}{A_2} \right) + \frac{4l_h}{D_2} \right) \right)}{1 + \frac{4\mu l_h}{D_2}} \quad (27)$$

ahol

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left[1 - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{11 \cdot 12}} \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12}} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}} \right] \quad (28)$$

- Davis-Dokos modell [18]:

$$F = A_2 k_{f1} \left(\left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \left(1 - \left(\frac{n_f}{k_{f1}} \right) \left(\frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \right) + \frac{n_f \varphi}{k_{f1}} \right) \quad (29)$$

- Lippmann és Mahrenholz modell [19]:

$$F = A_2 \left(\frac{1}{3} \tan \alpha (k_{f2} + k_{f1}(1 - \varepsilon)b_0) + k_{f2} \frac{b_0 + 1}{b_0} \left(n_f \varphi + \left(1 - \frac{n_f}{b_0} \right) (1 - (1 - \varepsilon)b_0) \right) \right) \quad (30)$$

ahol a b_0 a súrlódási együtthatónak és a $\tan \alpha$ -nak a függvénye; n_f az alakítási szilárdságnak és a logaritmikus alakváltozásnak a függvénye, $\varphi = \ln(A_1/A_2)$ a logaritmikus alakváltozás.

Fentiekén túl Rojas et. al.[20], A. Haddi et. al. [21] Bacherer-Soliz [22] és Troost [23] modelljeiket is megvizsgáltam. Megállapítottam, hogy ez a négy modell implicit, iteratív számolható módszer. A szerzők olyan paramétereket vezettek be, melyek azonosíthatósága a geometriai és anyagjellemzők alapján nagyon nehézkes. Így a valós húzás elvégzése és mérések alapján történő paraméter-beállítás/visszafejtés nélkül igen nehézé válik a modellezés. Ezzel egy új ipari technológia gyakorlati, előzetes modellezése is lehetetlenné válik. Ezen okok miatt e négy modellel további vizsgálataim során nem foglalkoztam.

A számos modellt az irodalomban megtalálható egyfokozatú húzógépeken elvégzett mérési adatokkal [1, 8, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31] vettem össze. A publikációk felé elvárás volt az, hogy közöljék a kísérleti paramétereket: a húzószerszám geometriai paramétereit, húzási sebességet, súrlódási tényezőt, anyagminőséget (illetve annak anyagjellemzőit). E feltétel mellett az adott modellekből ki lehet számolni a húzóerő nagyságát, amit össze lehet vetni a mért értékekkel, így az adott kísérletre eldönthető volt, hogy milyen egy adott modell pontossága. Továbbiakban egy olyan eljárásra volt szükségem, amely lehetővé teszi, hogy globálisan tudjam értékelni, a kísérleti beállításoktól függetlenül a modellek pontosságát.

A globális összehasonlíthatóság érdekében, az egyes mérési adatokhoz tartozó számolt értékek relatív hibáját vizsgáltam. A relatív hiba jelen esetben megadja, hogy 1 mértékegységnyi mért adathoz képest mekkora a számolt adat eltérése, ezáltal a többi mérési pont esetén kapott értékkel összehasonlítható mennyiséget kapunk. Az ismert, mért adatok halmazához tartozó relatív hibákon értelmezett vektortér normájával az adott számítási módszert globálisan értékelő funkcionálját kapjuk. Az N véges mérési adathoz tartozó relatív hibák megfeleltethetők egy N dimenziós vektortér koordináta vektorának. Mivel ez az n dimenziós V vektortér a valós számok teste felett értelmezett (sőt $V = \mathbf{R}^N$), így a matematika egyik legalapvetőbb normáját a p -normát alkalmaztam az értékelő funkcionál meghatározásához.

A globális értékelés érdekében az 1- és 2-normákat [32] használtam. Ezekből a normákból és az egyes mért adatokra vonatkozó relatív hibából a számítási módszerekre olyan értékelő függvényt határoztam meg, melyekkel tetszőleges paraméterek, illetve mérési körülmények esetén is összevethető az egyes módszerek megbízhatósága.

Így nemcsak az egyes méréseken belül tudjuk általuk eldönteni, hogy ott mi a jósaági/approximációs sorrendje az egyes egyenleteknek, hanem az összes mérésre tudunk egy összesítést készíteni. Ezáltal egy globális döntést tudok hozni, mely során kiválasztom a leghatékonyabb elméleti analitikai leírásait a rúd és huzalhúzásnak.

A két értékelő függvény a következő:

- az abszolút hibanorma:

$$\| \cdot \|_1 = \sum_{j=1}^N \frac{|x_j - y_j|}{N * y_j} \quad (31)$$

ahol x_j : számított adat, y_j : mért adat, N : adatok száma.

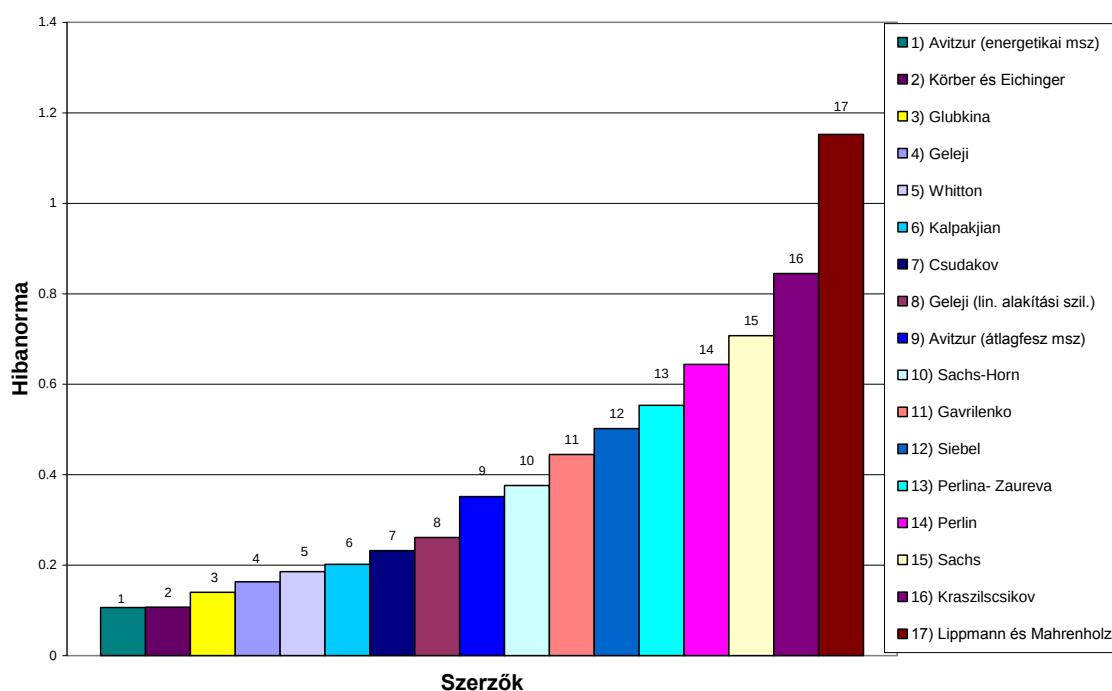
- a kvadratikusan hibanorma:

$$\|y\|_2 = \sqrt{\sum_{j=1}^N \frac{(x_j - y_j)^2}{N \cdot y_j^2}} \quad (32)$$

A két norma között a legfontosabb különbség az, hogy az 1-hibanorma az egész adathalmazra vonatkozó átlagos eltérést (várható értékekét) vizsgálja, mintegy a hibák egyenletes eloszlását feltételezve, addig a 2-hibanorma az egyes individuális, de nagyobb mértékű eltérésekre fókuszál rá (szórás). Tehát míg az 1-hibanorma a modell hibáinak összességére ad értéket, addig a 2-hibanorma erősebben figyelembe veszi és megmutatja, ha vannak egyedi, de nagy eltérések az adathalmazokban.

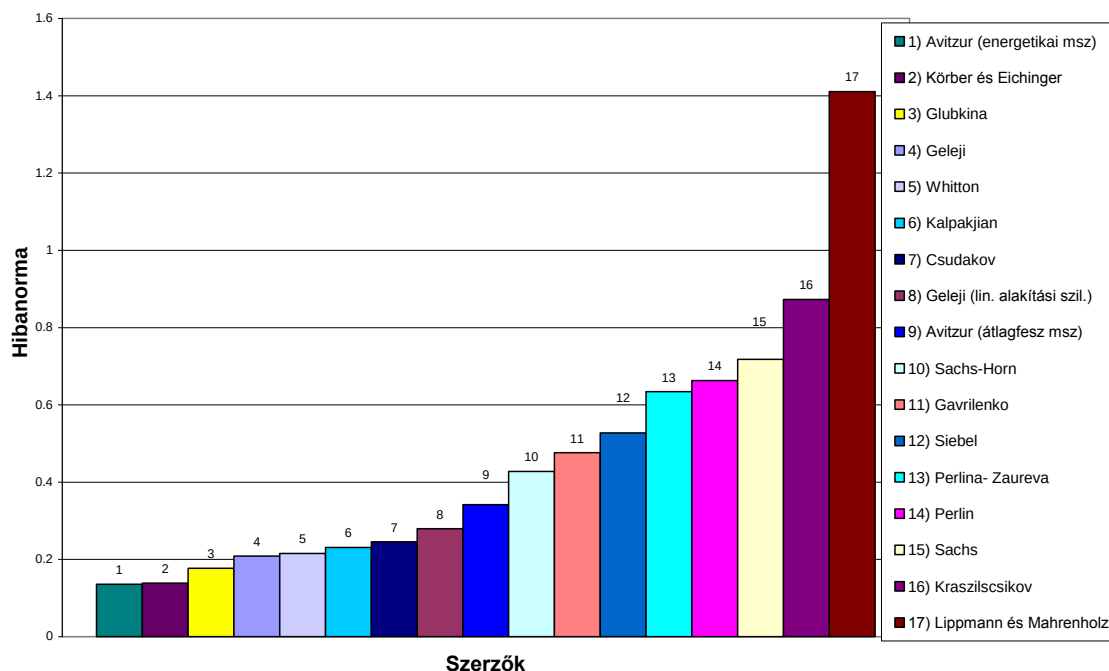
Értelemszerűen, a definiált hibanorma akkor mutatja a legjobb egyezést, ha értéke 0. Ha értéke 1, akkor a mért értékek 100%-val tér el a számítás a valós adatoktól, így egy ilyen elmélet már nem mondható az adott technológiai paraméter jó leírásának. A hasonló termo-mechanikus módszerekkel dolgozó gépészeti számításokra a méretezési zsebkönyvek [33] 0,2-es felső korlátot szabnak meg a jó közelítéssel bíró módszereknek, így itt is ezt a határ fogadtam el a hatékony elméletek meghatározásánál.

Az adott mérések alapján, az egyes modellekre kapott abszolút hibanormák értékeit a 13. ábra, a kvadratikusan hibanormákat pedig 14. ábra mutatja be.



13. ábra. A húzóerőt leíró modellek abszolút hibanormái egy fokozatú húzás esetén.

A hibanormákat bemutató diagramokon nem ábrázoltam Lueg és Pomp tapasztalati képletéhez tartozó eredményt, mivel olyan nagy a hibanormája, hogy a diagramokon nem lehetne érzékelni a többi modell értékei közötti különbséget, illetve mint azt megállapítottam 1 feletti érték esetén már nem mondható az elmélet a húzóerő jó leírásának. Másrészt Davis és Dokos modellje egyes méréseknél negatív erőt számolt, ami huzalhúzás esetén nyilvánvalóan képtelenség, így ezt a modellt elvettem és az erre a modellre vonatkozó értékeket sem jelöltem a diagramokon.



14. ábra. A húzóerőt leíró modellek kvadratikus hibanormái egy fokozatú húzás esetén.

Az eredményekből leolvashatjuk, hogy a tapasztalati képletek eléggé pontatlanul közelítik általános esetben a húzóerő nagyságát. A képlékenységtani elmélet alapjaiból célszerű egyszerűsítő feltételek mellett levezetett analitikus modellek jobban közelítik a mérési eredményeket. Az átlagfeszültség módszer segítségével levezetett modellek közül azok voltak pontosabbak, amelyek a szálhajlítás jelenségét is figyelembe vették. A szálhajlításból vagy más néven a szakadó felületek teljesítményéből adódó erőkomponenst a szerzők több módon formalizálták és adták hozzá a súrlódás és az alakváltozás által generált erőkomponenshez. Jellemzően ezek a modellek 0,3-nál kisebb hibanormával rendelkeznek. A szakadó felületek teljesítménye megjelenik az energetikai módszerekben, így nem okoz különösebben meglepetést, hogy Avitzur energetikai egyenlete az egyik legpontosabb közelítést produkálta.

A gépészeti méretezésre vonatkozó ajánlások [33] összetett feszültségeloszlású szerkezetekre végzett számításokra egy hibahatárt határoznak meg, mely szerint a kalkuláció pontossága jó, ha 10-20% között van a hiba. A 13. ábra értelmezése szerint, ami összhangban van 14. ábra által bemutatott eredménnyel, Avitzur energetikai módszerrel levezetett modellje illetve Körber és Eichinger által leírt egyenletek a legkisebb hibanormával rendelkeznek, így az egy-húzásos folyamatok húzóerejét a lehető legpontosabban írják le. A gépészeti ajánlások szerinti pontosságot Glubkina, Geleji és Whitton modellje is teljesíti, így a hideghúzási technológia tervezéséhez ajánlhatóak, az Avitzur és a Körber-Eichinger módszerekkel együtt.

3.3. Húzóerő modell kiválasztása sorozat húzásos esetre

Az egy-húzási műveletet modellező egyenletek értékelése után a sorozat húzás elméleti leírásait vettem górcső alá. Mint azt az előző fejezetben is kifejtettem, a sorozathúzásnak egyes típusaiban az egy-húzási modellek használhatók, mivel nem lépnek fel ellenhúzóerők a huzalban, miközben áthúzza a gép egy adott szerszámon. Az ilyen technológiával dolgozó berendezések a gyűjtvehúzó gépek osztályába tartoznak.

A csúszvahúzó és az egyeneshúzó berendezések esetében az előző fejezetben leírt modellek nem megfelelőek, hiszen ekkor a huzalanyagban alakításkor ellenhúzóerő is ébred. Alakítás közben a peremfeltételek hatását figyelembe kell venni a feszültség viszonyok leírásánál, mely hatás igen komplex lehet. Az egy-húzásnál használt modellek emiatt nem alkalmazhatók ellenhúzóerő fellépéskor, és azok kiterjesztése erre az általános esetre nem triviális. Az előző fejezetben felsorolt erőszámítási modellek nagy része a szerzőik által ki sem lett terjesztve ellenhúzásos esetre.

Következő lépésként azokat a modelleket vizsgáltam, melyek ki lettek terjesztve ellenhúzás hatásának a kezelésére is. Ezeket a modelleket az irodalomban közölt mérési adatokkal vettem össze, mely eredményeket olyan sorozathúzó berendezéseken regisztrálták, amelyeken ellenhúzás is fellép. Ezen mérésekből már jóval kevesebbet találtam [6, 34, 35, 36], tekintettel a mérés bonyolultságára. Ráadásul a [34] cikk a kísérleti paramétereket hiányosan adta meg, így a benne foglalt mérési eredményeket nem tudtam használni. A többi, használható mérési eredményt a (31) és (32) hibanormák segítségével vettem össze a megfelelően kiterjesztett modellekkel, melyek a következők:

- Avitzur (energetikai módszer) [17]:

$$F = k_{fk} \cdot A_2 \cdot \frac{1 + \frac{\mu}{\tan \alpha}}{\frac{\mu}{\tan \alpha} + \mu \tan \alpha} \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{1 + \frac{\mu}{\tan \alpha}}{1 - \mu \tan \alpha} - 1} \right) + A_2 \cdot \sigma_{Ellen} \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{1 + \frac{\mu}{\tan \alpha}}{1 - \mu \tan \alpha} - 1} \quad (33)$$

ahol σ_{Ellen} az átlagos ellenhúzó feszültség a befutó keresztmetszeten.

- Avitzur (átlagfeszültség módszer) [17]:

$$F = \frac{\sigma_{Ellen} \cdot A_2 + k_{fk} \cdot A_2 \cdot \left(f(\alpha) \cdot \ln \frac{A_1}{A_2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \text{ctg} \alpha \right) \right)}{1 + \frac{4\mu l_h}{D_2}} + \frac{k_{fk} \cdot A_2 \cdot \mu \left(\text{ctg} \alpha \cdot \ln \frac{A_1}{A_2} \left(1 - \frac{\sigma_{Ellen}}{k_{fk}} - \frac{1}{2} \ln \frac{A_1}{A_2} \right) + \frac{4l_h}{D_2} \right)}{1 + \frac{4\mu l_h}{D_2}} \quad (34)$$

- Whitton [14]:

$$F = k_{fk} A_2 \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] + \frac{2}{3} k_{fk} \cdot A_2 \cdot \alpha^2 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + F_{Ellen} (1 - \varepsilon)^{1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha} \quad (35)$$

- Geleji [7]:

$$F = k_{k, Ellen} \cdot \Delta A \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right) + 0,77 \cdot A_2 k_{fk} \cdot \alpha + F_{Ellen} \quad (36)$$

$$k_{k, Ellen} = \frac{k_{fk} (1 - 0,385\alpha) - \sigma_{Ellen}}{1 + \frac{\Delta A}{2A_2} \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right)} \quad (37)$$

- Lippmann és Mahrenholz [19]:

$$F = A_2 \left(\frac{1}{3} \tan \alpha (k_{f2} + k_{f1} (1 - \varepsilon) b_0) + k_{f2} \frac{b_0 + 1}{b_0} \left(n\varphi + \left(1 - \frac{n}{b_0}\right) (1 - (1 - \varepsilon) b_0) \right) + \sigma_{Ellen} (1 - \varepsilon) b_0 \right) \quad (38)$$

- Sachs [9]:

$$F = k_{fk} \cdot A_2 \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] + F_{Ellen} \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha} \quad (39)$$

Az egy-húzásos modellek között a Körber és Eichinger (12) modellje nagyon ígéretes volt, ezért megpróbáltam kiterjeszteni ellenhúzásos esetre. Viszont az ellenhúzóerő hatását a képletbe csak triviálisan tudtam beépíteni, mellyel a következő eredményt kaptam:

- Körber és Eichinger [11]:

$$F = k_{fk} \cdot A_2 \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] + 0,77 k_{fk} \cdot A_2 \cdot \alpha + F_{Ellen} \quad (40)$$

Javítás céljából megvizsgáltam a Geleji egyenletek levezetését is. A levezetés első lépésében a húzóerőt három részre bontja. Ezek: a tiszta alakításváltozási munka létrehozásához szükséges húzóerő, a húzóüreg falán fellépő súrlódási munka elvégzéséhez szükséges húzóerő és az anyag belsejében történő anyagelmozdulások (szálhajlítás) létrehozásához szükséges húzóerő. A szerző a különböző tagokat az átlagfeszültség módszer alapfeltevéseinek megfelelően vezette le. Az első két tagot az alakítási ellenállás függvényében írta le. Ezeknél a számításoknál csak néhány szögfüggvényt egyszerűsített közelítő függvénnyel.

Ezen szögfüggvények figyelembe vételével pontosítottam a Geleji modellt.

Az eredeti levezetés során a szálhajlítást egy nyírási folyamatnak fogta fel a szerző, melyre vonatkozó térfogategységre eső belső munkából kapta ennek az erőkomponensnek a nagyságát. Ezt követően a feszültségi állapot Mohr körökkel történő elemzése után a Tresca-féle folyási feltétellel kifejezte az alakítási ellenállás formuláját explicit módon. Ezt visszahelyettesítve kapta a végső zárt explicit egyenletet, mely már csak az anyagjellemzőktől, súrlódási tényezőtől és a geometriai paraméterektől függ. Bár az átlagfeszítés módszer levezetési lépéseitől eltérőt és egyedi geometriai, algebrai eszközöket használva jutott el a megoldásig a szerző, ezekben a lépésekben minden matematikailag pontosan lett elvégezve, a mechanikai előfeltételeknek és egyszerűsítéseknek megfelelően, így további módosításokat nem tudtam végrehajtani. Az általam módosított Geleji képlet a következő:

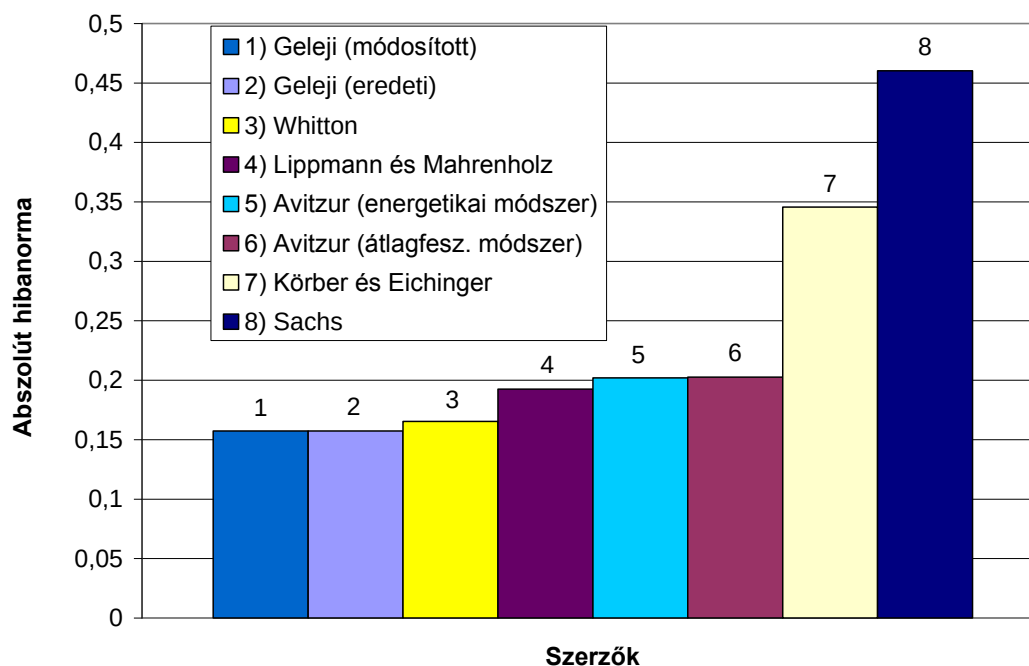
- Módosított Geleji modell:

$$F = k_{k, Ellen} \cdot \Delta A \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\sin \alpha}\right) + 0,77 \cdot A_2 k_{fk} \cdot \alpha + F_{Ellen} \quad (41)$$

$$k_{k, Ellen} = \frac{k_{fk} (1 - 0,385\alpha) - \sigma_{Ellen}}{\cos \alpha + \frac{\Delta A}{2A_2} \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right)} \quad (42)$$

A fenti egyenleteken látható, hogy az eredeti képletbe visszakerültek a szinusz és koszinusz szögfüggvények, melyek Geleji elhanyagolásának köszönhetően egyszerűsödtek a (36,37) egyenletekben.

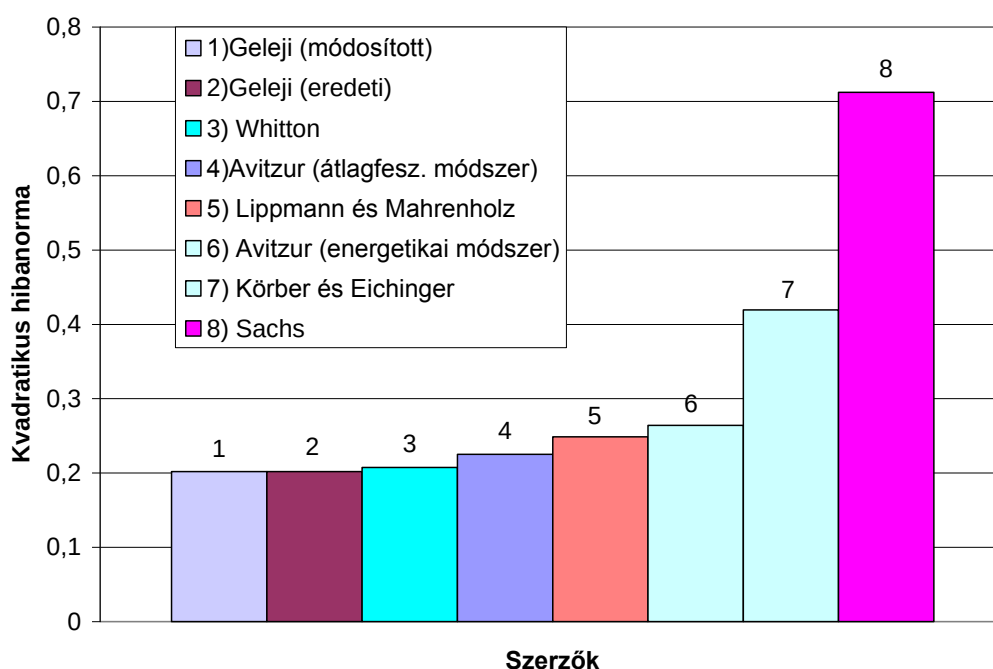
A felsorolt 8 modellt a [6, 35, 36] cikkek mérési eredményeire vonatkoztatva kiértékeltem a hibanormákkal. Az eredmények a 15. és 16. ábrán láthatók



15. ábra. A húzóerőt leíró modellek abszolút hibanormái ellenhúzással történő alakítás esetén.

Az ábrákról azt láthatjuk, hogy a mérési eredményeket legpontosabban a módosított Geleji, a Geleji és a Whitton modell közelíti meg. Jó közelítést ad a Lippmann és Mahrenholz egyenlet illetve az Avitzur modellek is. A két ábráról az is leolvasható, hogy az Avitzur átlagfeszültség módszere egyenletesebben megközelíti a mérési adatokat, míg az energetikai módszer bár jobban közelíti az eredményeket, mégis néhány nagyobb eltérés adódik az értékelés során.

A módosított Geleji modell hibanormája csak két ezreddel kisebb, mint az eredeti Geleji modellé. Ebből látszik, hogy a két módszer pontossága közötti eltérés minimális, lényegében azonosnak mondható. A továbbiakban a módosítás figyelembe vételét nem tartom szükségesnek.

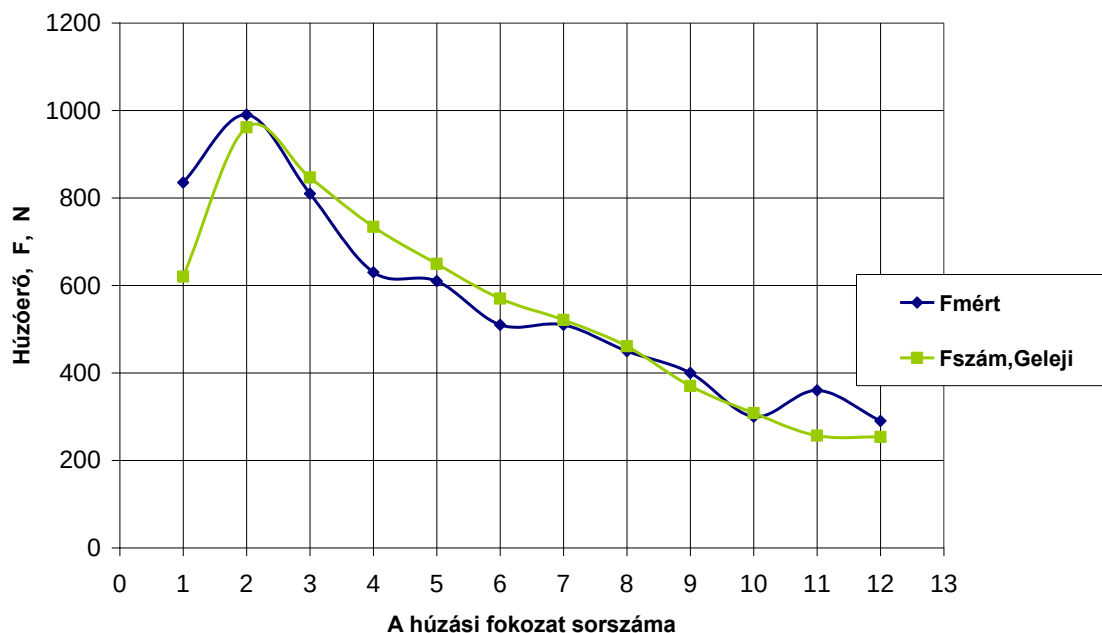


16. ábra. A húzóerőt leíró modellek kvadratikus hibanormái ellenhúzással történő alakítás esetén.

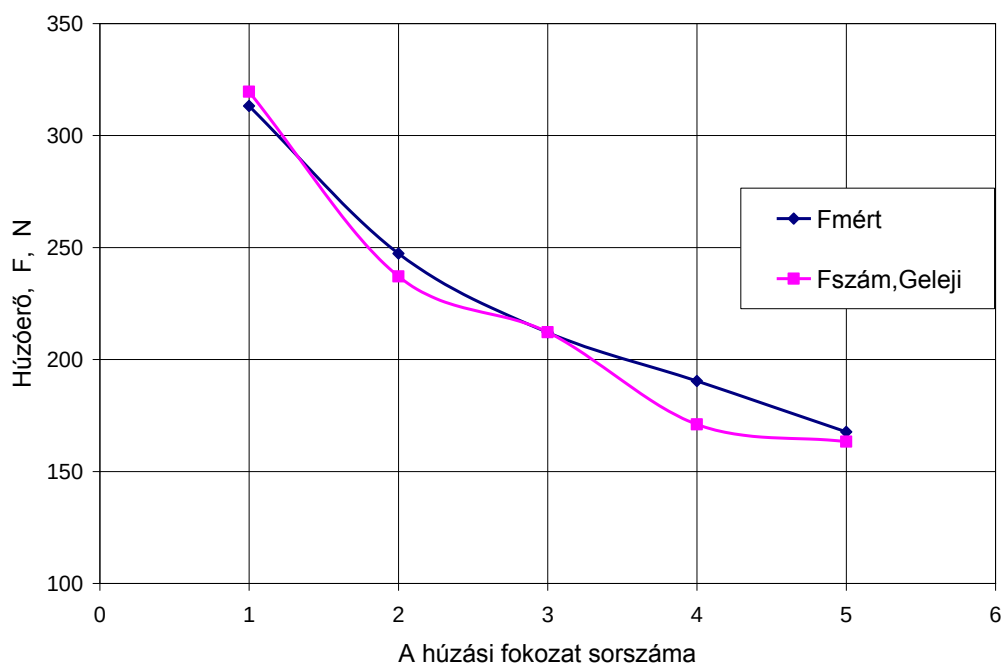
Az elvégzett vizsgálatok alapján beazonosítható a húzási eljárások húzóerő-szükségletét legpontosabban leíró modell. A célom a húzási technológia legszélesebb körű optimalizálása, mely a lehető legáltalánosabb esetben eredményt ad. Ezt szem előtt tartva a továbbiakban a húzóerőt olyan modellel számítom, amely ellenhúzásos esetre is ki van terjesztve. A vizsgálataim alapján a Geleji módszer a legmegfelelőbb a húzóerő tetszőleges húzóberendezésen való modellezésére, hiszen megállapítottuk róla, hogy egy-húzásos esetben jó pontossággal írja le a mért eredményeket, és sorozat húzás esetén a legpontosabb. A hozzá pontosságból a legközelebb lévő Whitton módszernél egy-húzásos és ellenhúzásos esetben is jobb közelítést adott. Ezáltal Geleji egyenletekről elmondható, hogy az ellenhúzó feszültség hatásának közvetlenül az alakítási ellenállásba való beépítése a leghatékonyabb a zárt analitikus formulákkal ellenhúzás esetén is modellező módszerek közül.

A többi módszerhez képest egyedülállóan, a Geleji módszer további nagy előnye, hogy a huzal keresztmetszetében ébredő maximális húzófeszültségre vonatkozóan is megad

egy modellt, melyet a most általam is elfogadott húzóerő-modellből vezetett le. Ezt a modellt részletesebben a következő fejezetben tárgyalom.



17. ábra. A Geleji modellel számított, és mért húzóerők [35] összevetése.
(Húzás $\varnothing 2,02\text{mm}$ -ről $\varnothing 0,77\text{ mm}$ -re 12 fokozatban, húzási végsebesség 1 m/min , anyagminőség: AWS ER70 S-6.)



18. ábra. A Geleji modellel számított, és mért húzóerők [6] összevetése.
(Húzás $\varnothing 3\text{mm}$ -ről $\varnothing 2\text{ mm}$ -re 5 fokozatban. Húzási végsebesség 10 m/s . Anyagminőség: Al99,5)

A 17. és 18. ábrán sorozathúzó berendezésen végzett két kísérletből [6, 35] kapott mért adatokat és a Geleji-féle modellel kalkulált értékeket ábrázoltam. Szembetűnő a jó egyezés, a kis hiba és a nagyon jó trendkövetés, azaz a Geleji módszerrel számolt értékek jól követik a mért adatokat, kirívó eltérés egyik fokozatban sem látható.

Összefoglalásként tehát elmondható, hogy a későbbiekben meghatározandó optimalizációs célfüggvényekkel történő számításokhoz, a valós, mért adatokat legjobban megközelítő és - analitikus mivoltánál fogva - leggyorsabban számoló Geleji féle (36,37) modellt választottam ki húzóerő-számoló módszerként.

3.4. A maximális húzófeszültség modell megkonstruálása

A huzalban ébredő feszültségi állapot egy másik fontos tényezője a keresztmetszeten kifejtett húzóerő mellett, - mely lényegében a kifutó keresztmetszeten ébredő húzófeszültség mezőnek a keresztmetszetre vett integrálja, - a maximális húzófeszültség. Ennek a tényezőnek ismerete nagyon fontos a huzaltermékben fellépő károsodások megelőzésének érdekében.

A húzófeszültség keresztmetszet menti eloszlására azonban igen kevés analitikus leírás található az irodalomban. Az egyik a Siebel-féle megoldás [13], melynek alapfeltevése, hogy a feszültség eloszlás parabolikus jellegű. A Siebel megoldás szerint a legnagyobb feszültségérték a kifutó kör keresztmetszet középpontjában található. Ezt az állítást igazolja az a tény is, hogy a huzal tönkremenetelek (felrepedés, szakadás) a huzal tengelyvonalának pontjaiból indulnak ki. Az analitikus leírásoknál mindenki a Siebel által felvetett parabolikus hipotézist használta. A húzóerő számítására használható modellek közül a Geleji modellt találtam a legpontosabbnak, ezért az általa levezetett parabolikus modellt fogadtam el. Geleji a húzóerő számításánál felírt feszültségmezőt ötvözte Siebel parabolikus megoldásával [41]. Az így kapott maximális feszültségértéket a (43) egyenlet írja le:

$$\sigma_{\max} = k_{k, \text{Ellen}} \left(\frac{\Delta A}{A_{ki}} \right) \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + k_{fk} \alpha \left(1,27 + \frac{A_2}{\Delta A \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right)} \right) + \sigma_{\text{Ellen}} \quad (43)$$

Az összefüggésben a súrlódásból és az alakváltozásból származó feszültségtag megegyezik a Geleji húzóerő egyenletből származtatott feszültséggel. A második additív tag a szálhajlítás által generált tag, melynek formuláját Geleji a Siebel levezetését felhasználva kapta meg.

A maximális feszültséget számító modellre vonatkozó vizsgálataim során azonban szembesültem az alábbi hibával: a (43) egyenlet trendje $\varphi=0,2-0,3$ -as logaritmikus alakváltozás alatt megváltozik, és csökkenő fogyás (alakváltozással) mellett növekvő maximális feszültséget jelez elő, vagyis a számítás szerint ez lépne fel. Teszi ezt a hiperbolikusan minden határon túl növekvően, köszönhetően annak, hogy a Siebel levezetésből kapott tag, mely a szálhajlító erő által generált, a fogyással (alakváltozással) fordítottan arányos elemet tartalmaz.

Ez az eredmény az feltételezi, hogy amint a húzóerő elég kismértékűre csökken, a maximális feszültség növekedni kezd. Az alakváltozás és az átlagos húzófeszültség további csökkentésével a maximális húzófeszültség extrém mértékű lesz. Ezzel együtt a

minimális húzófeszültségnek is extrém nagynak kell lennie ellentétes előjellel, azaz nyomófeszültségként kell jelentkeznie. Az, hogy a húzás közben az alakítási zóna jelentős vastagságú részén a húzás irányában nyomófeszültség lép fel, ellentmond a mérnöki intuíciónak, hiszen itt a folyási feltétel azonnal sérül, és nem történik képlékeny alakváltozás. A modell szerint ez a gyűrű kúppalást alakváltozás képessége nélkül nem tud együtt haladni a huzal többi részével, és mint ahogy a villamos vezetékekről a szigetelést lehúzzák blankoláskor (letisztításkor), úgy kellene leválnia a magrészről. Ha elegendően nagy a felszakadt keresztmetszet, akkor az éppen marad rész a megnövekedett feszültség mező miatt kontrahálna. Ez a jelenség ellentmond az ipari tapasztalatnak.

A valóságban kis alakváltozásoknál, ha megfelelően nagy a szerszám kúpszög, az alakváltozásban részt nem vevő ún. holt anyagrész („holt sarok”), illetve a felületközeli réteg elnyíródás révén történő, forgácsolásszerű leválasztása („hántolás”, angolul: „shaving”) is létre jöhet [37], végül kúposan felszakad a túlterhelt huzal [3]. Ezeknek, a jelenségeknek az oka, hogy már nincs olyan keresztmetszet, amelynek minden pontjában képlékeny alakváltozás menne végbe („az alakítási zóna nem ér össze”). Ezt kompenzálандó az anyag olyan alakváltozási irányokat vesz fel, hogy ne kelljen felszakadnia. A holtsáv esetében a kúpszögtől függetlenül olyan szögben folyik meg az anyag, hogy az alakítási zóna összeérjen. A megmaradt holtsarokban nem történik anyagmozgás, megtapad a szerszámban. Túl nagy szög esetén ez az anyagrész folyamatosan lenyíródik, ami a palást rész lehántolásához vezet.

Vizsgálataim eredményeként arra a következtetésre jutottam, hogy a Geleji-féle maximális húzófeszültség modell hibásan számol, ezért megvizsgáltam annak levezetését. A hibát okozó elemet a Siebel féle levezetésben [13] találtam meg. Siebel képez egy σ_q tagot, amely az anyagban a szálhajlítás hatására létrejövő feszültséget írja le. Ez a tag úgy adódik, hogy a megfelelő - általa Q_s -sel jelölt - erő elosztja azzal a felülettel melyen hat az erő. Ám ez a felület meglátásom szerint alul van becsülve.

A merev- képlékeny modellben egy szakadó felületen történik meg a szálhajlítás, azaz a huzal felületén egy zárt görbén (körön) változtatnak irányt (törnek meg) a szálak. Ám ez a valóságban nem így van, hiszen egy kiválasztott felületi szál, mely hosszirányba fut, nem egy pontban törik meg, hanem van egy kiterjedéssel bíró görbülete, amíg fel nem veszi a szerszám által számára meghatározott irányt. Ez az anyag rugalmas-képlékeny viselkedése miatt van így, mivel ekkor a szálhajlítás már nem a szálak töréspontjai által meghatározott felületen történik, hanem egy 3 dimenziós kiterjedéssel bíró térfogaton. Ez a kiterjedés növeli azt a felületet, amelyre hat a Siebel által felírt Q_s – szálhajlítás munkájából adódó – erő. A felület növekedésének figyelembevételéhez a (43) összefüggés második tagjában szereplő tört nevezőjéhez adtam hozzá egy, a rugalmas hatásra jellemző C -vel jelölt tényezőt. Így nyertem a számításokhoz használható módosított (44) összefüggést.

A rugalmas hatásból származtatható növekmény, akkor is fennmarad, amikor képlékeny alakváltozás 0-vá válik, így kerülve el azt, hogy a maximális húzófeszültség hiperbolikusan minden határon túl növekvővé váljon.

$$\sigma_{\max} = k_{k, Ellen} \left(\frac{\Delta A}{A_{ki}} \right) \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + k_{fk} \alpha \left(1,27 + \frac{A_2}{\Delta A \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + C} \right) + \sigma_{Ellen} \quad (44)$$

ahol C az anyag rugalmasságból adódó növekmény.

A C értékére vonatkozóan nincsen zárt analitikus módon leírható formulánk, így egy olyan egyenlet felírását tűztem ki célul, mely teljesíti az adott modell felé támasztott elvárásokat. Ez a módosítás azért is fontos, mert a hibával terhelt $\varphi < 0,3$ intervallum még jellemzően az iparban is használt alakítási tartományban van. Technológia tervezéskor az eredeti modell emiatt hibás következtetésekre vezet.

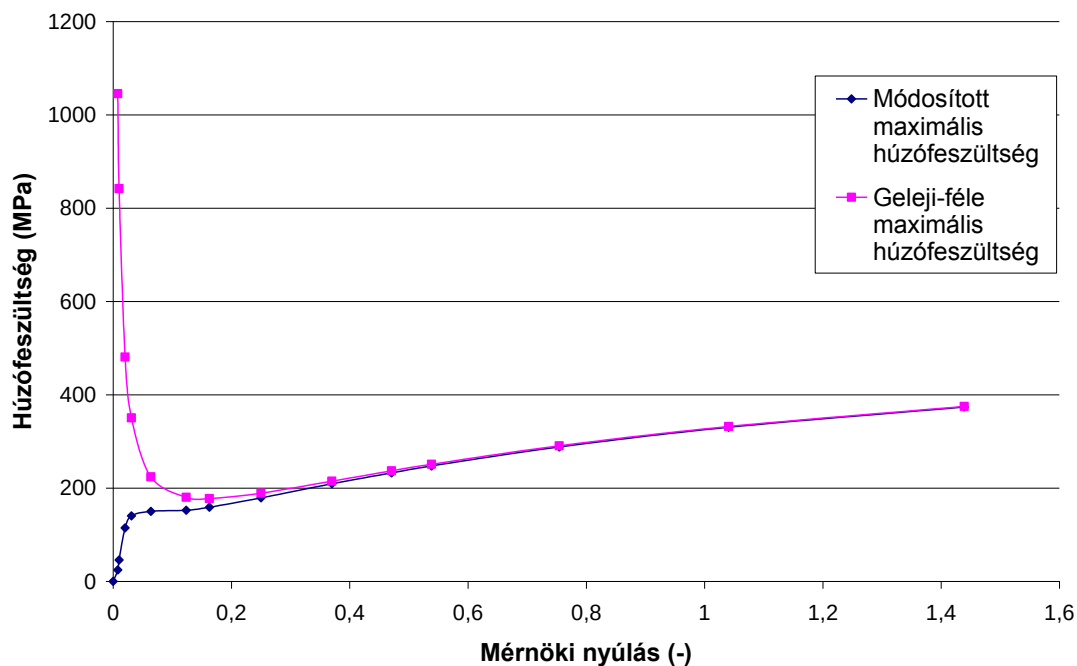
A módosított modellre vonatkozó feltételek a következők:

- folytonos legyen a leíró függvény,
- Geleji-féle függvénybe simuljon bele $\varphi > 0,3$ esetén,
- az alakváltozás 0-ra való csökkenésekor a függvény értéke is tartson 0-ba,
- az alakváltozás egy nagyságrenddel való csökkenését követően az anyag rugalmas tulajdonsága kezdjen el dominálni, ahogy közeledünk az egyezményes folyáshatárhoz tartozó 0,2%-os nyúlás értékhez.

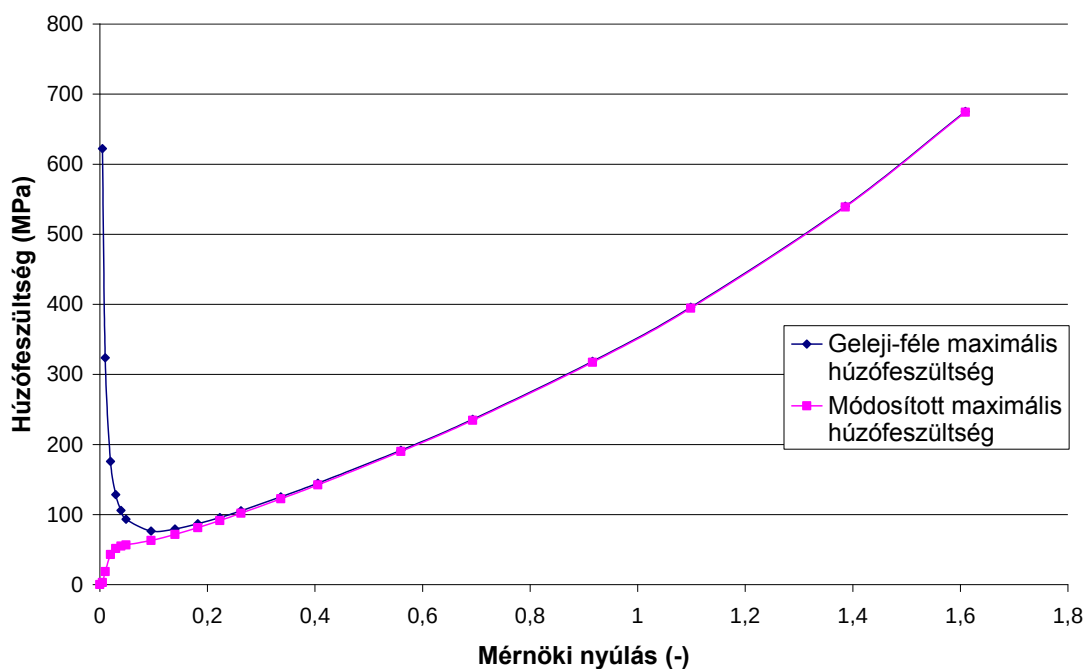
A feltételeket teljesítő maximális feszültséget leíró egyenletem (a levezetés mellőzésével) a következő:

$$\sigma_{\max} = k_{fk} \left((1 - 0,385\alpha) \varepsilon \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \frac{1}{1 + \varepsilon \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right)} + \alpha \left(1,27 + \frac{1}{\varepsilon \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right)} \right) e^{\frac{-0,03}{\varepsilon}} \right) \quad (45)$$

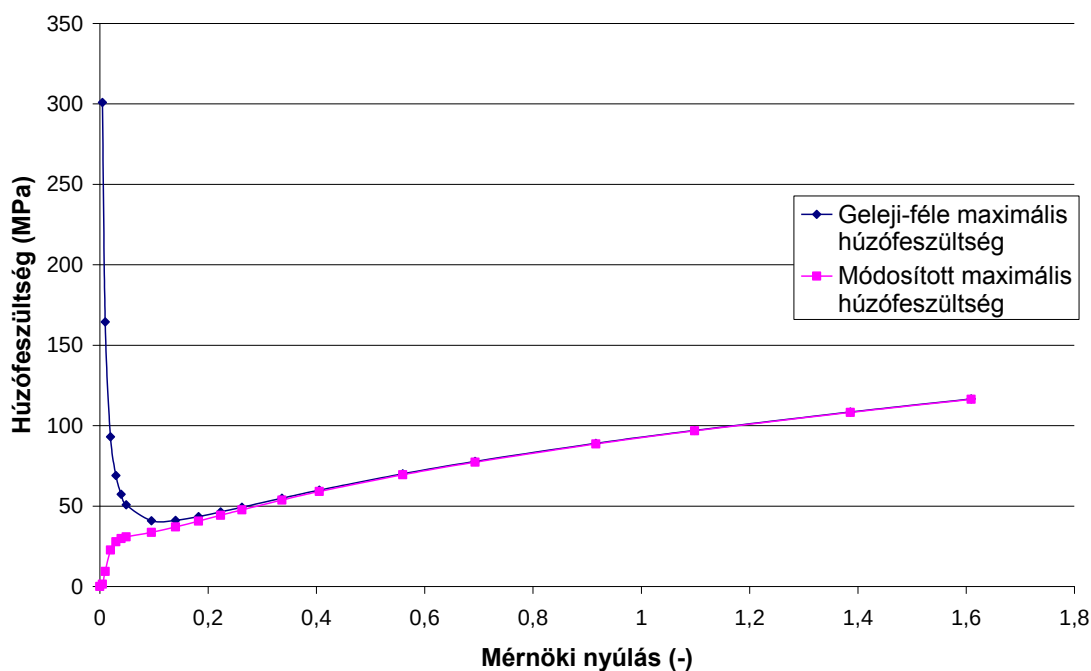
ahol $\varepsilon = \Delta A / A_2 = \Delta \ell / \ell_1$ a mérnöki nyúlást, a ℓ_1 a szerszámba befutó huzal hosszát, és a $\Delta \ell$ a fokozatbeli huzalhossz-változást jelöli.



19. ábra. Linicus-féle [24] kísérleti paraméterekkel számolt maximális húzófeszültség értékek. (C10 anyagminőség, Húzási sebesség 1 m/s, szerszám kúpszög 8°.)



20. ábra. Nistor [6] rézzel végzett kísérleteihez tartozó paraméterekkel számolt maximális húzófeszültség értékek. (A húzási sebesség 10 m/s, szerszám kúpszög 6°.)



21. ábra. Nistor [6] alumíniummal végzett kísérleteihez tartozó paraméterekkel számolt maximális feszültség értékek. (A húzási sebesség 10 m/s, szerszám kúpszög 6°.)

Megvizsgálva a (45) egyenletet különböző technológiai paraméterek esetén, belátható, hogy az elvárt feltételek mindegyikét teljesíti. A 19., 20. és 21. ábrák szemléltetik, hogy anyagminőségtől, kúpszögtől, súrlódási tényezőtől függetlenül eleget tesz a kívánalmaknak.

A végtelen helyett a nullába konvergál a függvényérték az alakváltozás csökkenésével, míg nagyobb fogyásoknál (alakváltozásoknál) a Geleji-féle függvénybe simul. Látható az is, hogy az ipari alkalmazásban előforduló technológiai paramétereknél, szinte minden esetben 0,02-es alakváltozás alatt az anyag rugalmas tulajdonsága dominálni kezd, és a függvény értéke közel lineáris módon csökken (Pearson korreláció $R^2=0,96-0,97$). Itt megjegyzem, hogy ipari gyakorlatban ekkora (ilyen kicsiny) fogyásokkal már nem dolgoznak. Így ezen intervallum további vizsgálatát már nem tartottam indokoltnak.

A fenti megfontolások alapján a maximális feszültség zárt analitikus formulával való modellezésére a (45) egyenletet megfelelőnek tartom.

3.5. Hőmérsékleti modell kiválasztása

A huzalhőmérséklet változásának modellezéséhez is zárt formulákkal leírható modelleket kerestem. A szakirodalomban fellelhető [21, 36, 38, 42, 43, 44] cikkek mellett egy saját huzalhúzási mérést is elvégeztem, mely során a huzalhőmérsékletet mérése volt a fő cél.

A huzalhúzási kísérletet az Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet Képlékenyalakító Laboratóriumában végeztem, vertikális elrendezésű egyfokozatú durvahúzógépen. A kísérlet alapanyaga 9,53 mm átmérőjű Al99,5 anyagminőségű Properzi eljárással öntvehengerelt tekercs volt.

A 22. ábrán látható az egyfokozatú durvahúzó berendezés (melynek elvi felépítését a 4. ábrán mutattam be). A húzódob fejt ki a húzóerőt, - miközben magára csévéli fel a lehúzott huzalt - a dob és a feltekercselt huzal közti súrlódás által. Ezen kívül látható az irányító panel is, melyen a főkapcsolón, és a vészleállítón kívül még két szabályzó van. Az egyikkel a húzódob fordulatszámát állítjuk be. A másikkal beállíthatjuk, hogy a beállított állandó fordulattal forogjon a dob, vagy a lábpedállal manuálisan lehessen szabályozni a fordulatszámot. A lámpák jelzik, ha üzemben van a gép, illetve ha hiba történt (például túlterhelés). A 22. ábrán balra a szerszámtartó szekrény, amelyben lévő húzógyűrűben az alakítás történik.

A 23. ábrán részletesebben is megfigyelhetjük, hogy a szerszámtartó szekrényben egy hengeres húzószerszám tartó betét található (melyből a huzal kilép a képen). Ebben a betétben van rögzítve a húzószerszám, melynek kúpos részében zajlik a képlékeny alakítás. A fészek két végén egy-egy kör keresztmetszetű nyílás található, melyeken áthalad a huzal. A befutó résznél található egy 3 görgős bevezető. Ezt azért fejlesztettem ki és illesztettem a szerszámtartóhoz, mert a húzási folyamat során többnyire a huzal a lecsévélő dobról átlósan a szerszám tengelyvonalától eltérő szögben érkezik a bejövő nyíláshoz. A görgők használatával elkerülhető, hogy hozzáérjen a szerszámtartó szekrény nyílásának falához, ezáltal egy új terhelés lépjen fel a keletkező súrlódás miatt, illetve a huzal felületi minősége leromoljon. Egy ilyen súrlódás felléptekor a húzóüregbeli feszültségi állapot is megváltozik, ami a mérési eredményeket kedvezőtlenül befolyásolja.

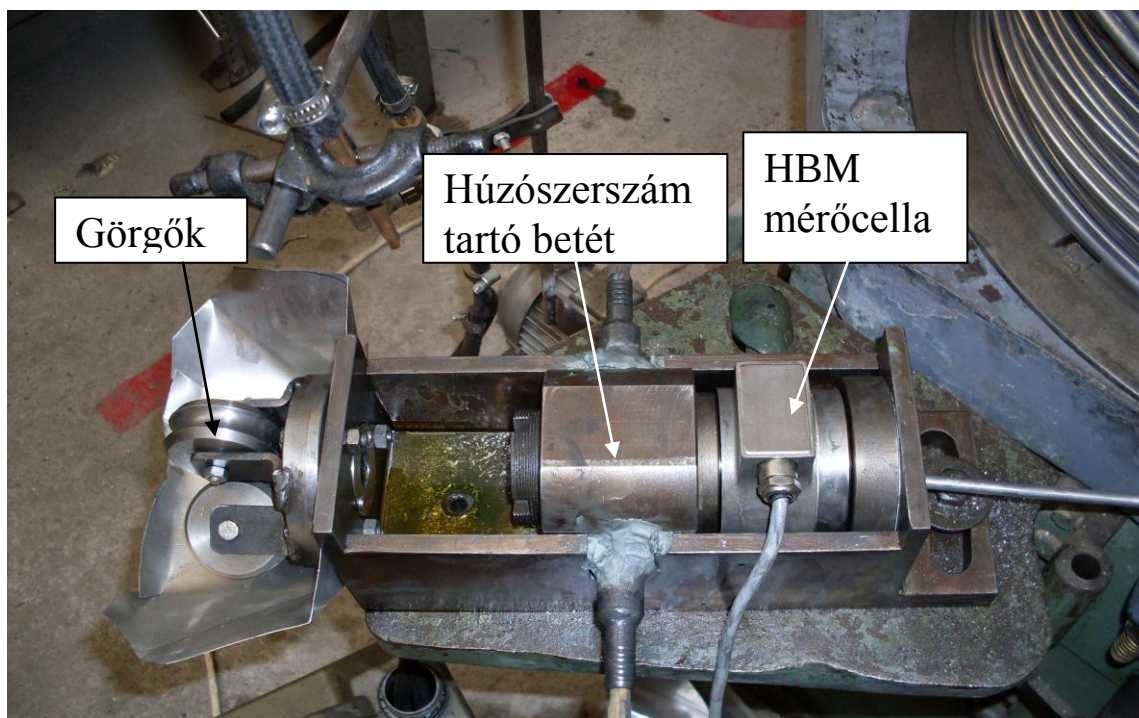


22. ábra. Az egyfokozatú húzó gép húzódobja, a diaboló, a szerszámtartó szekrény (mely a húzógyűrűt és a erőmérő cellát tartalmazza), valamint a berendezés irányító panelje.

A 23. ábra közepén látható a húzószerszámot tartó hengeres betét, melybe egy erőmérő is be van építve. A mérőműszer - melyből a szürke vezeték jön ki - Hottinger-Baldwin Messtechnik gyártmányú, típusa: TYP C6A, 200kN-os felső mérési korláttal.

A 23. ábra felső részén látható egy csap melyen keresztül a MOL Fortilmo AWD 150 Special húzóolajat lehet folytatni a huzalra kenésképpen. A húzás közben a szekrény szerszámtartó betétje előtti részt elárasztottam, így biztosítva a megfelelő kenést a huzal teljes felületén, nagy húzási sebességek esetén is. A szerszámtartó alján található egy leeresztő furat, mely a húzóolajat egy gyűjtőtartályba vezeti, ezáltal biztosítva a

kenőanyag folyamatos cseréjét, frissítését. Gondolva arra is, ha a huzal bejövő nyílásán, húzási iránnyal szemben kifelé távozna a húzóolaj, egy tölcsért szerkesztettem a szerszámtartó szekrény elejéhez, hogy az itt eltávozó kenőanyagot szintén a gyűjtőtartályba lehessen elvezetni. A tölcsér segítségével az olajvesztés minimalizálódott a folyamat közben.



23. ábra. A szerszámtartó szekrény, bevezető görgőkkel.

A 24. ábrán látható tehát a teljes kenési rendszer, melyet egy szivattyú hajt. A szivattyú a kenőolajat a tartályból két szűrőn keresztül a kenőanyagszekrény feletti csaphoz keringeti, így téve eleget a fenti technológiai összefoglalóban is leírt tisztasági feltételeknek a kenőanyagra vonatkozóan. A kenőolaj így a kenési folyamat során belejutott por- és szennyező-szemcséktől megtisztítva jut vissza a szekrény elárasztott kenőszegmensébe.

A berendezés további része a lecsévlő dob, mely az alakítandó huzal tekercs tárolására és huzal leadására hivatott. Ebben a dobban van egy beépített vészfék is, mely huzalszakadás esetén a lehető leghamarabb megállítja az elszabadult tekercset.

A 25. ábrán a húzó gép motorja és meghajtása látszik. Az ékszíjas meghajtáshoz tartozó tárcsa fordulatszámát egy tachodinamo fordulatszám-mérő méri, mely jól látszik az ábra jobb oldalán. A tachodinamo által mért jelből tudjuk visszaszámolni a húzódob fordulatszámát, és abból a húzási sebességet. Persze figyelembe kell venni, hogy egy kétállású sebességváltó is be van építve, melynek állásától függően kell kiszámolni a fordulatszámon keresztül a sebességet.

A hőmérséklet mérésére egyedi mérőkonstrukciót használtam. A 26. és a 27. ábrán láthatjuk a termoelemet a huzalhoz szorító laprúgós megoldást, mely a szerszámtartóból kivezető nyílásnál volt rögzítve. A fémlapocskán két oldalt felcsavarozott kis bakelit ékek, a huzal oldalirányú megvezetését szolgálták, hogy a szerszámból kifutó huzal lehetőleg minden pillanatban érintkezzen a hőelem melegpontjával, és nagy sebességeknél lehetőleg ne ugorjon le a huzalról a mérőeszköz. A laprúgóval egy vas-

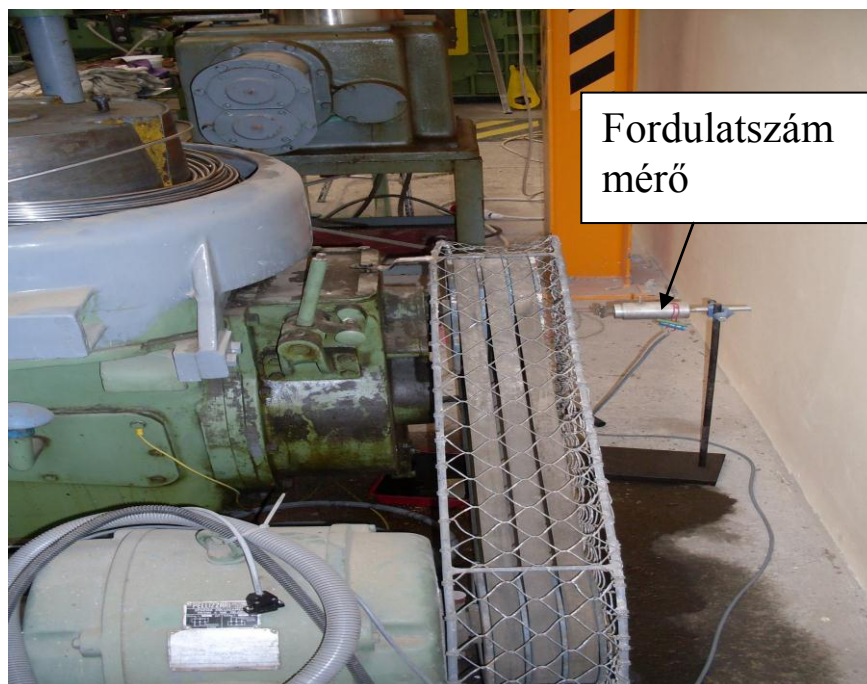
konstantán termoelemet szorítottam a huzalhoz. A laprúgót csak olyan mértékben feszítettem elő, hogy minimális szorítóerőt fejtsen ki, de biztosítsa a termoelem huzalfelületen való biztos érintkezést.

A mért fordulatszám, erő és hőmérséklet jeleket össze kellett gyűjteni, ami a Spider8 mérési adatgyűjtő segítségével történt. Ezeket a jeleket végül a Catman adatgyűjtő szoftver segítségével dolgoztuk fel, számítógépesen értelmezhető jelekké (például Excell táblázat formájában).

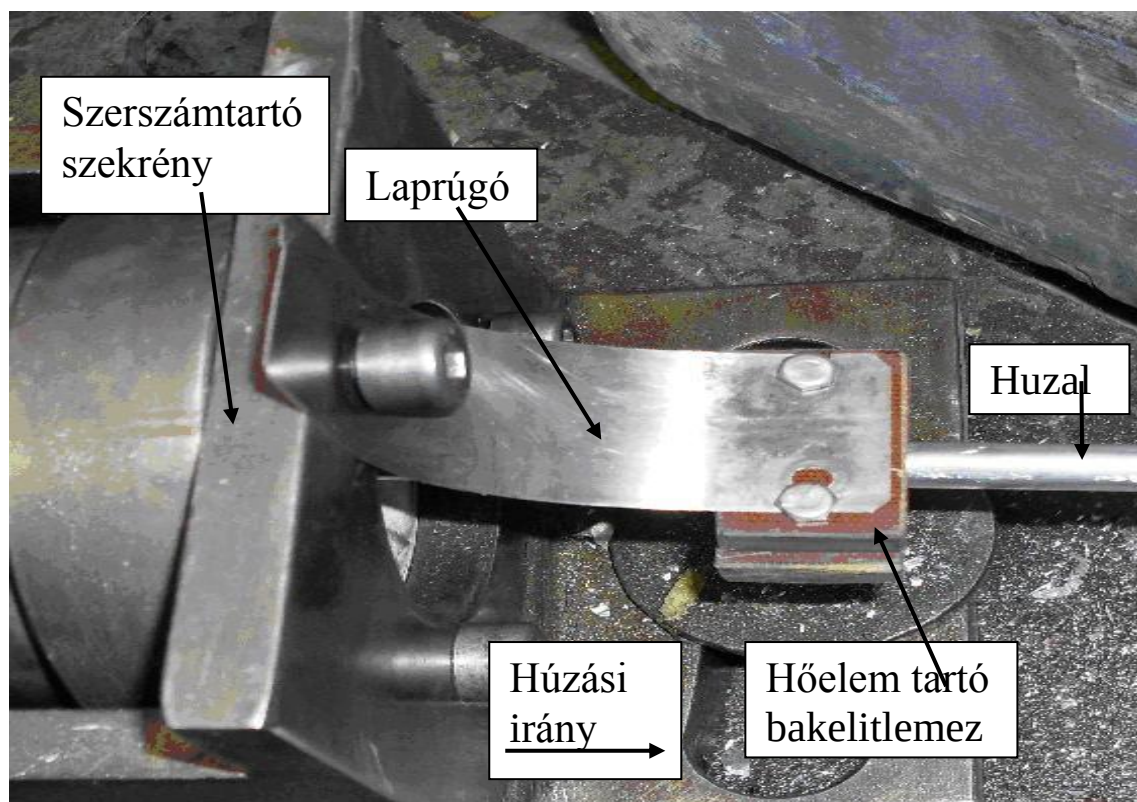
Kísérletemben az Inotal Kft. által rendelkezésemre bocsájtott Al99,5 alumínium durvahuzallal, húzóolajjal és húzószerszám sorozattal dolgoztam. A húzógyűrűkről az információim hiányosak voltak, viszont ezek nélkül egy helytálló korrekt méréssorozat nem végezhető el. Ilyen hiányosság volt, hogy a húzókövek kúpszögei ismeretlenek voltak.



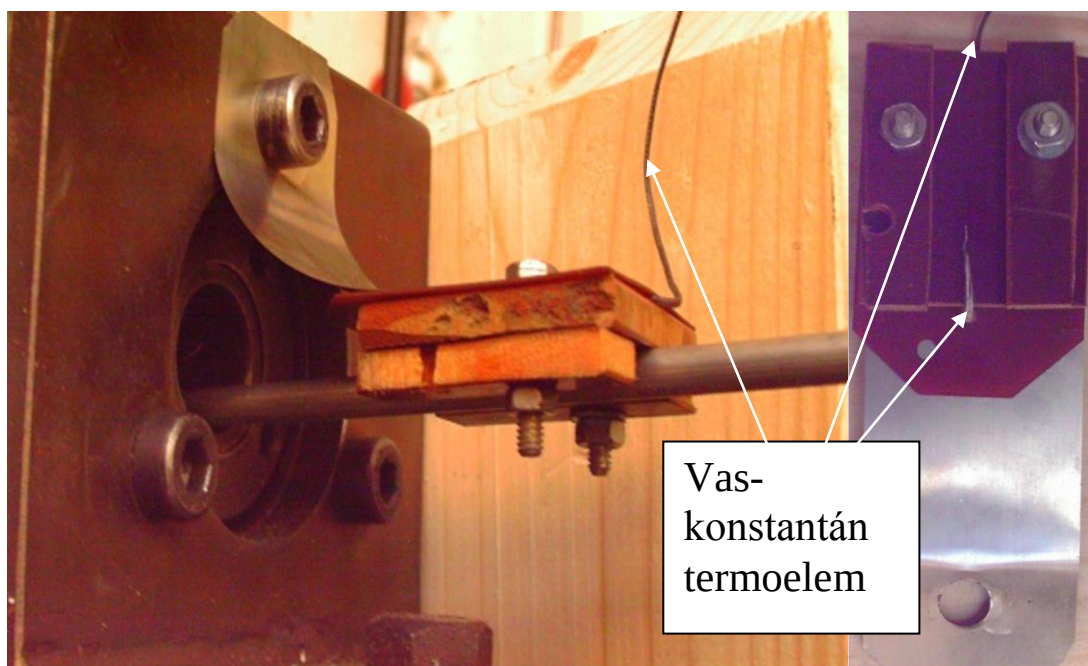
24. ábra. A szűrővel ellátott folyamatos kenést biztosító szivattyúrendszer.



25. ábra. A motor, meghajtás, és a fordulatszám-mérő.



26. ábra. A hőmérsékletmérő eszköz elhelyezése a húzószekrény kifutó nyílásánál.



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



28. ábra. Húzószerszámok üregeibe öntött ólomdarabok, melyekkel a kúpszögek nagyságát állapítottam meg.

A kúpszög méréséhez a 28. ábrán látható módon olvadt ólommal kiöntöttem a húzószerszámok üregeit. A formát kitöltő anyagot megszilárdulása után eltávolítottam, és a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet Zeiss gyártmányú Axio Imager M1M fénymikroszkópjával oldalirányból lefotóztam. A kapott képeket CAD rajzoló programmal elemeztem és megállapítottam a kúpszögeket.

A 2., 3. és 4. táblázatban foglaltam össze a fennálló technológiai paramétereket.

A mérés során 4 tekercset húztam le egymás után mind a hét húzószerszámon, úgy hogy egy tekercshez csak egy rögzített húzási sebesség tartozott.

Anyagminőség:	Al99,5
Kiinduló átmérő*:	$d_0 = 9,53\text{mm}$
Kiinduló hőm.:	$T_0 = 20^\circ\text{C}$
Fokozatszám:	7

*az öntve hengerelt szelvény átlagos átmérője
2. táblázat. Általános technológiai paraméterek.

Fokozatszám:	1	2	3	4	5	6	7
Kifutó átmérő (mm):	8,56	7,05	6,08	5,17	4,34	3,81	3,19
A húzószerszám kúpszöge (°):	12	11	9	11	8,2	6	8,9

3. táblázat. Fokozatonkénti technológiai paraméterek.

Fokozatonkénti kifutó sebesség:	40m/min	80m/min	100m/min	120m/min
--	---------	---------	----------	----------

4. táblázat. Sebességtől függő technológiai paraméterek.

		Húzási fokozat száma						
Húzási sebesség m/min		1	2	3	4	5	6	7
40	Mért hőmérséklet °C	48,3	55	50,8	53,7	58,7		63,9
80		54,2	53,7	53,2	52,8	66,3	59,7	66,7
100		48,1		51,8	52,5	63,4	66,3	69
120		49,4	74	54,3	63,3	57,5		69,5

5. táblázat. A mért huzalhőmérsékletek.

Az egyes fokozatokban mért hőmérsékleti adatok az 5. táblázatban láthatók. Az irodalomban megjelent mérési értékek [3, 38] és az ipari tapasztalat alapján az 5. táblázatban leírt mért adatok reálisak.

A huzalhőmérséklet mérése húzás közben igen nehézkes dolog, több tényező torzíthatja a mért értékeket.

A mért értéket befolyásolja a kenőanyag minősége, amely a légkörből az olajfürdőbe kerülő szennyeződések miatt folyamatosan változik a kísérlet során. Kialakul a kenőanyag vastagságban egy egyenetlen eloszlás is, amely módosítja a mérési értékeket. Ezt az egyenetlenséget a huzal haladási irányára merőleges mozgásai (huzalvibráció) tovább erősíti.

A huzal oldalirányú mozgásának oka a dobon történő huzalmozgás (a huzalmenetek húzódob felületén történő „felcsúszásnak” szabálytalansága, valamint a huzalban a korábbi hajlítások, csévélek miatt visszamaradt feszültségek a szálban. Az oldalirányú

huzalmazás következtében, a termoelem változó nyomással érintkezik a huzalhoz, és bár a hőmérsékletet mérő termoelem rugalmasan lett rögzítve, bizonyos esetekben a nagy elmozdulás miatt az érintkezés rövid időre meg is szűnt. Ezekben az időintervallumokban a termoelem nem a huzalfelszín hőmérsékletét mérte, hibás értékeket szolgáltatott.

A huzalhőmérsékletet zárt, analitikus formulával leíró modelleknek két típusát találtam az irodalomban. Az egyik huzalhőmérsékletet leíró modell típus az alakváltozáshoz szükséges munka- illetve teljesítményigényből számolja ki a hőmérsékletváltozást, ismerve azt a tényt, hogy az alakítás közben befektetett energia 90-95%-a hővé alakul [39]. A másik módszer a parabola modell, mely szerint a súrlódási hő eloszlási-profilját a huzalkeresztmetszeten parabolával írják le, figyelembe véve a behatolási mélységet [13].

Az alakítás során a huzalban keletkező hő két forrásból származik. Az egyik a huzal szerszámüregben lévő térfogati részében (alakváltozási zónában) a belső súrlódás hatására keletkező alakváltozási hő, a másik a külső szerszámmal érintkező felületen fejlődő súrlódási hő.

Első lépésként a huzal hőmérsékletének az alakváltozási hő által generált növekedését leíró modelleket gyűjtöttem össze. Az alakváltozáshoz szükséges munka alapján számoló Reisz által felírt modell [40] alakja a következő:

$$\Delta T_{al} = \beta_{al} \frac{F_{al}}{A_2 \rho c} = \beta_{al} \frac{k_k \Delta A + 0,77 k_{fk} \alpha A_2}{A_2 \rho c} \quad (46)$$

ahol ρ a huzal sűrűsége, c a huzal fajlagos hőkapacitása, β_{al} az alakításváltozási munkából hővé átalakult rész hányada, amely a huzal térfogatát melegíti.

A Reisz féle leírás előnye, hogy abból a húzóerő számítására alkalmas Geleji modellből indul ki, mellyel a legjobb közelítést kaptam az alakítás erőszükségletére.

Az alakítási hő által generált hőmérsékletnövekedés számítására széleskörűen elterjed módszer, a Siebel féle modell is [13]:

$$\Delta T_{al} = k_{fk} \frac{\varphi + \alpha}{\rho c} \quad (47)$$

Módosítottam a Siebel modellt úgy, hogy az alakváltozási hő a húzó üreg térfogatában jön létre, tehát egy átlagos keresztmetszethez viszonyítjuk, ám a hőmérsékletnövekedést a kifutó keresztmetszeten értjük:

$$\Delta T_{al} = k_{fk} (A_2 + A_1) \frac{\varphi}{2 A_2 \rho c} \quad (48)$$

Következő lépésként a súrlódási hő okozta hőmérsékletnövekedést leíró egyenleteket vizsgáltam meg. A Geleji-féle súrlódási teljesítményből kapott hőmérsékletváltozást a következő formula írja le [41]:

$$\Delta T_{súrl} = \beta_{súrl} \frac{F_{súrl}}{A_2 \rho c} = \beta_{súrl} \frac{k_k \Delta A \frac{\mu}{\alpha}}{A_2 \rho c} \quad (49)$$

ahol $\beta_{súrl}$ a súrlódási hő megoszlási hányadosa.

A parabolikus modellt Siebel [13] cikkében vezette le:

$$\Delta T_{\text{súrl}} = \frac{1,22}{2} \beta_{\text{súrl}} \mu k_{\text{fk}} v_{\text{átl}} \left(\frac{t_{\text{al}}}{\lambda \rho c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (50)$$

ahol t_{al} a huzal egy anyagi pontjának az alakítási zónában töltött átlagos ideje, és λ a huzal hővezetési tényezője.

A megoszlási hányados súrlódás esetén az a része a súrlódási hőnek, amely a huzalba jut; a húzási sebességtől függ. Értéke jellemzően 0,8 és 0,95 közötti [40], a sebesség növekedésével monoton nő.

Az Siebel-féle súrlódási hőmérsékleti modellnél figyelembe kell vennünk, hogy a hőmérséklet-eloszlás profilja a húzóüregben alakul ki. A huzalhőmérséklet mérésénél már azt az állapotot érzékeljük, amikor a hővezetés miatt ez a profil eltűnik és állandósul a hőmérsékleti mező. Ez köszönhető annak, hogy a fémek hővezetési tényezője olyan nagy, hogy egy rúd/huzal keresztmetszeti-sugár távolságról igen rövid idő alatt el tudja szállítani a húzási művelet által generált hőt. Az általam elvégzett mérésnél is a termoelem az alakítás helyétől 200 mm-re volt, ami azt jelenti, hogy a huzal keresztmetszete mentén nagyfokú hőmérséklet-kiegyenlítődés ment végbe, amely minimális hőmérsékletkülönbséget eredményezett a huzalmag és – felület között. Más esetekben - ahol a húzószerszámba építik be a termoelemet – is figyelembe kell venni a húzási művelet által szerszámba áramlott hő által generált hőmérsékleti profil kiegyenlítődési folyamatát [36]. Az eddigiek alapján, ha a mért adatokat össze akarjuk vetni a számított adatokkal, akkor Siebel modellből le kell vezetni egy olyan modellt, ami már az állandósult állapotú huzalhőmérsékletet adja meg.

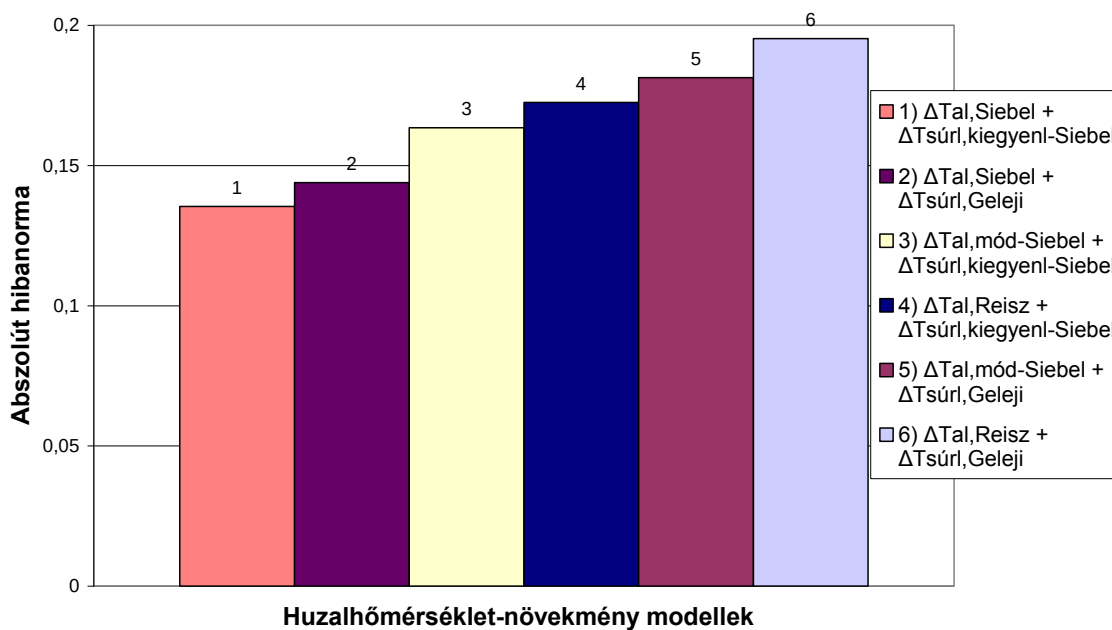
A hőmérséklet kiegyenlítődését feltételezve, a Siebel-(Kobitzsch)-féle levezetésből, a feltételezett parabolikus hőmérsékleti profil integrál-átlagából, és a súrlódási hő behatolási mélységéhez (b) tartozó területének a kilépő keresztmetszetre vetített arányából a következő módosított modellt kaptam:

$$\Delta T_{\text{súrl}} = \frac{1 - \left(1 - \frac{2b}{D_2}\right)^2}{3} 1,22 \beta_{\text{súrl}} \mu k_{\text{fk}} v_{\text{átl}} \left(\frac{t_{\text{al}}}{\lambda \rho c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (51)$$

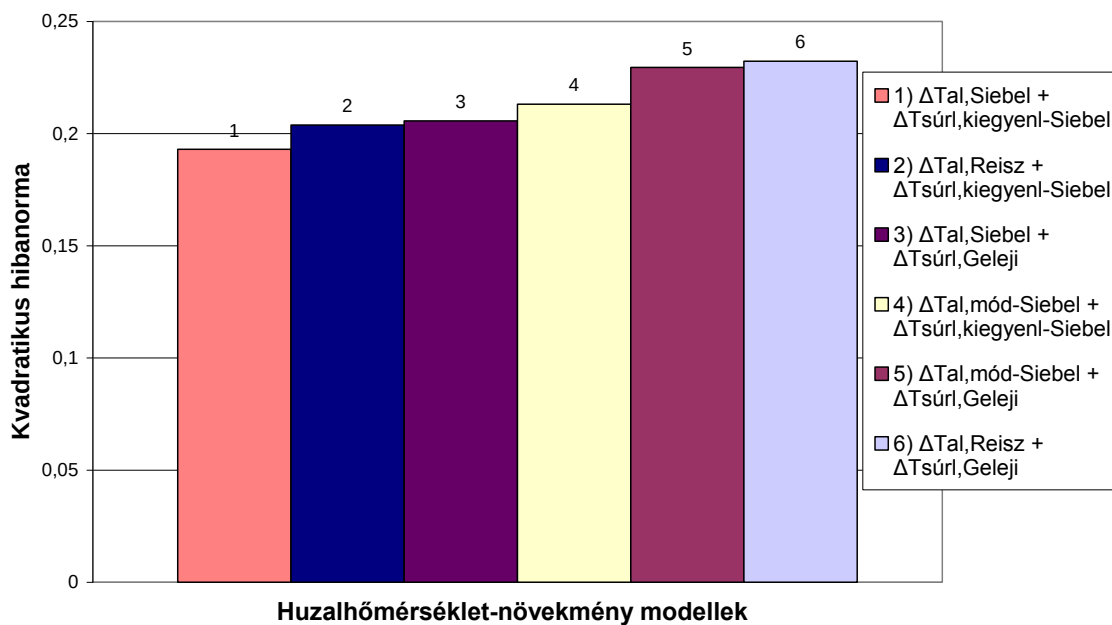
$$\text{ahol } b = 2,44 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot t_{\text{al}}}{\rho \cdot c}} \text{ [m].}$$

Ezután az alakítási hőmérsékleti és súrlódási hőmérsékleti modellek minden kombinációjára megvizsgáltam az 1- és 2-hibanormák értékét, és kerestem melyik a legjobb hőmérsékletet legjobban leíró egyenlet. A mért értékek a saját eredményeim, illetve a [36, 38, 43] publikációkban közölt kísérletek eredményei voltak. A többi publikációt a kísérleti paraméterek hiányos közlése miatt nem tudtam alkalmazni. A saját mért adataimhoz tartozó súrlódási együtthatók, és alakítási szilárdság értékek meghatározását a következő 3.6. fejezetben ismertetem.

A 29. és a 30. ábrán látható, hogy a Siebel-féle alakítási melegedési modell, és a Siebel-féle levezetésből származtatható kiegyenlítődt hőmérsékleti állapotra vonatkozó súrlódási melegedési modell közelíti legjobban a mért adatokat.



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



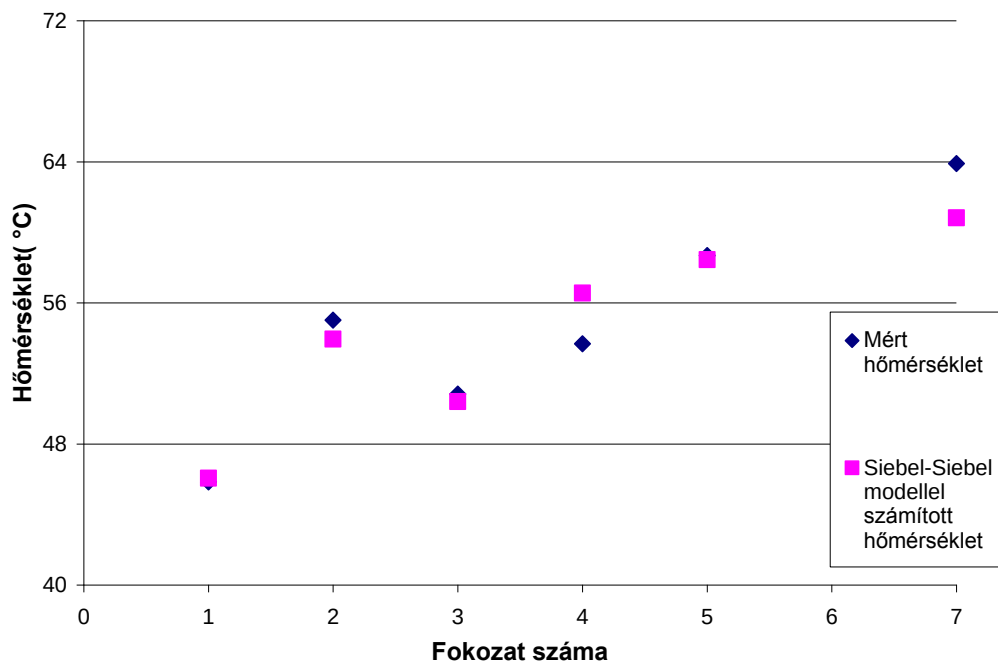
30. ábra. Az alakváltozási és a súrlódási hőmérsékletemelkedésre felírt modellek különböző párosításaira kapott kvadrátikus hibanormák.

További vizsgálataimhoz a hőmérsékleti egyenletek e kombinációját (52) fogadtam el a húzási melegedést legjobban leíró elméletként, így annak modellezésére is ezt használtam.

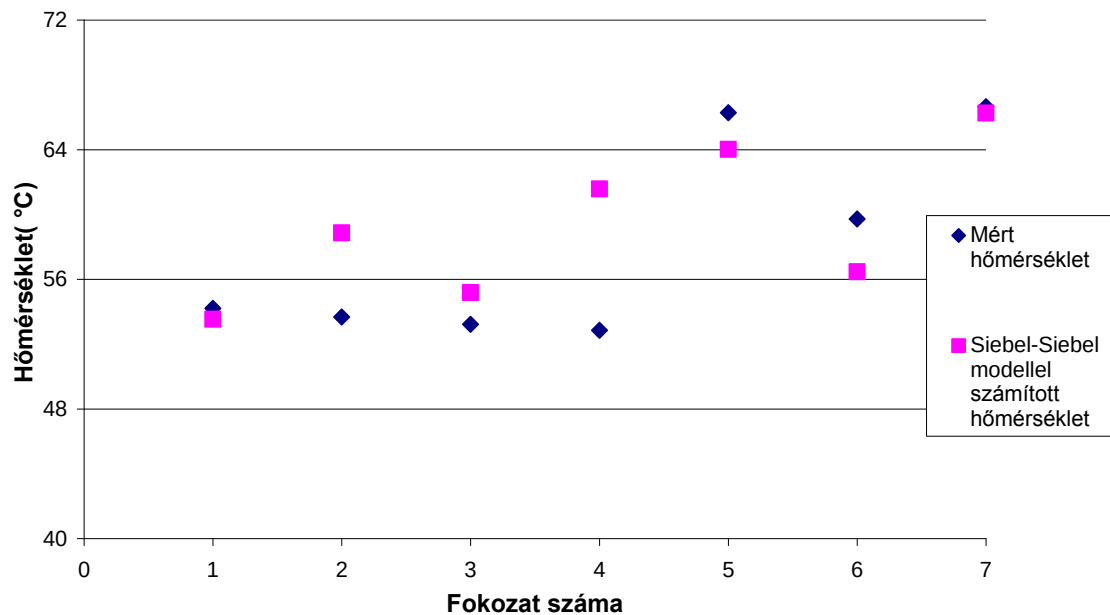
$$\Delta T = k_{fk} \frac{\varphi + \alpha}{\rho c} + \frac{1 - \left(1 - \frac{2b}{D_2}\right)^2}{3} 1,22 \beta_{súrl} \mu k_{fk} v_{átl} \left(\frac{t_{al}}{\lambda c \rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (52)$$

ahol $b = 2,44 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot t_{al}}{\rho \cdot c}}$ [m].

A modellből kapott számításokat és az általam mért hőmérsékleteket a 31. és 32. ábrákon hasonlítottam össze.



31. ábra. Mért és számított hőmérsékletek összehasonlítása húzási fokozatonként.
Húzási sebesség 40m/min.



32. ábra. Mért és számított hőmérsékletek összehasonlítása húzási fokozatonként.
Húzási sebesség 80 m/min.

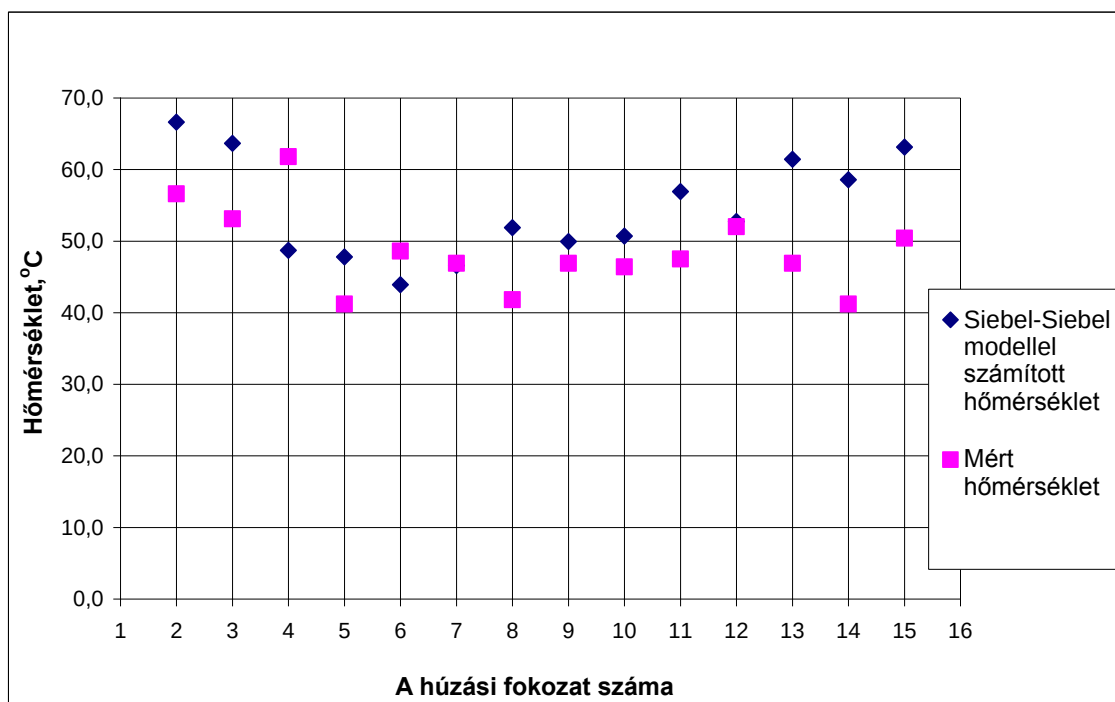
Sorozathúzás esetén a huzalok nem tudnak a környezet, illetve a hűtőközeg hőmérsékletére lehűlni a rendelkezésre álló kevés idő miatt. Ekkor a következő fokozatba befutó huzal hőmérséklete nagyobb lesz a hűtőközegénél. Ezt az értéket, feltételezve, hogy a huzalban a hővezetés gyorsabb, mint a felületen a hőátadás, illetve a hőtechnikai paraméterek állandóak, a hőátadás hőmérlegének közismert differenciálegyenletéből kapjuk. A differenciálegyenlet megoldása a következő [43]:

$$\Delta T_h = (T_2 - T_{köny}) \cdot \left[1 - e^{-\frac{4u\Delta L}{cpD_2v_2}} \right] \quad (53)$$

ahol ΔT_h a huzalhőmérséklet csökkenése, amíg a szerszámból kifutó szál a következő fokozatba befut, T_2 az adott fokozatból kilépő szál hőmérséklete, $T_{köny}$ a hűtőközeg (levegő vagy kenőanyag) állandó hőmérséklete, az u a hőátadási tényező a huzal és a hűtőközeg között, ΔL a két fokozat közötti huzaldarab hossza, v_2 a szerszámból kilépő huzal sebessége.

Két fokozat között kenőolajba merüléssel („nedves húzás”) történő hűtés esetén, a hőátadási tényező értékét, mely szintén a húzási sebességtől függ, tanszéki mérési eredmények feldolgozására alapozva a következő egyenlettel adhatjuk meg:

$$u = 675 \cdot \ln(v_2 + 3) \quad [W/(m^2K)] \quad (54)$$



33. ábra. Húzóüzemben mért és az általam számított huzalhőmérsékletek összehasonlítása. Húzógép 17 fokozatú nedves húzó, hűtő-kenő 2,5 % kálszappan + 1 % ricinusolaj tartalmú emulzióval. Anyagminőség C10. Húzás Ø1,4mm-ről Ø0,35 mm-re. Húzási sebesség az utolsó fokozatban 8,5 m/s.

A 33. ábrán egy 17 fokozatú sorozathúzó gépen végzett tanszéki kísérletből kapott adatokat vettem össze az általam ajánlott, huzal-hőmérsékletet számoló módszer eredményeivel. Az 33. ábra szerint jó közelítést kapunk ezzel a modellel. Az 5-10 °C-os eltérés az irodalom szerint is nagyon jó közelítésnek számít [44]. A mért adatok trendjeit jól követik a számolt függvények.

A fenti megállapítások alapján a (52) egyenletet találtam a huzal hőmérsékleti viszonyait legjobban leíró modellnek, sorozathúzás esetén kiegészítve (53) hűlési egyenlettel.

3.6. Egyéb paramétereket leíró modellek

3.6.1. Sűrűlódási tényező

A huzalhúzás paramétereit legjobban leíró modell kiválasztásakor szükségesnek tartottam az olyan alapvető paraméterek részletesebb vizsgálatát is, mint a sűrűlódási tényező. A modell pontosságát javítja, ha a sűrűlódási együtthatót nem konstansként kezeljük, hanem megpróbáljuk más technológiai paraméterektől való függését beépíteni az eljárásba. A legfontosabb befolyásoló tényezők, melyre vonatkozóan a vizsgálataimat elvégeztem: a hőmérséklet és a húzási sebesség.

A száraz kenés esetén használt kenőanyagok a hőmérséklet növekedés hatására sűrűlódási tényezőben csökkenéssel válaszolnak. Az üzemi hőmérsékleten (100-300 °C) viszont kvázi-állandó sűrűlódási együttható értéket produkál a száraz kenés, így ebben az esetben, egy hőmérséklettől független együttható érték is használható.

A nedves kenés esetén hőmérséklet növekedés hatására a folyékony kenőanyagok viszkozitása, és ezzel együtt a kenőhártya rétegvastagsága is csökken. A kenőfilm vastagságának a csökkenése a súrlódási tényező növekedését eredményezi. Ez szélsőséges esetben a kenés instabilitásaihoz vezet, a kenőfilm megszakadhat, és fémes érintkezés miatt felületi károsodásokat okozhat a huzalon, hosszanti karcokkal, illetve szakadást okozhat kontrakcióval. A kenés megszűnése miatt fellépő túlmelegedés a szerszám extrém gyors elhasználódásához vezethet. Nedves kenés esetén a huzal hőmérsékletet úgy próbálják korlátozni, hogy a kenőanyag átlagos hőmérséklete lehetőleg kb. 60 °C alatt maradjon, mivel ebben a tartományban biztosan nem érvényesülnek az előzőekben felsorolt negatív hőmérsékleti hatások [3].

A száraz kenésnél illetve a nedves kenésnél a fenti feltételek mellett, a sebesség hatása sokkal markánsabb a súrlódási tényezőre. Egy húzószerszámban, ha csak nincs hidrodinamikus vagy hidrosztatikus kényszerkenés, akkor jellemzően félszáraz (vegyes) súrlódás jön létre a húzószerszám fala és huzal felülete között. Erre az esetre a Stribeck diagramnak azon területe jellemző, amely a minimális súrlódási tényezőhöz tartozó sebességnél kisebb sebességekhez tartozik [45,46]. A vegyes súrlódási tartományban azt figyelhetjük meg, hogy a súrlódási együttható értékét egy hiperbolikus görbe írja le. A súrlódási tényezőnek ezt a hiperbolikus csökkenését folyadékkenésre [47,48], szárazkenésre [38] is igazolták. Müller [47] közlése szerint a súrlódási tényező hiperbolikus csökkenése töretlen egészen 10 m/s húzási sebességig is. Eickemeyer és társai szerint [49] a csökkenés akár 0,005-nél kisebb súrlódási tényezőig is elmehet, bár ekkor a hidrodinamikus kényszerkenéshez képest vékonyabb filmvastagság tud csak kialakulni, ami nagy sebességeknél magában hordozza a kenési instabilitás veszélyét. A kenőfilm vastagsága Tattersal [50] szerint jellemzően 1 µm, melynél a végtermék érdessége kisebb szokott lenni.

A húzási kísérleteim során a súrlódási tényezőre vonatkozó méréseket is végeztem. A méréshez használt berendezés és a mérési összeállítás megegyezik a 3.5. fejezetben leírtakkal. A súrlódási együttható sebességfüggésének vizsgálatához adott húzószerszámon, adott fogyással (alakváltozással), végeztem húzást, a húzási sebességek lépcsőzetes változtatása mellett, és mértem a HBM mérőcellával a fellépő húzóerőt. A sebesség változtatásával mért húzóerőkből a Geleji által ajánlott húzóerő (7,8) egyenlet szerint visszaszámoltam a technológiában használt MOL FORTILMO AWD 150 Special alumíniumdróthúzó-kenőolaj súrlódási együtthatóját.

A MOL FORTILMO AWD 150 Special jellemző paraméterei a következők:

- kinematikai viszkozitás: 150 mm²/s,
- sűrűség: 0,9g/cm³,
- folyáspont: -15 °C,
- lobbanáspont 225°C.

A súrlódási tényező mért sebességfüggése a 34. ábrán látható. A mérésből számolt adatokhoz egy megfelelően közelítő hiperbolikus függvényt kerestem. A függvény alakja szintén a 34. ábrán látható.

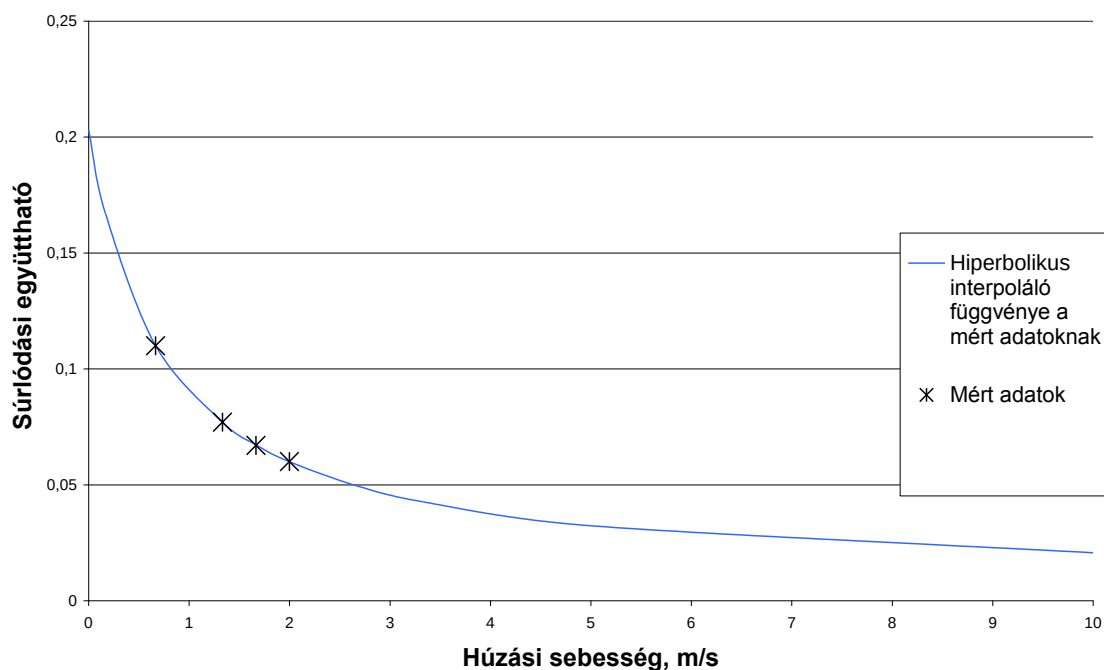
A kapott hiperbolikus egyenlet képlete:

$$\mu(v) = 0,0072 + \frac{1}{6,93 \cdot v + 5,1} \quad (55)$$

ahol a v sebességet [m/s] dimenzióban kell behelyettesíteni.

Az így kapott súrlódási együttható-függvény értékeinek a mért adatokkal való Pearson-féle korrelációs együttható négyzete (R^2): 0,99986, mely alapján szinte tökéletes egyezést állapíthatunk meg.

Meg kell jegyeznünk, hogy [21] cikkben hajszálhúzó gépek esetén a szerzők réz huzal 0,524 mm-ről 0,45 mm átmérőre való nedves kenéssel történő lehúzásakor azt mérték ki, hogy a húzóerő a sebesség növekedtével szintén nő. Ráadásul igen jó egyezéssel kimutatták, hogy a húzófeszültség és a huzalhőmérséklet között lineáris összefüggés található. Ez két lehetőséget tételez fel: egyik az, hogy a súrlódási tényező növekszik; a másik az, hogy az alakítási szilárdság húzási sebesség hatására bekövetkező növekedésénél a súrlódási tényező csökkenési üteme jelentősen kisebb. Az alakváltozási sebesség hatása az alakítási szilárdságra azonban hidegalakításnál igen kismértékű, ami miatt a felsorolt két lehetőség nem léphet fel. A szerzők nem közöltek több részletet erről az érdekes felfedezésről, így csak azt állapíthatjuk meg, hogy a kenési viszonyok eltérőek lehetnek hajszálhúzás esetén.



34. ábra. Mért, és a közelítő függvénnyel számított súrlódási együtthatók.

Vizsgálataim és az irodalomkutatásom alapján megállapítottam, hogy a finom-, közép- és durvahuzalok húzásakor az (55) alakú hiperbolikus egyenletek megfelelő közelítést adnak a súrlódási együttható sebességtől való függésére, ám hajszálhuzalok esetén a súrlódási tényező értékei már eltérhetnek ettől a típusú összefüggéstől. A kísérletemben elvégzett nedves kenésre nagyon pontos összefüggést adott az (55) képlet, így azt a modelljeimbe a számítás során beépítettem.

3.6.2. Alakítási szilárdság

Mind az erők, feszültségek, és a hőmérsékletek számításához elengedhetetlen az alakítási szilárdság ismerete. Ezt minden alakváltozási lépcső után megkaphatjuk a lehúzott huzal szakító vizsgálatánál megmért folyáshatárból. Az alakítási paraméterek ismeretében a folyáshatárokból összeállíthatjuk az alakítási szilárdság függvényét, azaz

az ún. „keményedési görbét”. Az alakítási szilárdságot már igen sokféle összefüggéssel modellezték. A Hajduk féle modell azért emelkedik ki közülük, mivel az alakváltozást, az alakváltozási sebességet és a hőmérsékletet is figyelembe veszi paraméterként, valamint ismert az anyagminőségek nagy családjára. A Hajduk modellben szereplő anyagfüggő paramétereknek nagy adatbázisa áll rendelkezésre, mely segítségével az anyagok nagy részére meghatározhatom a „keményedési görbét”, mérés elvégzése nélkül. A Hajduk paraméterek irodalma igen nagy, például a [51] könyvben hozzávetőlegesen ezer anyag jellemző paraméterei találhatók meg.

A Hajduk-féle alakítási szilárdsági modellt az alábbi összefüggés definiálja:

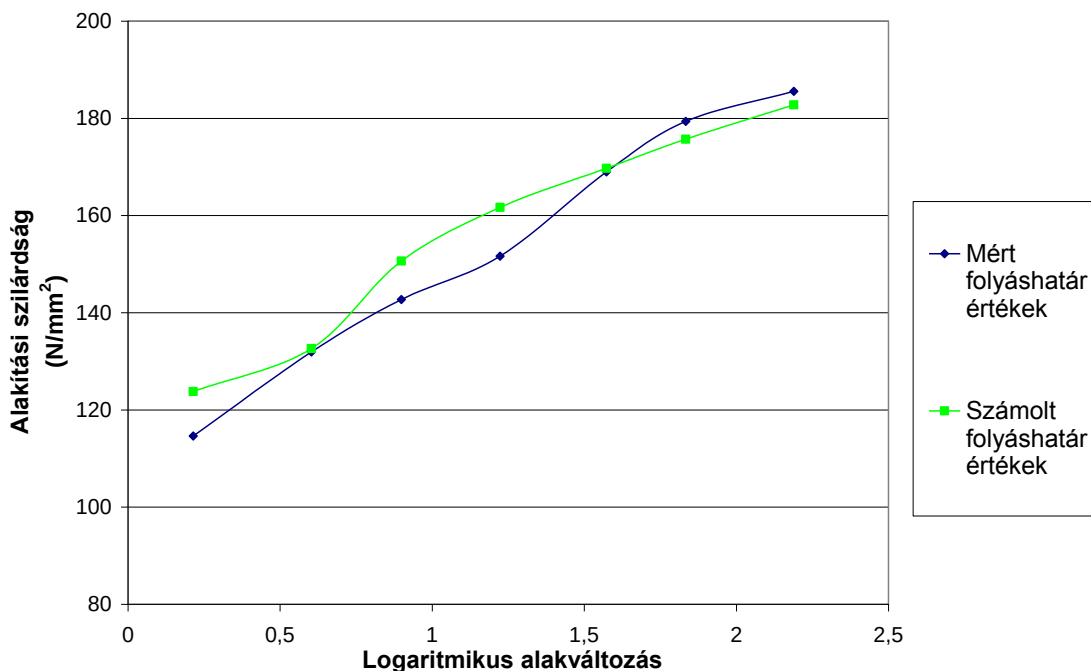
$$k_f = k_{f0} K_T K_\phi K_\psi = k_{f0} K_T C_2 \dot{\phi}^{n_2} C_3 \dot{\phi}^{n_3} \quad (56)$$

ahol k_{f0} egy konstans kezdőérték, $\dot{\phi}$ az alakváltozási sebesség, C_2 , C_3 , n_2 , n_3 anyagfüggő paraméterek és K_T hőmérsékletfüggő faktor, mely értéke konstans, tekintettel arra, hogy hidegalakításról van szó.

Az általam elvégzett kísérletek során megvizsgáltam a Hajduk egyenlet pontosságát. A hőmérsékleti kísérletek során, egy fokozaton adott sebességgel lehúzott tekercsből vettem ki darabokat, melyeket a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet INSTRON 5982 (100 kN) univerzális mechanikai anyagvizsgáló gépén szakítópróbának vettem alá $\dot{\epsilon} = 0,01 \frac{1}{s}$ sebességgel.

Így kaptam egy alakváltozástól és alakváltozási sebességtől függő alakítási szilárdság adott anyagra jellemző felületét, melyet összevettem a Hajduk féle modell által jósolt felülettel.

Az Al99,5-re az adatbázisban a következő értékeket találtam: $n_2=0,183$; $n_3=0,018$; $k_{f0} \cdot K_T \cdot C_2 \cdot C_3 = 146,25 \text{ MPa}$.



35. ábra. A 80m/min húzási sebességgel végzett húzási sorozat mért és számított alakítási szilárdság értékei a logaritmus alakváltozás (természetes nyúlás) függvényében.

A mért és a számolt értékek összehasonlítását a 35. ábrán mutatom be. A húzási sebesség 80 m/min, és a további paraméterek megegyeznek a hőmérsékletmérés adataival (2. és 3. táblázat).

Megvizsgálva a számolt értékek pontosságát az adott mérésalmazon azt találtam, hogy a Pearson-féle korreláció nagyon jónak mondható $R^2=0,9674$ értéket ad, ezért a Hajduk modell pontossága megfelelő az alakítási szilárdság leírására. A Hajduk összefüggés beépíthető az erő, feszültség illetve hőmérsékletszámoló modellekbe, melyek számíthatóvá válnak anélkül, hogy az input paramétereket mérésekkel kellene megállapítani, ugyanakkor megfelelően pontosak maradnak.

4. A huzalhúzás paramétereinek optimalizálása

Az egyes paraméterek számítására az előző fejezetben bemutatott modellek felhasználásával kialakítottam egy komplex zárt analitikus formulával leírható modellt. E modell segítségével egy adott technológiai beállításnál kis számítási kapacitás felhasználásával kiszámolható a huzal áthúzásához szükséges húzóerő (36,37), a huzalban ébredő maximális húzófeszültség (45), és a termék hőmérsékletváltozásai (52,53), valamint az alakítási szilárdság (56), illetve az adott kenőanyaghoz tartozó súrlódási tényező viselkedése (55). Ezzel a technológiatervezéshez egy olyan eszköz áll rendelkezésre, mellyel üzemi körülmények között is gyorsan és megfelelő pontossággal lehet ellenőrizni az adott húzástervhez tartozó erőtan, termomechanikai és tribológiai jellemzőket.

Egy adott technológia tervezésekor viszont nagyon fontos az optimális technológiai paraméterek beállítása is, az adott termelés hatékonyságának, és a késztermék eladhatóságának növelése érdekében. A technológia optimalizálása során célfüggvényeket írtam fel, melyek a gyártó által megválasztható paraméter értékeket és tényezőket keresnek úgy, hogy egy, a - termelési hatékonyságot jellemző - változó a lehető legkedvezőbb értéket vegyen fel, illetve egy kíváncsi a lehető legjobban teljesüljön.

Az optimalizálási problémákat a következőképpen lehet megfogalmazni: legyen az f skalár értékű függvény tetszőleges A halmazon értelmezve és keressük az B halmaznak azt az x^* pontját, amelyre

$$f(x^*) = \text{ext} \{f(x) | x \in B\} \quad (57)$$

ha az extrémum (maximum vagy minimum) létezik. Ha a maximum/minimum nem létezik, de a supremum/infimum igen, akkor a probléma olyan B -beli x' pontot vagy pontokat találni, amely(ek)re az $f(x')$ érték „közel” van az supremum/infimum értékhez. Ha se maximum/minimum, se supremum/infimum nem létezik, vagy nem tudjuk léteznek-e vagy sem, akkor olyan B halmazhoz tartozó pont, vagy más szóval megengedett megoldás keresése a cél, ahol a függvényérték jobb, mint a kiinduló pontban.

A (57) probléma neve többszemponútú optimalizálási probléma, ha f vektorértékű függvény.

Az optimalizálás célfüggvénye F , melyre egy f függvény és a B halmaz korlátait megadó feltétel rendszer esetén

$$F: B \rightarrow x^* \quad (58)$$

igaz.

Az optimalizálási problémáknak több osztálya van, mint a lineáris optimalizálás, nemlineáris optimalizálás, diszkrét és sztochasztikus optimalizálás, irányításelmélet.

A huzalhúzás technológiájának optimalizálási problémája az esetek túlnyomó részében, így a dolgozatomban is, nemlineáris optimalizálásnak tekinthető, mely a következő formában adható meg:

$$\begin{aligned} & \text{ext } \{f(x)\} \\ & g_j(x) - b_j = y_j, \\ & j = 1, \dots, m_2 \\ & x \in R^{m_1}, \\ & y \in R^{m_2} \end{aligned} \quad (59)$$

x n -dimenziós, y m -dimenziós változók, amelyek közül bármely változó csoportra nem-negativitási feltételek lehetnek érvényesek.

A feltételeket speciálisan megfogalmazva a nemlineáris optimalizálásnak a következő klasszikus felírását kapjuk:

$$\begin{aligned} & \text{ext } \{f(x)\} \\ & g_j(x) \geq 0, \\ & j = 1, \dots, m \\ & h_k(x) = 0, \\ & k = 1, \dots, p \\ & x \in R^{m_1}, \end{aligned} \quad (60)$$

Mivel a B halmazt mérnöki tervezésben mindig egy korlátos zárt halmaznak választjuk ezért a vizsgált, differenciálható f függvények mindig rendelkeznek maximum vagy minimum ponttal [52].

A célfüggvényeket a technológiatervezői szempontból 3 fő csoportba osztottam. Ezek közül az egyik azon célfüggvények osztálya, mely a termék minőségét a vevői kívánalmaknak megfelelően állítja be, és a fellépő károsodásokat, hibákat minimalizálja. A második osztályba a fajlagos költségeket minimalizáló célfüggvények tartoznak, melyek között igen fontos helyet foglalnak el az adott húzási művelethez tartozó fajlagos energiafelhasználást minimalizáló függvények. A harmadik szintén nagyon fontos célfüggvény-osztály a termelékenységet maximalizálja, így alkalmazásakor a lehető legnagyobb óraterjesítmény valósulhat meg. Természetesen, ezen osztályok nem különülnek el élesen egymástól.

A nemlineáris optimalizálási feladatok igazi jelentőségét széles körű gyakorlati alkalmazhatóságuk és az alkalmazások fontossága adja meg. A feladatok elméleti megoldása mellett, napjainkban a megoldó algoritmusok és a szoftverek előnyös tulajdonságainak a megléte is nagyon lényeges szempont (pl. minél kisebb számítási időigény és memória kapacitás, a mérethatárok növelése, könnyen kezelhető és változtatható programok). Ez a magyarázata annak, hogy a nemlineáris optimalizálás esetén a feladatok és a megoldó algoritmusok matematikai vizsgálatán túl, meghatározóan fontos a megoldó algoritmusok számítógépes implementálása és az

experimentálás. Az operációkutatásban az elméleti vizsgálatokon túlmenően a cél mindig a megoldás kiszámítása (képletek helyett zömében algoritmusok alkalmazásával) ahol sok egyéb szempontot is figyelembe kell venni. Általában azok az algoritmusok, melyekkel a célfüggvények megoldhatók, jellemzően túlzottan nagy számítási igénnyel bírnak.

A huzalhúzási technológiát mind a húzóerő, mind az alakításhoz szükséges teljesítmény-igény szerint optimalizáló célfüggvényeket írtak fel a [53, 54, 55]-ben. Sok szerző használt károsodás-elméleti és törési kritériumokat, hogy a huzal szimmetria-tengelyén történő felszakadást (central burst) és más károsodások valószínűségét minimalizálják, vagy megszüntessék azokat [56, 57, 58]. Sok cikk [59, 60, 61] vizsgálta a mikroszkopikus-károsodási feltételeket, figyelembe véve a hibák és repedések tulajdonságait, például Kuboki et. al. [62] a repedések indexelését használva, az Oyane feltétel alapján számította az anyag-kontinuum felszakadásaiból származó törést a sorozathúzás esetére.

Néhány szerző algoritmizált optimalizáló eljárást határoztak meg a huzalhúzás esetére [63, 64, 65, 66, 67]. A szerzők a következő célfüggvényeket írták fel:

- Az alakításhoz szükséges teljesítmény-igényt/ húzóerőt minimalizáló,
- A károsodást minimalizáló,
- A fokozatonkénti alakváltozás mértékét a maximalizáló,
- A végtermékben az alakváltozás és a húzófeszültség eloszlásának egyenletességét biztosító.

Az algoritmusok végeselemes módszerekkel illetve a VEM-en alapuló szoftverekkel voltak összekapcsolva, ami azt jelenti, hogy az algoritmus minden lépésében (iterációjában) egy (vagy több) végeselemes számítást végez el.

Bár ezek a tökéletesített optimalizáló eljárások már jól meghatározzák a valós/ ténylegesen fellépő optimumokat, mégis ezek az algoritmusok rendkívül nagy számítási igénnyel bírnak a VEM-hez való kapcsoltságuk miatt. Roy és társai által [64] egy 5 fokozatú ellenhúzás nélküli sorozathúzás esetére kapott optimális megoldáshoz 100 végeselemes számítás kellett elvégezniük, melyhez nettó 10 óra számítási idő volt szükséges. Ezen optimalizáló eljárásoknak egy másik hátránya, hogy nem számolnak a fokozatonként fellépő ellenhúzó erővel, azaz nincsenek kiterjesztve minden húzóberendezéssel végzett technológiára. További hátrány az is, hogy a felhasznált anyagtörvények a cikkek jelentős részében nem veszik figyelembe az alakváltozás okozta felkeményedést.

A jól definiált, zárt, analitikus formulákkal leírt modelleknek az is a nagy előnyük, hogy az általuk számolt változókra vonatkozó optimalizáló célfüggvények nemcsak felírhatóak képletszerűen, hanem a modellből adódóan több esetben analitikai eszközökkel, számítógépes közelítés nélkül, jól és gyorsan számíthatóak.

A következőkben az általam kialakított, a huzalhúzást leíró komplex modellen definiálok és formalizálok célfüggvényeket.

4.1. Kihasználtsági tényezőkkel történő optimalizálás

Első lépésben a huzalban ébredő erő- és feszültség állapotot jellemző paraméterekre vonatkozóan kerestem célfüggvényeket.

A húzhatósági feltétel meggondolásai alapján egy új mérőszámot vezettem be, az átlagos kihasználtsági tényezőt, melyet a következő egyenlet ír le:

$$\xi_{\text{elm}} = \frac{\sigma_{\text{átl}}}{k_{f2}} = \frac{F}{A_2 k_{f2}} \quad (61)$$

Ezen tényező megmutatja, hogy az adott fokozatban az anyagjellemzők által meghatározott biztonságos feszültség tartomány mekkora részét használjuk ki az adott alakítás során.

Mint látható, a húzóerőből adódó átlagos húzófeszültségre vonatkozó fajlagos értékről van szó. Elméleti meggondolás alapján egy **felső korlátot** kapunk az átlagos kihasználtsági tényezőre, mivel ha a kihasználtsági tényező értéke 1, akkor a húzószerszámot követő részben is fellépő egytengelyű feszültségi állapot már elegendő mértékű lesz a folyás megindításához a húzási irányba [2]. Ennél nagyobb feszültségek esetén a húzódob és a szerszám közötti huzalrész viselkedése hasonló lesz a szakítópróbához. A huzal megfolyása után a keresztmetszet tovább csökken, és ha elegendően nagyobb az átlagos húzófeszültség a termék anyagának keményedéséhez képest is, akkor kontrakció, majd szakadás lép fel. Kisebb mértékben túllépve a felső korlátot ingadozó huzalátmérőt tapasztalhatunk, illetve a repedés képződés és terjedés folyamata is felgyorsul.

Az átlagos kihasználtsági tényező analógiájára bevezettem a maximális kihasználtsági tényezőt, melyet a következő összefüggéssel írtam fel:

$$\zeta_{\text{elm}} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{R_M} \quad (62)$$

A kihasználtsági tényezőkkel történő optimalizálás esetén az átlagos és a maximális kihasználtsági tényezők által korlátozott értelmezési tartományon a fokozathoz tartozó alakváltozást maximalizáló (63) célfüggvényt alkalmazzuk.

$$\max \{ \varphi | \xi = \text{konst}, \zeta = \text{konst} \} \quad (63)$$

A maximális kihasználtsági tényező értékének 1 alatt tartása elméletileg biztosítja a repedések, belső felszakadások, kúpos szakadás megjelenésének elkerülését, mivel a keresztmetszet minden pontjában ható feszültség kisebb, mint a szakítószilárdság.

Azt, hogy adott fokozatban mennyire merítettük ki az anyag alakíthatóságát anélkül, hogy a fent említett károsodások bekövetkeznének, az átlagos és a maximális kihasználtsági-tényező (61,62) fejezi ki.

Elméletileg a kihasználtsági-tényezőknek az a felső határértéke, amikor a károsodás bekövetkezik az $\xi_{\text{elm}} = 1$ illetve az $\zeta_{\text{elm}} = 1$, ami azonban csak minden befolyásoló tényező pontos ismerete esetében igaz.

A termék minőség szempontjából a kihasználtsági tényezőkre vonatkozóan egy **alsó korlátot** is meg kell határozni. A maximális feszültség modellel foglalkozó fejezetben is említett holtsarok képződés illetve a felületi réteg forgácsolás jellegű leválasztása

(hántolás) az alakváltozástól függő jelenségek. Ide tartozik még a szakirodalomban central burst-nek elnevezett jelenség is, melynek oka szintén az, hogy az „alakítási zóna” nem ér össze a szerszámban egy keresztmetszeten sem, viszont még holt sarok sem tud kialakulni. Ekkor a középső, nem képlékenyen alakváltozó rész szakaszosan felszakad, és ha a húzott szálaban fellépő húzófeszültség következtében a lecsökkent méretű, ép huzalkeresztmetszeten szakaszos kontrakció lép fel, ún. „bambuszosodás” jön létre. A felületen is érzékelhető átmérő ingadozás a belső felszakadásokra, repedésekre utal, lényegében selejt lesz a termék. Ezek a jelenségek a szerszámkúpszög növekedésével, és az alakváltozás csökkenésével válnak egyre valószínűbbé [37]. A kihasználtsági tényezőkkel való optimalizáláskor azért, hogy ezeket a jelenségeket elkerüljük, a tényezőértékeket a lehető legnagyobbra kell választanunk, mivel akkor a legkisebb a valószínűsége az „alakváltozási zóna” hiányosságaiból adódó hibáknak, ha az alakváltozás, és ebből kifolyólag a feszültségek és a kihasználtsági tényezők is a még biztonsággal megengedhető lehető legnagyobbak. **Tehát a felső korlát által megengedhető legnagyobb értékűre kell választanunk a kihasználtsági tényezőket, azaz elméleti esetben 1-re.**

Azonban modelljeink hordoznak bizonyos hibát, illetve az anyagjellemzők sem homogének, sőt a gyártási folyamat gyakorlati megvalósítása is behoz a számításokba egy bizonytalansági tényezőt. Ezért ezt a károsodási határértéket egy biztonsági tényező figyelembe vételével határozhatjuk meg, mely során egy n biztonsági tényezővel osztjuk a kiterhelési tényezőket. A kihasználtsági tényezők határértékét így a következőképpen határozhatjuk meg: $\xi = \frac{1}{n} \cdot \xi_{\text{elm}}$ és $\zeta = \frac{1}{n} \cdot \zeta_{\text{elm}}$.

Az **alsó és a felső korlátok** alapján a következő optimalizációs célfüggvény állítottam fel: a kíváncsom (megszorító feltétel) az, hogy minden termékminőséget érintő hibától mentesen készüljön el egy termék, így ne forduljon elő károsodás egyetlen fokozatban sem a biztonsági tartományból való kilépéssel, ugyanakkor minden húzási fokozatban a lehető (még biztonságos) legnagyobb húzóerővel alakítsuk a huzalt, ezáltal a lehető legnagyobb alakítást elérve egy adott szerszámban. Ezt úgy érem el, hogy minden fokozatban a kihasználtsági-tényezőket a biztonsági tényezőt figyelembevevő határértékére állítom be. Gyakorlatban úgy valósítom meg, hogy egy sávot képezek a határérték körül, pozitív és negatív irányba kis értékű eltéréssel. Az alakváltozás nagyságát ekkor úgy változtatom, hogy az optimális kihasználtsági-tényező értékek, e rögzített felső és alsó értékek közé essenek. Ekkor a felső korlát a termék repedésképződéses és megfolyásos minőséghibái ellen nyújt biztonságot, míg az alsó korlát a central burst jellegű károsodások ellen véd. Ez a megoldás a számításigényt is csökkenteti, hiszen nem egy pontos értéket kell iteratív módon megtalálni, elég a tartományba beletalálni. Elvileg is indokolt egy sávon belül keresni az optimális kihasználtsági tényezőt, hiszen az „ n ” biztonsági tényező értékét nem ismerjük pontosan.

Ebbe a minőség jellegű optimalizáló célfüggvénybe egy mennyiségi jellegű és egy költségminimalizáló célfüggvény is bele van kódolva, hiszen a célfüggvényünk azt kívánja, hogy a felső korlátnak megfelelően, a lehető legnagyobb alakváltozás jöjjön létre a huzalban. Ekkor a fokozatok száma is minimalizálódik, némileg rövidebb idő alatt több terméket lehet legyártani. A fokozatok számának csökkenése azt is jelenti, hogy kevesebb szerszám elegendő a technológiához, illetve kevesebb tárcsára kell felcsévélni a húzási sorozatban. A szerszámköltségekkel a karbantartási költség is csökken.

A huzal húzásához tartozó „n” biztonsági tényező meghatározását alapvetően a gépészeti tervezői irányelvek [33] analógiájára alapoztam. A gépészeti berendezéseknél is folyáshatárra méreteznek. Az üzemmódra és a gyártáskor fellépő bizonytalanságokra vonatkozó ajánlásokat, a húzóberendezések, valamint az elvégzendő számítási, tervezési módszer sajátosságait is alapul véve határoztam meg az eredő biztonsági tényezőt.

Az egyes rész-biztonsági tényezők a gépészeti ajánlásokkal:

1. *Az alkatrész vagy szerkezeti egység jelentőségének hatása*

A megadott határok között lehet figyelembe venni az esetleges alkatrész meghibásodás vagy tönkremenés könnyű és gyors javíthatóságát, illetve cserélhetőségét. Ha emberélet vagy több gép (gépcsoport) termelését az alkatrész tönkremenetele veszélyezteti, úgy nagyobb biztonsággal kell méretezni. Értéke: $n_1=1,2-1,7$.

2. *A számítások hibájának hatása*

Ide tartozik, hogy mennyire pontos – vagy közelítő ismeretek alapján történik a méretezés (pl. részletesen ismerik a szerkezet erőjátékát, ám legtöbbször elkerülhetetlen, hogy elhanyagolással méretezzünk.) A hibás tervezés itt nem veendő figyelembe. Értéke: $n_2=1,1-1,3$.

3. *Anyagszerkezettani és technológiai megbízhatóság hatása*

Itt kérdéses, hogy az anyagszerkezetre jellemző tulajdonságokat mennyire sikerül pontosan megadni. Értéke: $n_3=1,1-1,4$.

4. *Kivitelezés pontosságának hatása*

Ezen belül kiemelten fontos a gyártáshoz szükséges gépi felszereltség és az elkészítéshez rendelkezésre álló szakemberek megbízhatósága. Értéke: $n_4=1,1-1,3$.

5. *A szükséges ellenőrzés pontosságának hatása*

Megvalósulása kiterjed az összes előző szempontra. Emeli a megbízhatóság nagyságát az ún. aktív méretellenőrző berendezések használata és a mérési terv készítése a gyártásnál. Értéke: $n_5=1,05-1,4$.

Az eredő biztonsági tényező: $n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot n_5 = 1,7-5,6$.

A fent felsorolt szempontok alapján a hideg-huzalhúzást a következők szerint értékeltem:

1. A húzóberendezés elég egyszerű, biztonságos felépítésű. A védőrácsok huzalszakadás esetén nem engedik, hogy emberéletben kár essék. A szerszámok cseréje nagyon egyszerű, ahogy a kopott szerszámok felújítása is. A berendezés többnyire nem áll bonyolult alkatrészekből, így helyettesíthetősége nem okoz komolyabb problémát. Ezért: $n_1 \sim 1,2$.
2. Ennél a pontnál a sorozathúzásra felírt Geleji modellnek kumulált abszolút hibája és a Hajduk-féle alakítási szilárdság szinte tökéletes pontosságából indulhatunk ki. Ekkor a már ismert adatok alapján $n_2 \sim 1,15$.
3. Ebben a pontban leírtakat kísérlet keretében vizsgáltam meg. A számomra fontos anyagjellemzők az alakítási szilárdság illetve a szakítószilárdság értékek. Ezen értékek pontosságának vizsgálatánál, a húzóipari beszállító által előállított adott anyagminőségű hengerhuzalból adott húzási technológiai lépések után nagyszámú szakítópróba elvégzése szükséges. A vizsgálatokból kapott $R_{p0,2}$ –

egyezményes folyáshatár, és szakítószilárdság adatok szórásából megállapítható az n_3 értéke.

A Miskolci Egyetem Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének Képlékenyalakító Laboratóriumában Al59 alumíniumötvözet huzalból 12 mm-es átmérőről 2,21 mm kiinduló átmérőre 12,74 m/min-es kifutó-huzalsebességgel fokozatonként, 14 fokozatban végeztem húzási kísérleteket. A húzott termékből összesen 50 darab szakító-próbatestet munkáltam ki, melyeket a INSTRON 5982 (100 kN) univerzális mechanikai anyagvizsgáló gépen elszakítottam. A vizsgálatból kapott $R_{p0,2}$ – egyezményes folyáshatár, és szakítószilárdság adatok relatív hibáit vizsgáltam a már bemutatott 1-hibanormával, majd abból állapítom meg n_3 értékét.

A 6. táblázatban látható, hogy a névleges értékhez képest való eltérés kicsi, a hibák átlaga kicsiny érték. A hibanormából kiindulva a $n_3=1,016$ érték választható. Az ajánlás szerint a minimális érték 1,1.

4. A technológia egyszerűségének következtében, a berendezések robosztusak és nem bonyolultak, kevés meghibásodási lehetőséggel. Kis gépesítési igénye van az eljárásnak, illetve a gyártás indítását kivéve, emberi beavatkozást nem igényel a működtetése. Ezeket figyelembe véve a gépi felszereltségi kritériumot könnyedén lehet teljesíteni. A becsült biztonsági tényező $n_4=1,1$.

	R_M	R_{p02}
Átlagos érték (MPa)	316,9	287,0
A mért adatokhoz tartozó 1- norma	0,013	0,016

6. táblázat. Al59 anyagú huzal 14 fokozaton történő húzása után a végtermékből kimunkált 50 szakító próbatest abszolút hibanormája a folyáshatár és szakító szilárdság átlagos értékéhez képest.

5. A technológia egyszerűsége miatt kevés ponton kell ellenőrizni a gyártási folyamatot termelés közben. A húzó-berendezések és a kenőanyag megfelelő megválasztásánál a szerszám kopása korlátok között tartható, és szerszámok kopásának sebessége a mérnökök előtt nagyon jól ismert. A megfelelő időközönként elvégzett méret ellenőrzés kielégítőnek mondható. Az elmondottak alapján $n_5=1,2$.

A rész biztonsági tényezők összeszorozása után a biztonsági tényezők $n=1,85$. Ha az ajánlásokban a rész biztonsági tényezőkre vonatkozóan leírt alsó korlátokat is figyelembe vesszük, akkor $n=2,0$.

Ebből kifolyólag a biztonsági tényezők figyelembe vételével a kihasználtsági-tényezőket 0,5...0,55-ra választjuk az optimalizálás során.

Kifejtve az átlagos kihasználtsági-tényezőt leíró formulát:

$$\xi = \left(\frac{1}{2} + \frac{k_{f1}}{2k_{f2}} \right) \left(\frac{(1 - 0,385\alpha)\Delta A \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right)}{A_2 + \frac{\Delta A}{2} \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right)} + 0,77\alpha \right) \quad (64)$$

Az egyenletből látható, hogy az átlagos kihasználási tényező a be- és kifutó szál folyáshatárának arányán kívül, a geometriai jellemzőktől és a súrlódási együtthatótól függ.

Tételezzük fel, hogy szűk sávban fogadjuk el az átlagos kihasználtsági tényező értékét, (legyen pontosan 0,5) és vizsgáljuk meg, hogyan változik a húzáshoz szükséges teljesítmény.

Legyen i a fokozatokat számláló változó például egy csúszva húzó berendezés esetén. Egy tetszőleges fokozat után az $F_i v_i$ adja meg az adott húzódobon szükséges teljesítményt. Ez megegyezik $\xi_i \cdot k_{fi} \cdot A_{ki} \cdot v_{ki}$ szorzattal. Viszont az anyagtérfogat-állandóság miatt: $A_{ki} v_{ki} = A_0 v_0$, ahol A_0 a huzal kezdő keresztmetszete a húzási folyamatban, és v_0 a huzalnak a húzási kezdősebessége, melyek a technológia tervezésének rögzített bemenő paraméterei.

Ekkor az összes fokozaton leadott teljesítményt a következő:

$$P_{össz} = \sum_{i=1}^n \xi_i k_{f2} A_0 v_0 \quad (65)$$

Mivel minden fokozatban állandó értékűnek határoztuk meg az átlagos kihasználtsági-tényezőt, ezért látszik, hogy fokozatonként csak a kilépő szál folyáshatára változik. Így a szumma értékét csak a huzalanyag keményedése illetve a fokozatok számának nagysága határozza meg. A keményedési görbék jellegéből következően jellemzően ezt azt jelenti, hogy a kisebb fokozatszám esetén kisebb a meghajtás teljesítmény igénye is.

A termék minőségére és alakíthatóságára vonatkozóan más optimalizáló célfüggvények is léteznek, melyeket a károsodás-elméleti alapokon lehet megfogalmazni. Ezek a modellek más hipotézisek és feltételezések alapján jelzik a veszélyt, amikor az anyag károsodhat. Az adott célfüggvények közül azt kell választanom, amelyik egy adott fokozatban, a technológia szempontjából történő tönkremenetelt kisebb alakváltozásnál is jelzi, hiszen így mind a túl nagy feszültségből, mind az alakítási zóna hiányos térfogatkitöltéséből adódó károsodási mechanizmus által létrejövő hibákat is kivédhetjük. Az egyik ilyen, nagy irodalommal rendelkező modell a Lemaitre károsodás elmélet, mellyel végelelemes vizsgálatot végeztem.

A Lemaitre károsodás elméleti modellből [68] adódó eredményeket vetettem össze a kihasználtsági tényezők által meghatározott értékekkel. A Lemaitre elmélet kontinuum mechanikai és termodinamikai alapokon nyugszik, nagy alakváltozás feltételezése mellett, azonban a termék anyagának szövetszerkezetétől, inhomogenitásától, zárványosságától, porozitásától eltekint. Pusztán azt a tartományt (esetünkben alakváltozási tartományt) határozza meg, melyben az anyag mikroszerkezetétől függetlenül, nem következhet be károsodás.

A validáló és összehasonlító vizsgálatok [69,70] megmutatták, hogy a többi károsodás elméleti leíráshoz képest is pontos eredményt szolgáltat a Lemaitre modell.

Lemaitre modellje az anyag termodinamikai disszipációs potenciáljait vizsgálja, illetve egy fajlagos energiát is meghatároz, melynek elérésekor a makroszkópikus tönkremenetel bekövetkezik.

A modell 3 különböző károsodási paramétert számol ki: D , D_c , D_{rel} .

A D az abszolút károsodás, mely a disszipációs potenciálból számolt érték, és az anyag alakváltozó képességét jellemzi. Az abszolút károsodást a következő differenciálegyenlettel lehet leírni:

$$dD = \frac{f(\eta)k_f^2}{2 \cdot E \cdot S \cdot (1-D)^2} d\varepsilon^p, \quad (66)$$

ahol E a Young modulus, S károsodási ellenállás, ε^p az effektív képlékeny alakváltozás,

$$f(\eta) = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu)\eta^2, \quad (67)$$

ahol ν a Poisson állandó és

$$\eta = \frac{\sigma_{nom, \text{átl}}}{k_f} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3k_f}. \quad (68)$$

A D_c a kritikus károsodás, melyet az abszolút D károsodással kell összevetni. Ha egyenlő a két érték, akkor bekövetkezik a makroszkópikus károsodás.

$$D_c = D_{1c} \frac{R_M^2}{(k_f \sqrt{f(\eta)})^2} (1-D)^2, \quad (69)$$

ahol D_{1c} a kritikus károsodás egytengelyű terheléses esetben.

A D_{rel} az abszolút és a kritikus károsodás viszonyát jellemzi:

$$D_{rel} = \frac{D}{D_c}. \quad (70)$$

A Lemaitre modell előnye az, hogy egytengelyű szakítópróbából megkaphatóak a számoláshoz szükséges paraméterek, mivel a D_{1c} értéke a következő:

$$D_{1c} = 1 - \frac{R_B}{R_M}, \quad (71)$$

ahol R_B a szakadási feszültség, és a károsodási ellenállás pedig:

$$S = \frac{R_M^2}{2E \frac{D_{1c}}{\varphi_B - \varphi_{R_M}}}, \quad (72)$$

ahol φ_B a logaritmusos szakadási nyúlás, míg a φ_{R_M} a szakítószilárdsághoz tartozó logaritmusos nyúlás.

Az Msc MARC szoftver segítségével, huzal húzásakor fellépő károsodás értékeket vettem össze a kihasználtsági tényezőkkel Al59 anyagminőségű durva-hengerhuzal esetén.

A Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet INSTRON 5982 (100 kN) univerzális mechanikai anyagvizsgáló gépén végzett szakítópróbákból megkaptam a 12 mm átmérővel rendelkező huzal károsodásméleti paramétereit, melyek a következők voltak:

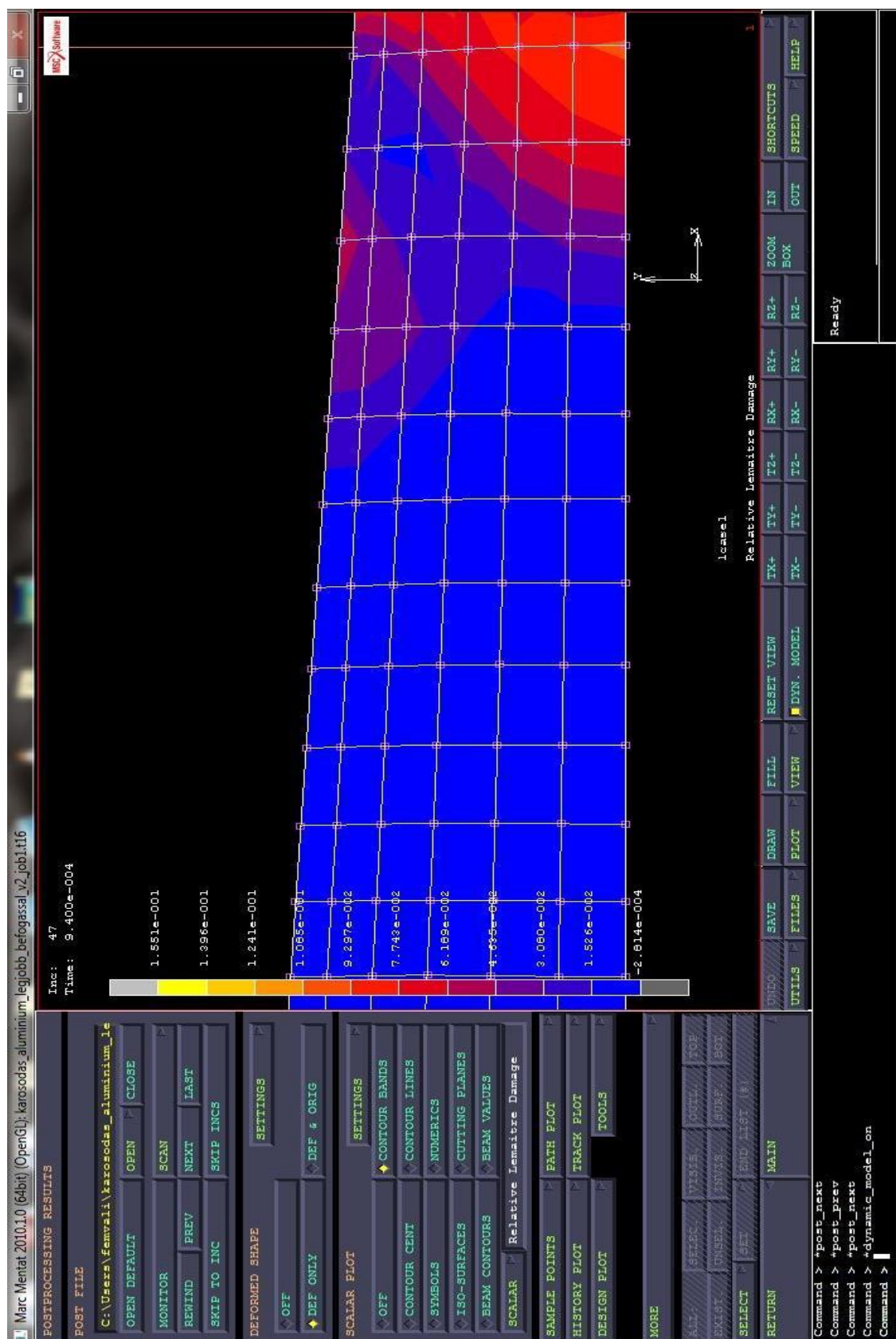
- $\varphi_{RM}=0,14$
- $S=0,563$
- Valódi szakító szilárdság, $\sigma_M=196,7$ MPa
- $D_{1c}=0,4307$
- $R_B=97,5$ MPa

Ezt követően az MSC Marc szoftverrel ezt követően végelemes vizsgálatot végeztem, ahol az adott anyagú huzalnak a húzását szimuláltam, és a számolt relatív Lemaitre károsodási értékeket figyeltem. A szerszám félkúpszöge 3° , a húzási sebesség 10m/s-ra lett beállítva. Az átmérő csökkenést állandó értéken tartva, a huzal befutó átmérőjét változtattam. A huzal anyagának keményedési görbét a Hajduk modellnek megfelelően építettem be a MARC rendszerébe. A kiszámolt kihasználtsági értékeket összevettem a relatív Lemaitre károsodási értékekkel.

A vizsgálat során azt tapasztaltam, hogy a kihasználtsági tényező mindig hamarabb éri el a kritikus értékét, mint a relatív Lemaitre károsodás. A 36. ábrán látható, hogy amikor a befutó átmérő 1,3 mm és a kifutó átmérő 0,9 mm, akkor az átlagos kihasználtsági tényező 1 értékénél a relatív Lemaitre károsodási érték 0,11. Így míg a kihasználtság tényező még elméleti esetben is (tehát amikor minden paramétert a valóságnak megfelelően ismerünk) károsodást jelez, addig a képlékeny károsodás még alacsony, biztonságos szinten van.

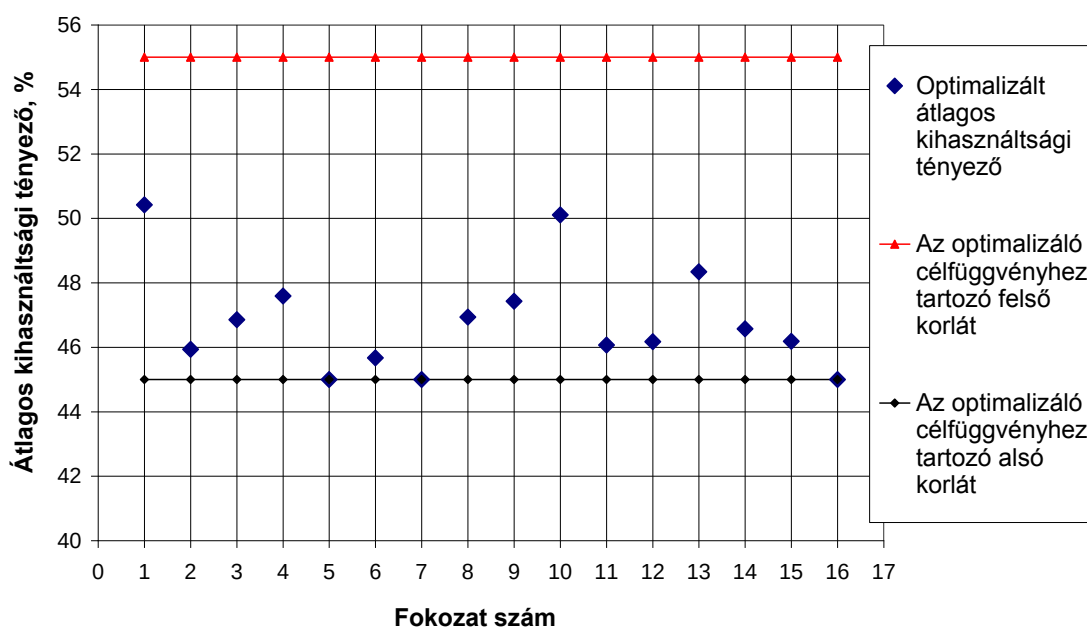
Ezen vizsgálat alapján a kihasználtsági tényezőkkel felírt célfüggvényt találtam megfelelőnek a huzaltermék minőségének biztosítására.

A kihasználtsági tényezőkkel való optimalizálást bemutatom, a DHCF 17 húzógépen alkalmazott üzemi technológia esetén [36]. Az üzemi technológia paraméterei: 17 fokozat, C10 acél anyagminőség, az utolsó fokozat után 8,5 m/s végsebesség, 1,4 mm-es kezdő átmérő, és 0,35 mm-es kész átmérő. A kenőanyag: 2,5 % kálszappan + 1 % ricinusolaj tartalmú emulzió.



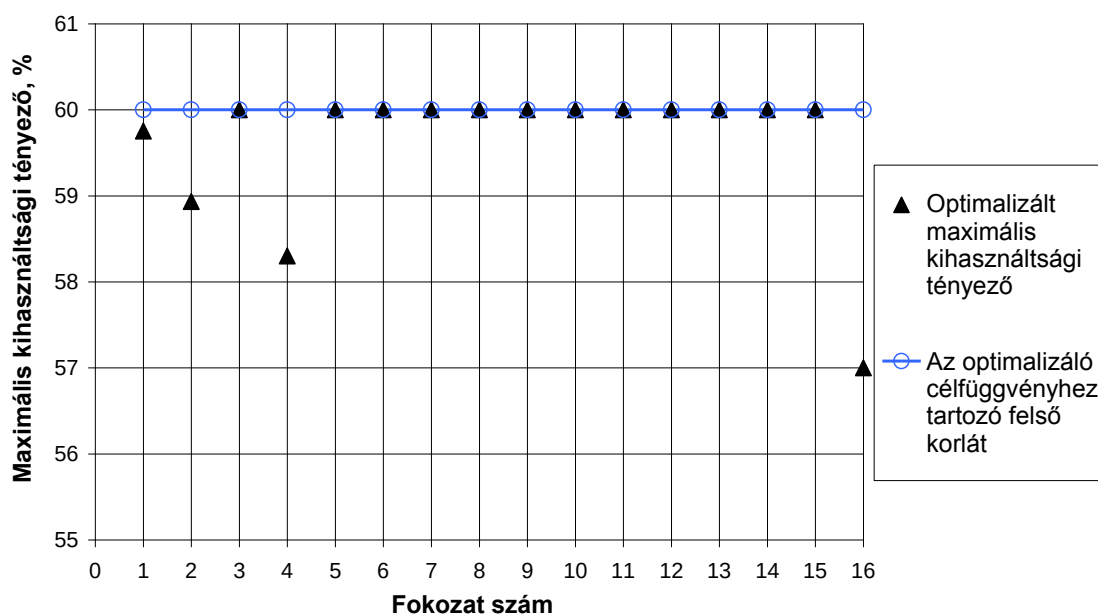
36. ábra. MSC Marc szoftverrel végzett végeleemes modellben a relatív Lemaitre károsodási tényező eloszlása a kúpos szerszámüregben lévő huzalrészben. A húzási sebesség $v=10$ m/s, a befutó átmérő 1,3 mm, az alakítás utáni átmérő 0,9 mm.

A 37. ábrán láthatók az egyes fokozatokban az optimalizált átlagos kihasználtsági tényező értékek. Látható, hogy az optimalizációs eljárás ebben az esetben a kihasználtsági tényezőket a kritikus értékek körül meghatározott biztonsági sávba rendeli (az átlagos kihasználtsági tényezőkre $0,5 \pm 0,05$ -t, míg a maximális kihasználtsági tényezőkre $0,55 \pm 0,05$ -t választottam). Az optimum kereső eljárás egy véges nagyságú lépésközzönként változtatja az alakváltozást, és így keresi az optimális értéket, ahol a kihasználtsági tényező a megfelelő sávba esik. Az alakváltozási-lépésegységek finomításával a kihasználtsági tényező fluktuációja is csökken, jobban besimítható az elvárt értékre és a biztonsági határsáv szűkíthető.

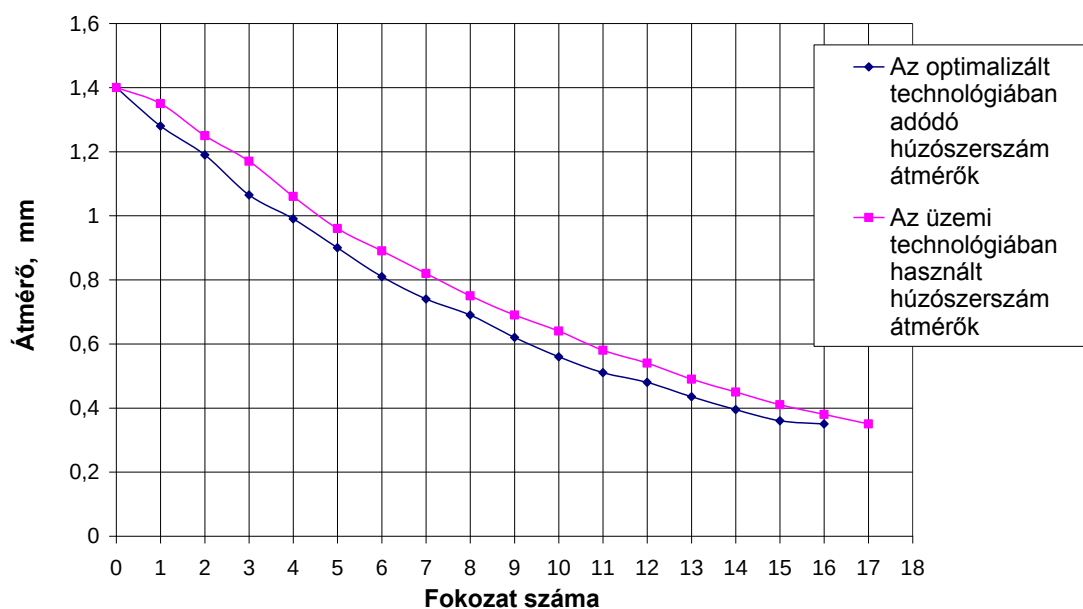


37. ábra. A DHCF 17 berendezésen optimalizált technológiának átlagos kihasználtsági-tényezői, és az optimalizálási határsáv alsó és felső korlátja. Anyagminőség C10, $v_{kész}=8,5$ m/s.

A 38. ábra a maximális kihasználtsági tényezőre végzett optimalizálás eredményeit tartalmazza. Itt, csak a felső határt mutatom be, mivel az optimalizálás során 55%-os középérték esetén is a 60 %-os felső határon kellett elfogadnom a kihasználtsági értékeket, annak érdekében, hogy az átlagos kihasználtsági tényezőre vonatkozó optimalizálás is teljesüljön.



38. ábra. A DHCF 17 berendezésen optimalizált technológiának maximális kihasználtsági-tényezői, és az optimalizálási határsáv alsó és felső korlátja. Anyagminőség C10, $v_{kész}=8,5$ m/s.



39. ábra. A DHCF 17 húzógépen végzett méréskor használt és az optimalizált technológia húzószerszám átmérői. Anyagminőség C10, $v_{kész}=8,5$ m/s.

A 39. ábra a DHCF 17 ipari technológia példáján bemutatja, hogy a kihasználtsági tényezőkkel való optimalizálás minimalizálja a fokozatok számát (biztonságosan). A 17 fokozat helyett 16 fokozatban megoldja az adott összes alakváltozást.

A fentiek alapján kijelenthetem, hogy olyan optimalizáló célfüggvényt írtam fel az átlagos és maximális kihasználtsági tényezők segítségével, amely azon kívül, a húzási folyamat közben történő károsodást a legbiztonságosabban elkerülhetővé teszi, mennyiségi és költséghatékonysági szempontból is maximalizál.

4.2. Optimális fajlagos alakítási munkához tartozó lágyító hőkezelés helyének meghatározása a technológiai sorban

Az ipari technológiáknál gyakran előfordul, hogy egy adott huzalon olyan nagy alakváltozást kell végrehajtani, amelyet az anyag alakváltozó képessége nem bír el repedés, szakadás, tönkremenetel nélkül. Sokszor olyan vevői igény is fellép a késztermék mechanikai tulajdonságait illetően, amely a huzal alapanyagból, pusztán az alakváltozási keményedés által nem biztosítható. Ha túlzott mértékben felkeményedik az anyag az elvárásokhoz képest, illetve az alakíthatósága kimerül, akkor a húzott terméket lágyítani kell hőkezelés útján. Ekkor a keménység, folyáshatár, szakító szilárdság a szilárdsági gyakorlatilag az alakítatlan állapotnak megfelelő szintre csökken. Ezen kívül a húzott készterméket – a megrendelés szerint – normalizálhatják, edzhetik vagy nemesíthetik is.

Az ipari gyakorlat szerint, a húzási sorozatba beiktatott köztes hőkezelést a lehető leghamarabb elvégzik, hogy a továbbiakban már ne kelljen lágyítani a húzási sorozat befejezéséig. A hőkezelésig elvégzett alakváltozás nagyságát, így két féleképpen határozzák meg: egyrészt úgy, hogy a lágyítást követő húzási sorozat végén a vevői kívánalmaknak megfelelőek legyenek a huzal mechanikai tulajdonságai. Másrészt úgy, hogy még éppen kihasználható legyen az anyag alakváltozó képessége, ezáltal a lehető legnagyobb alakváltozást végrehajtva anélkül, hogy a huzalban egy tönkremeneteli folyamat megindulna. Ez utóbbi esetben a húzási műveletek után végzik el a szükséges hőkezeléseket.

A második esetet vizsgálva felvetődik egy optimális megoldást biztosító célfüggvény kialakításának lehetősége. Ugyanis itt azt is figyelembe kell vennünk, hogy az alakváltozás okozta felkeményedés miatt, a nagyobb összes alakváltozás felé haladva egyre nagyobb fajlagos munkát kell kifejtenuünk ugyanakkora mértékű fokozatonkénti alakításhoz. Lágyítás után az egységnyi alakításhoz szükséges fajlagos munka újra a kezdőértékre csökken le, így az összes alakítási munka nagyságát befolyásolja a hőkezelés helyének megválasztása a technológiai sorban.

Az optimalizálás célja tehát az, hogy megtaláljuk azt a lágyítás előtt megvalósítandó alakváltozást, amely után hőkezelve az anyagot, biztosítható, hogy a hőkezelést megelőző fajlagos alakítási munka és a hőkezelés utáni fajlagos alakítási munka összege (vagyis a befektetett összes alakítási munka) minimális legyen.

A fajlagos alakítási munkát leíró egyenlet:

$$W = \int_0^{\varphi_{\text{lágyítás}}} k_f(\varphi) d\varphi + \int_0^{\varphi - \varphi_{\text{lágyítás}}} k_f(\varphi) d\varphi, \quad (73)$$

ahol $\varphi_{\text{lágyítás}}$ a köztes lágyításig végrehajtott alakváltozás.

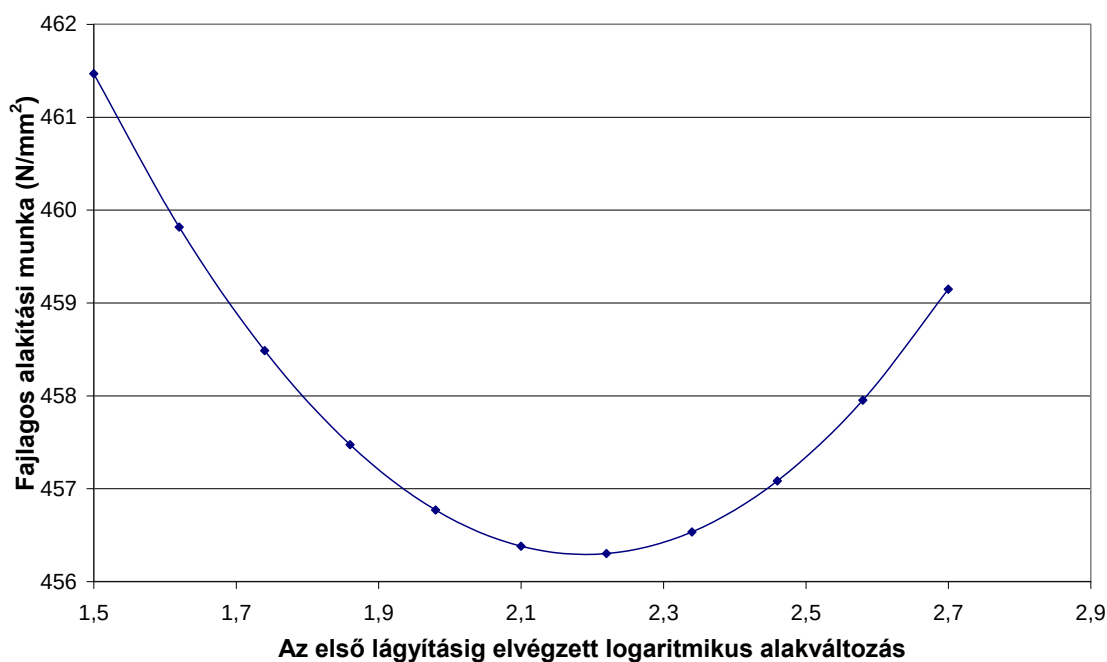
Az alakítási szilárdságot az általam elfogadott Hajduk egyenlettel modellezem itt is, így az analitikus függvényt behelyettesítve az integrálba, numerikusan számíthatóvá válik a fajlagos alakítási munka.

A Hajduk függvénnyel előállított fajlagos alakítási munka modelljének segítségével megvizsgálhattam, hogy ennek a célfüggvénynek van-e létjogosultsága, azaz a triviális, az iparban már eddig is alkalmazott megoldástól különbözik-e, az optimalizált eredmény.

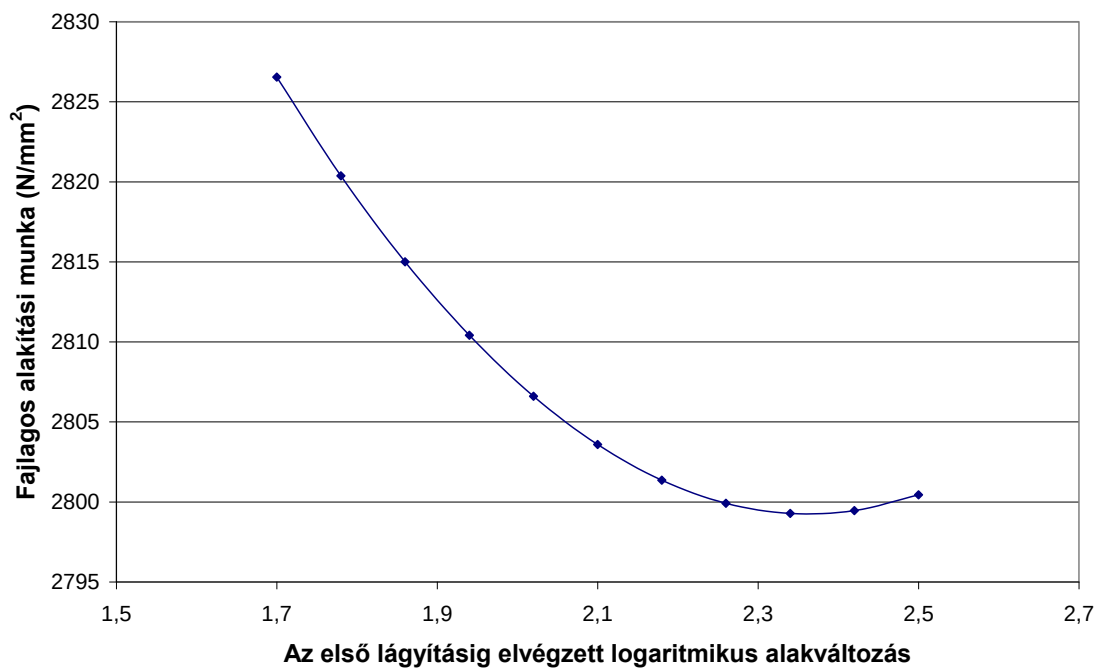
Azt ellenőriztem le, hogy van-e, olyan – az anyag alakváltozó képességének kimerüléséhez tartozó alakváltozásnál kisebb – alakváltozás, amelynél ténylegesen minimális lesz a fajlagos alakítási munka, és így a célfüggvény használatra jogosult-e.

Több anyagminőséget vizsgáltam meg, köztük az Al99,5; C10; Cu99 jelűeket. A 40., 41., 42. ábrán, hogy alumínium esetén $\varphi=2,22$ értéknél; az acélnál $\varphi=2,34$ értéknél; a réznél $\varphi=2,64$ alakváltozásnál adódik egy helyi minimum. Ez azt jelenti, hogyha minimalizálni akarom a teljesítményfelvételt, akkor az első húzássorozatot ezeknél az alakításnál kell befejezni, és itt kell hőkezelné.

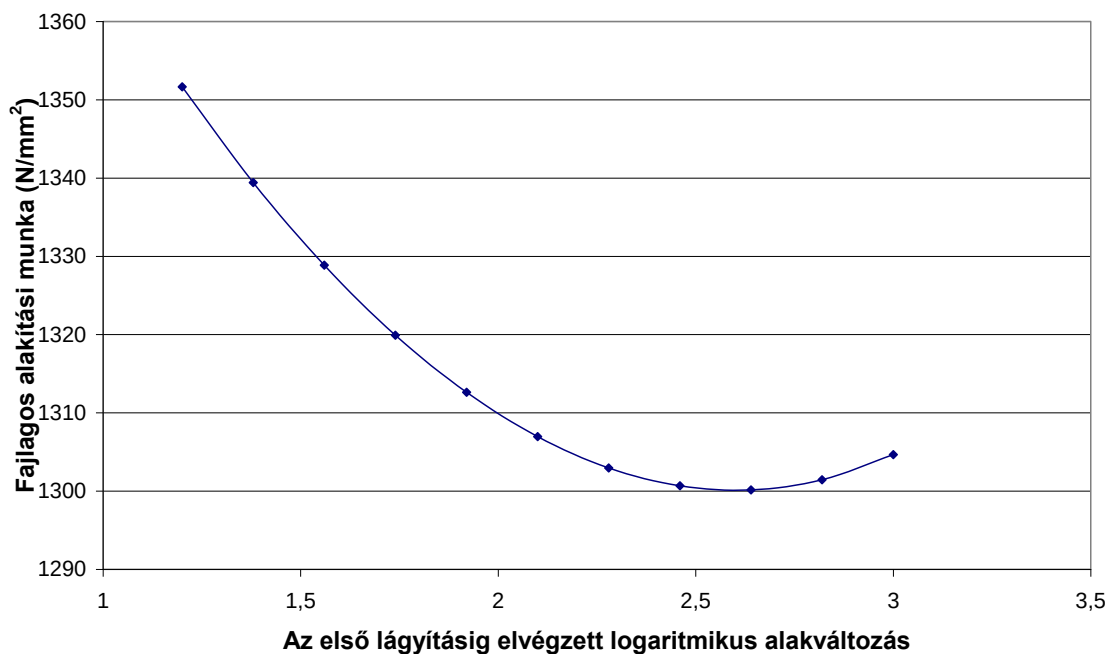
Ezeknél az anyagoknál jól látható, hogy egy felkutatandó belső minimum létezik, mivel a kapott minimumhelyek kisebbek az alakváltozó képesség kimerüléséhez tartozó alakváltozás nagyságánál, tehát az optimumot az értelmezési tartományon belül találjuk. Saját méréseim alapján az Al99,5 ötvözet alakváltozó képessége huzal húzás során $\varphi=4,5$ -nél merül ki,



40. ábra. A fajlagos alakítási munka függése az első lágyításig végzett alakítás nagyságától Al99,5 esetén, egy közbeiktatott lágyításnál.



41. ábra. A fajlagos alakítási munka függése az első lágyításig végzett alakítás nagyságától C10 esetén, azzal a feltétellel, hogy egy lágyítással a húzási művelet befejezhető.



42. ábra. A fajlagos alakítási munka függése az első lágyításig végzett alakítás nagyságától Cu99 esetén, azzal a feltétellel, hogy egy lágyítással a húzási művelet befejezhető.

Vizsgálataim alapján, ha huzal húzáskor a késztermék előállításához szükséges alakváltozás a huzal anyagának alakíthatósági határát meghaladja, és nincs a

készterméknek előírt mechanikai jellemzője vagy a lágyítás utánra maradó alakváltozás biztosítja a huzalra vonatkozó előírásokat, akkor költséghatékony a hőkezelés helyét a technológiai sorban a (73) egyenlet minimalizálásával megadni, és kapott $\varphi_{\text{lágyítás}}$ értékű alakításváltozást követően végrehajtani a lágyítást. Ezáltal egy fajlagos energia felvételt, és ezen keresztül előállítási költséget optimalizáló célfüggvényt írtam fel.

4.3. Optimális teljesítményfelvételhez tartozó kúpszög meghatározása

A húzási technológia fajlagos energiafelhasználását egy másik szerszámgeometriai paraméter, a kúpszög beállításával is minimalizálhatjuk. Egyhúzásos esetre ilyen jellegű optimalizálást már számos szerző is elvégzett, ahol a kúpszög függvényében a minimális húzófeszültséget keresték [41]. Az egy húzási fokozatnál fellépő húzófeszültségre zárt analitikus formulát megadó szerzők, az optimális kúpszöget is meg tudták analitikusan határozni. Ám ha sorozathúzásnál egyenes húzó vagy csúszvahúzó berendezéseket használunk, akkor már ellenhúzóerő is fellép az adott szerszámba befutó huzalban, és ezek a képleteket alkalmatlanná válnak az optimális kúpszög meghatározására.

En ezt a teljesítményfelvételre vonatkozó egy fokozatú húzásra értelmezett optimalizációs célfüggvényt terjesztettem ki többhúzásos berendezésekre, ezáltal általános esetben is lehetővé téve a kúpszögekkel kapott energiaminimum meghatározását.

Ezt a célfüggvényt már nem lehet analitikus explicit zárt formulával leírni, hiszen az ellenerő felléptével minden korábbi fokozat hatása megjelenik minden húzóerő értékben. Így egy adott fokozatbeli optimális kúpszöget a korábbi fokozatok optimális kúpszögei is befolyásolják. Ez implicitte teszi a célfüggvényünket, még úgy is, ha a felírásában használt húzóerő összefüggést a zárt explicit Geleji (36,37) formulával adom meg. Az optimális szög kiszámításához számítástechnikai segítség szükséges.

Az energiafelhasználás optimumának meghatározásához szükséges, a meghajtás által felvett teljesítményt leíró egyenlet a következő:

$$P_{\text{össz}} = \sum_{h=1}^H \left(\sum_{i=1}^{N_h-1} \frac{F_i v_i + (F_i - F_{\text{Ellen},i+1}) v_{\text{rel},i}}{\eta_{\text{meghajtás},i}} + F_{N_h} v_{N_h} \right) \quad (74)$$

ahol i a fokozat sorszáma, h a húzási sorozat sorszáma, N_h a h -dik sorozat fokozatainak a száma, H a húzási sorozatok száma, $v_{\text{rel},i}$ az i -dik fokozatot követő tárcsa vagy dob kerületi sebessége és a huzal sebessége közötti különbség, $\eta_{\text{meghajtás},i}$ az i -dik húzótárcsa vagy húzódob meghajtásának a hatásfoka.

Az alakváltozás létrehozásához $F_i v_i$ teljesítmény szükséges az i -dik fokozatban. Másrészt a fokozatot követően a tárcsa és a huzal felülete között létrejövő csúszvasúrlódásnak további teljesítmény igénye van. A tárcsa és a huzalköteg között $(F - F_{\text{Ellen}})$ súrlódási erő ébred, és a felületek között v_{rel} csúszási sebesség jön létre. Ezek szorzatából kapjuk a tárcsa és a huzal között ébredő ún. szakadó-felületi teljesítményt. Az erőviszonyokat a (36,37) modell segítségével kapjuk meg.

Ezt a (74) teljesítmény-függvényt kell optimalizálni N darab kúpszögre végrehajtott szoftveres kereséssel. Az i -dik kúpszög geometriájától függ az F_i , valamint minden ezt követő fokozathoz tartozó $F_{\text{Ellen},i+1}$ értéke is. A számítási igényt figyelembe véve, kétféle

optimalizálási célfüggvényt határoztam meg. Az egyikben a célfüggvény az eddig ismertetett, ahol az eredmény fokozatonként eltérő nagyságú optimális kúpszögek sorozata. A másik esetben azt a megszorítást is hozzáfűzöm a célfüggvény deklarálásához, hogy minden fokozatban az optimális kúpszögnek azonosnak kell lennie. Ez feltétel a számítás gép- és időigényét is csökkenti, ugyanakkor az ipar gyakorlat számára is kedvező, mivel az eltérő kúpszögekkel készített szerszámkészlethez képest a nagyszámú húzógyűrűk raktározását, rendszerezését, tárolását egyszerűbbé teszi. Csökken annak az esélye, hogy tároláskor a húzógyűrűk elkeveredjenek, és a szerszámok behelyezésekor rossz kúpszögű húzógyűrű kerüljön az adott fokozatba.

A fokozatonként azonos optimális kúpszöget intervallumfelező módszerrel hatékonyan meg lehet keresni a lehetséges kúpszögek (3° - 30°) tartományán. A módszer az adott tartományból kiválaszt egy értéket, majd a (74) összefüggés segítségével, megállapítja mekkora a kiválasztott kúpszöggel az összes fokozatra számított teljesítmény szükséglet. Ezt az értéket összeveti az eddig minimális teljesítmény-igényt eredményező szöghöz tartozó összes teljesítménnyel. Ha az újonnan kiszámolt érték kisebb, akkor a továbbiakban a hozzá tartozó szöget tekintjük a további számításokhoz új „lehetséges optimális kúpszög”-nek. Ezután választunk egy újabb szöget az előre megadott kúpszög-tartományból és ezt az eljárást megfelelően sokáig folytatva megtaláljuk a ténylegesen optimális szöget. Ezzel az optimalizációs folyamat befejeződik.

A lehetséges kúpszögek tartománya lefedi az iparban is előforduló kúpszögek intervallumát. A tartományon kívüli szögeknél vagy a súrlódás hatására a húzóerő növekszik meg nagymértékben, vagy a central burst jellegű károsodások válnak valószínűvé.

Másrészt az adott kúpszög kimunkálhatóságának okán, nem érdemes egy tizedes pontosságnál jobban megközelíteni a tényleges optimális szöget, így az optimalizálás számítási igénye tovább csökken.

Az azonos-kúpszögű feltétellel felírt célfüggvénnyel való optimalizálást bemutatom a DHCF 17 csúszvahúzó gépen végzett huzal húzás ipari technológiáján [36]. Az ipari technológia paraméterei a következők: 17 fokozat, C10 anyagminőség, húzási végsebesség: 8,5 m/s, kezdő huzal átmérő: 1,4 mm készátmérő: 0,35 mm. A kenőanyag egy emulzió, mely 2,5%-ban káliszappant, 1%-ban ricinusolajat tartalmazott. Az eredeti, ipari technológia fokozataihoz tartozó kúpszögek nagyságát a 7. táblázatban látható.

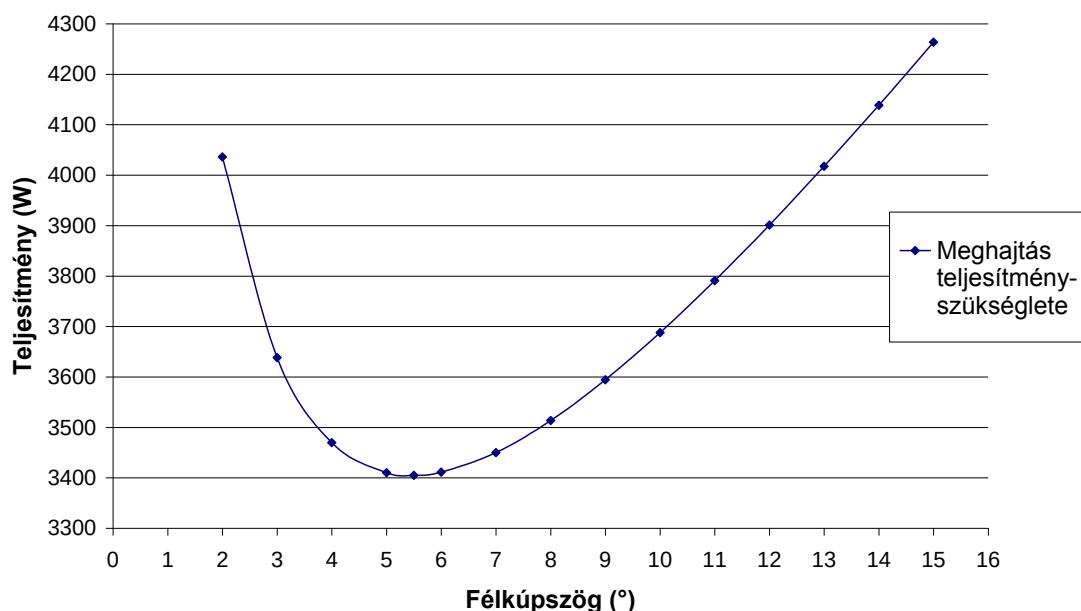
Az adott ipari technológia esetén a teljesítmény-igény kúpszögtől való függése látható 43. ábrán. A félkúpszög $5,5^{\circ}$, így a teljes optimális kúpszög 11° , amint az a 43. ábráról leolvasható.

Az eredeti DHCF17 technológiának a meghajtáshoz tartozó meghajtó teljesítmény: 3550W. Látható a 43. ábrán, hogy a kúpszöggel való optimalizálás hozzávetőlegesen 150W-os javulást hozott.

Összefoglalva: két újabb, az energiafelhasználást és így gyártási költséget is minimalizáló célfüggvényt írtam fel, melyek a húzószerszámok kúpszögeinek változtatásával keresik a meghajtás optimális teljesítmény-felvételét. A két célfüggvény abban különbözik, hogy az egyik esetben a számított kúpszögek egymástól függetlenül vehetik fel értékeiket, míg a másodikban kizárólag olyan kúpszögeket lehet választani, melyek minden fokozatban azonosak.

Fokozatszám:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Húzószerszám kúpszöge:	5°	7,5°	9°	4,5°	9,5°	9°	9°	6°	8,5°
Fokozatszám:	10	11	12	13	14	15	16	17	
Húzószerszám kúpszöge:	6°	8°	5,7°	6°	6,7°	6°	8,5°	10,5°	

7. táblázat. DHCF 17 húzógépen használt ipari technológia fokozataihoz tartozó kúpszögek.



43. ábra. A DHCF 17 húzó gép-meghajtás felvett teljesítményének húzószerszám kúpszögétől való függése, feltételezve, hogy minden fokozatban azonosak a kúpszögek.

4.4. Huzalhőmérséklet felső korlátja

A huzalhúzás hidegalakító folyamat, jellemzően a hőmérsékletnek nincs rá hatása. Ám egy bizonyos határ felett a fejlődő hő hatással van a kenőképességre, az alakítási szilárdságra, a huzal anyagának alakíthatóságára, a huzal felületének minőségére, a szerszám kopására.

Túl nagy alakváltozás, vagy húzási sebesség esetén a hőfejlődés olyan mértékű lesz a huzalban, hogy fémtani folyamatok indulhatnak meg az anyagban. A szerszámban töltött rövid időtartam alatt elszorított hő hatására gerjesztett folyamatok (mint az alakítási öregedés) következtében a huzal szilárdsága és az alakíthatósága is lecsökken. Szélsőséges esetben felületi beedződés is előfordulhat. Lágyabb anyagoknál (pl.: alumínium) az alakítási szilárdság kisebb hőmérsékleten is hőmérséklet-érzékeny lehet, így a felületen lecsökkenhet a szakítószilárdság értéke, repedések képződését indítva el. A szerszámkopás is jelentősen felgyorsulhat.

A kenőképesség is jelentősen romolhat, mint azt a 3.6.1. fejezetben is kifejtettem. Nedves kenéskor a kenőfilm vastagsága a hőmérséklet növekedésével folyamatosan csökken, majd felszakadozik. A felszakadás hatására a felületi minőség leromlik, hibás lesz, karcok jelenhetnek meg rajta. A megnövekedett súrlódási együttható hatására huzalszakadás is bekövetkezhet.

A kenőképesség romlása öngerjesztő folyamat, hiszen ekkor a súrlódási hő megnövekszik, tovább rontva a kenés minőségét, ugyanakkor ez felgyorsítja a termék számára negatív fémtani folyamatokat is. Olajkenés esetén hőmérséklet elérheti a kenőanyag lobbaspontját, és ha a huzal levegővel érintkezik, akkor a kenőanyag égni kezd.

Száraz kenőanyaggal történő kenéskor a kenőanyag nagyobb hőhatást kibír, ám egy határhőmérséklet felett a kenőképesség leromlik és a kenőréteg szintén felszakad, ennek hatására szintén megjelennek a felületi problémák, esetleg kontrakció a huzalon. A növekvő hőmérséklet hatására szintén felgyorsulnak a fémtani folyamatok és a szerszámkopás. A száraz kenőanyagok esetén a kenőanyag-hordozók felbomlása és átalakulása is megtörténhet, kellően nagy hőmérséklet esetén, mely hatására a kenőanyag-bevitelre alkalmatlanná válnak, a kenőképesség tovább romlik.

A túl nagy hőmérsékletből adódó hibák elkerülésére egy felső korlátot kell meghatározni a kenéstől függően. Ipari gyakorlat szerint nedves húzásnál - a kenőanyagra vonatkozó korlát alapján - ezt a felső korlátot 60-65°C-ra, míg szárazhúzásnál 250-300 °C-ra lehet választani [3]. Ezek alapján, a huzal minőséget optimalizáló célfüggvényt írtam fel, ahol a sebesség nagyságát korlátozzuk úgy, hogy az adott kenéstípushoz tartozó hőmérséklet határánál kisebb legyen a hőmérséklet.

A célfüggvényben a hőmérséklet növekmény megállapítására, az egyszerű számolhatósága miatt, valamint a pontossága alapján már elfogadott, (52) egyenlet használok. Sorozathúzás esetén a huzal nem tud lehűlni a környezet illetve a hűtőközeg hőmérsékletére: ezért az (53) egyenlettel számolom a huzal hűlését, és a következő szerszámba befutó keresztmetszet hőmérsékletét.

5. Komplex optimalizálás

5.1. Komplex optimumok meghatározása a fokozatonkénti kúpszög választás függvényében

A technológiai tervezés során szeretnénk, ha előző fejezetekben definiált célfüggvények optimumai együttesen érvényesülnének. Ennek érdekében egy komplex célfüggvényt definiálok, mely egy feltételes szélsőértéket ad eredményül, ahol a feltétel által leszűkített értéktartomány az a halmaz, melyen egy másik célfüggvény szintén szélsőértéket ad.

A komplex optimalizálási probléma esetén a (59) formalizálásban található $g_i(x)-b_i=y_i$ feltételegyenletek helyett: R^m_1 egy alterén értelmezett optimalizáló célfüggvény van beépítve. Tehát az B halmazra vonatkozó feltételek által meghatározott korlátokat itt egy másik optimalizáció eredményeképpen kapjuk meg.

A komplex optimalizálás során olyan feltétel-optimalizációval rendelkező célfüggvényeket írtam fel, melyek ezáltal a technológiatervezéshez tartozó optimalizációs osztályok közül kettő vagy akár mindhárom osztályba is beletartoznak.

A komplex optimalizálás során a szerszámok kúpszögeinek az optimális nagyságát keresem azzal a feltétellel, hogy a szerszámhoz tartozó fogyás (alakváltozás) is optimális legyen: a kihasználtsági tényezőkkel felírt és a hőkezelés helyét a technológiai sorban meghatározó célfüggvény értelmében.

Ez a komplex optimalizáló célfüggvény a termék minőségének biztosítása mellett a gyártási költségeket minimalizálja és a fokozatok számának csökkentésével a termelékenységet is növeli.

A komplex optimalizáló célfüggvény által meghatározott eljárás első lépésben a (73) integrál egyenlet segítségével kiszámolja a lágyítás kívánatos helyét a technológiában (feltételezve, hogy a vevői elvárásokat teljesíti a termék mechanikai tulajdonságai). Az (56) egyenlettel leírt Hajduk alakítási szilárdság modell ezt a számítást könnyen kezelhetővé teszi. Ezáltal meghatározza az egyes húzási sorozatokban a végrehajtandó alakváltozás nagyságát.

Az eljárás következő lépése az egyes húzási sorozatokban az összes teljesítmény felvételt minimalizálja úgy, hogy a kúpszögek változnak a fokozatokban, miközben a feltételt szabó célfüggvénynek megfelelően a fokozatonkénti alakváltozás nagysága a (61,62) kihasználtsági tényezőkkel történő optimalizálásból adódik.

Ennél a lépésnél, mint azt a fentiekben is kifejtettem, két komplex optimalizáló célfüggvény különíthető el. A teljesítmény-felvétel kúpszög szerinti optimalizálásánál felírtam a (75) célfüggvényt, mely minden egyes fokozatban a többi fokozattól függetlenül keresi az optimális szöget. A másik (76) célfüggvény esetében minden fokozatban azonos optimális kúpszöget keres. Mivel a komplex optimalizálásban a feltételtől eltekintve a teljesítmény-felvételre vonatkozó célfüggvényt használjuk, így a komplex célfüggvénynek is ennek megfelelően két típusa adódott.

$$\min \left\{ P_{\text{össz}} \left| \max(\phi | \xi = (0,5 \dots 0,55); \varsigma = (0,5 \dots 0,55)) \right\} \min(W); \right. \\ \left. T_{\text{átl, huzal}} \leq T_{\text{korlát}} (\text{kenés}); \right\} \quad (75)$$

$$\min \left\{ P_{\text{össz}} \left| \max(\phi | \xi = (0,5 \dots 0,55); \varsigma = (0,5 \dots 0,55)) \right\} \min(W); \right. \\ \left. T_{\text{átl, huzal}} \leq T_{\text{korlát}} (\text{kenés}); \forall i, j \in \{\text{Fokozatok}\} \alpha_i = \alpha_j \right\} \quad (76)$$

Azon kívül, hogy az azonos kúpszöget kereső komplex optimalizálás az iparban kívánatos eredményt szolgáltatja (amint azt a 4.3. fejezetben kifejtettem), a komplex optimum számítási idejét is nagyságrendekkel csökkenti. Még az igen kis gépigénnyel bíró zárt, explicit, analitikus formulákkal leírt modellek használata esetén is a fokozatonként kúpszöget optimalizáló eljárás számítási ideje órákban mérhető. Viszont az egyszerűsítő feltevés, hogy mindig azonos kúpszögeket keressen az eljárás, nagyobb optimális össz-teljesítményt eredményez, mint a fokozatonként különböző kúpszöget kereső célfüggvény.

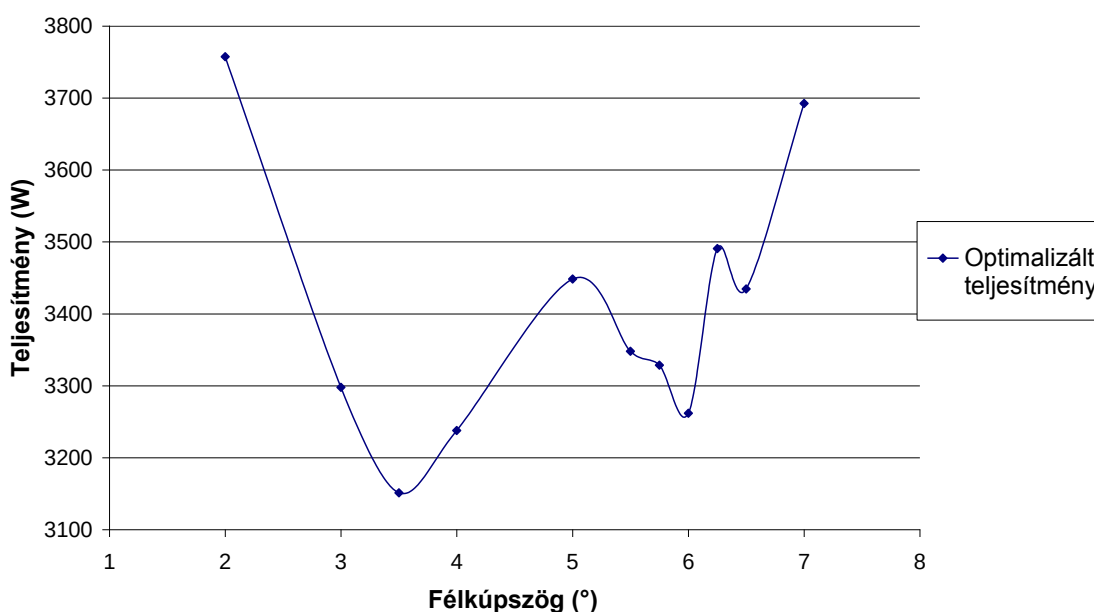
A kúpszögek értelmezési tartománya 3° - 30° -ig terjed. Kisebb szögeknél az alakításhoz szükséges húzóerő hiperbolikus módon növekszik, mivel a fellépő súrlódási tényezők huzalhúzás esetén a további csökkenést már nem tudják kompenzálni (lásd

(36,37)). Ha a kúpszög nagyobb lenne, akkor egyrészt a huzal a befutás irányát könnyebben, és nagyobb mértékben tudná változtatni, ezáltal V alakú szakadások jönnének létre a felszín több alkotója mentén is. Másrészt a central burst jelensége, illetve a holt sarok és a hántolás is majdnem 100% valószínűséggel lépne fel [37].

Az eljárás tehát, miközben optimális kúpszögeket keres, minden fokozatban optimalizál a kihasználtsági tényezőkkel. A 4.1. fejezetben láthattuk a DHCF 17 berendezésen alkalmazott ipari technológia optimalizálása során, hogy a kihasználtsági tényezőket csak úgy lehetett a biztonsági sávokban tartani, ha az átlagos kihasználtsági tényezőkre $0,5 \pm 0,05$ -t, míg a maximális kihasználtsági tényezőkre $0,55 \pm 0,05$ -t választottam. Ez a kihasználtsági tényezők két szélsőértéke a 4.1. fejezetben leírtak szerint, valamint alkalmazásuk mellett biztonsági sáv kiterjedése is elég nagy. Ez azt mutatta számomra, hogy előfordulhat olyan optimalizálási konfiguráció, amikor nincs olyan alakváltozás, melynél mindkét kihasználtsági tényező a biztonsági sávban van egyszerre. Ezért gyengítettem a kihasználtsági tényezővel történő optimalizálást, és csak annyit kötöttem ki, hogy a biztonsági sávok felső korlátjánál legyen mindkét érték kisebb, és legalább egyik tartózkodjon a biztonsági sávban. Ezáltal biztosítom azt, hogy mindig létezzen a termékminőségre vonatkozó optimális fogyás (alakváltozás).

Befejező lépésként az eljárás megvizsgálja a huzalhőmérsékletet, és a sebességre vonatkozóan ad egy korlátozást a 4.4. fejezetben foglaltaknak megfelelően.

Az azonos kúpszögű komplex optimalizáló eljárást a DHCF 17 húzási technológiájára mutatom be. A technológia rögzített paraméterei a már korábban bemutatottak. A végsebesség 8,5m/s, a huzal kezdőátmérője 1,4mm, készátmérője 0,35mm. A húzási folyamat egy sorozatban végrehajtható, nem szükséges köztes lágyítás. Az adott ipari technológia esetén a kihasználtsági tényezőkkel optimalizált eljárás teljesítmény-szükséglet kúpszög-függése a 44. ábrán látható.

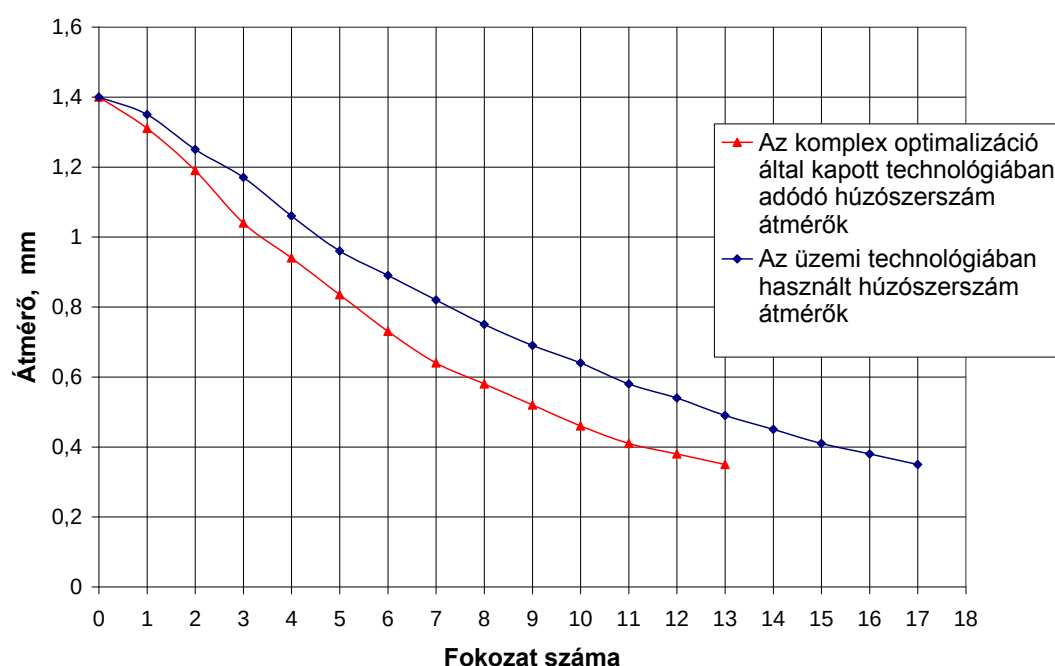


44. ábra. A DHCF 17 gyártási technológiának fokozatonként azonos szögű komplex optimalizációjához tartozó teljesítmény-felvétel a félkúpszög függvényében.

A diagramról leolvasható, hogy a komplex optimumhoz tartozó kúpszög nem egyezik meg a teljesítményfelvételt pusztán a szög optimalizálásával kapott értékkel. A komplex optimum félkúpszöge: $3,5^\circ$, azaz a kúpszöge 7° . A teljesítmény függvény jellege is erősen eltér, komplexebb, hiszen nem egy szélsőértékkel rendelkezik, így egyszerű analitikus módszerekkel, vagy akár mohó algoritmussal sem található meg a globális minimum helye. A függvény 10° - 12° -os kúpszög-intervallumban (5° - 6° -os félkúpszög-intervallumban) erősen csökken és egy lokális minimumot vesz fel, mely a 4.3. fejezetben bemutatott optimalizálás hatása. Viszont a függvény további minimum- és maximum helyekkel rendelkezik, melyek a kihasználtsági tényezőkkel történő optimalizálás hatására jönnek létre. Ekkor a kúpszög megváltozására a kihasználtsági tényezőkkel történő optimalizálás az (64) egyenleten keresztül a fogyások nagyságának, és így a húzási sorozat fokozatszámának megváltozásával felel. Ezáltal a függvény meredeksége erősen megváltozik, és újabb minimumhelyek jönnek létre, melyek között elfordul olyan, amelyhez tartozó érték kisebb, mint az előzetes kúpszög-optimalizálás által előre jelzett érték. Jelesül itt 7° -nál a komplex optimum 3150W teljesítményszükségletet eredményez, szemben a kúpszög optimumhoz tartozó 3400W-tal, melynek minimumhelye 11° -nál van.

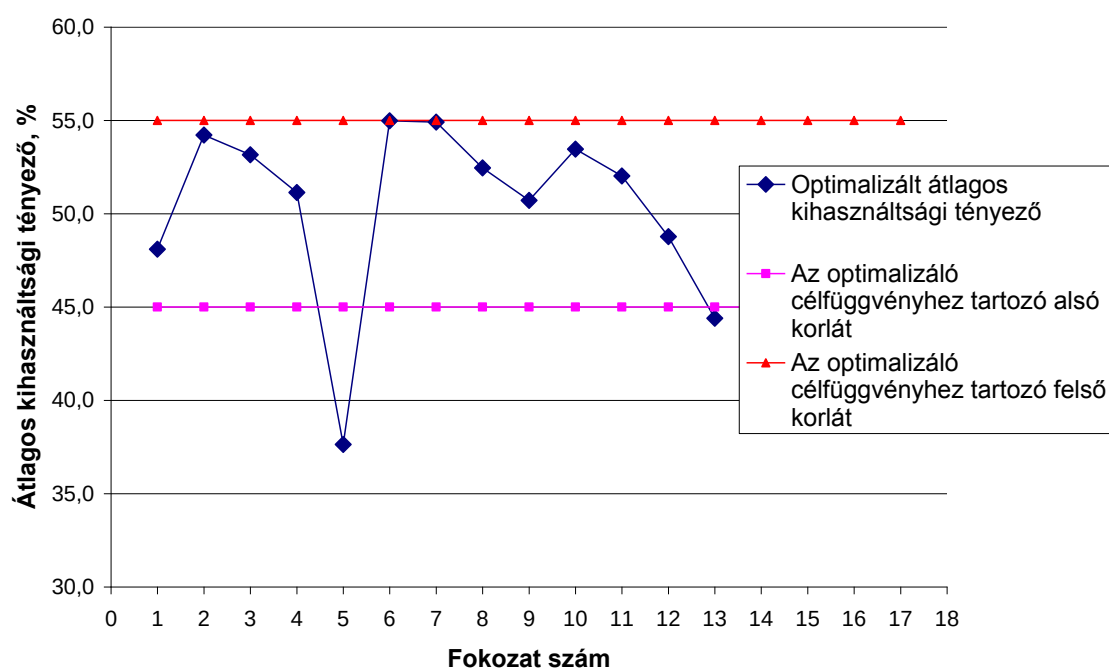
Összehasonlítva az eredeti, ipari technológiával azt láthatjuk, hogy 3550W-ról 3150W-ra redukálható a teljesítmény-felvétel, ami 11,3%-os megtakarítást jelent.

Az ipari technológia fokozataihoz tartozó kifutó átmérőt összevetettem a komplex optimum által jelzett értékekkel. A 45. ábrán látható, hogy a komplex optimum nagyobb fogyásokat (alakváltozásokat) engedélyez, nemcsak az ipari technológiához képest, hanem a kizárólag csak kihasználtsági tényezőkkel végrehajtott optimumhoz képest is. A kihasználtsági optimum alapján 16 fokozat alatt éri el a kész átmérőt, míg a komplex optimumnak 13 fokozat is elég (a húzási sorozatban a huzal által megtett úthossz is 23,5 %-kal csökken).

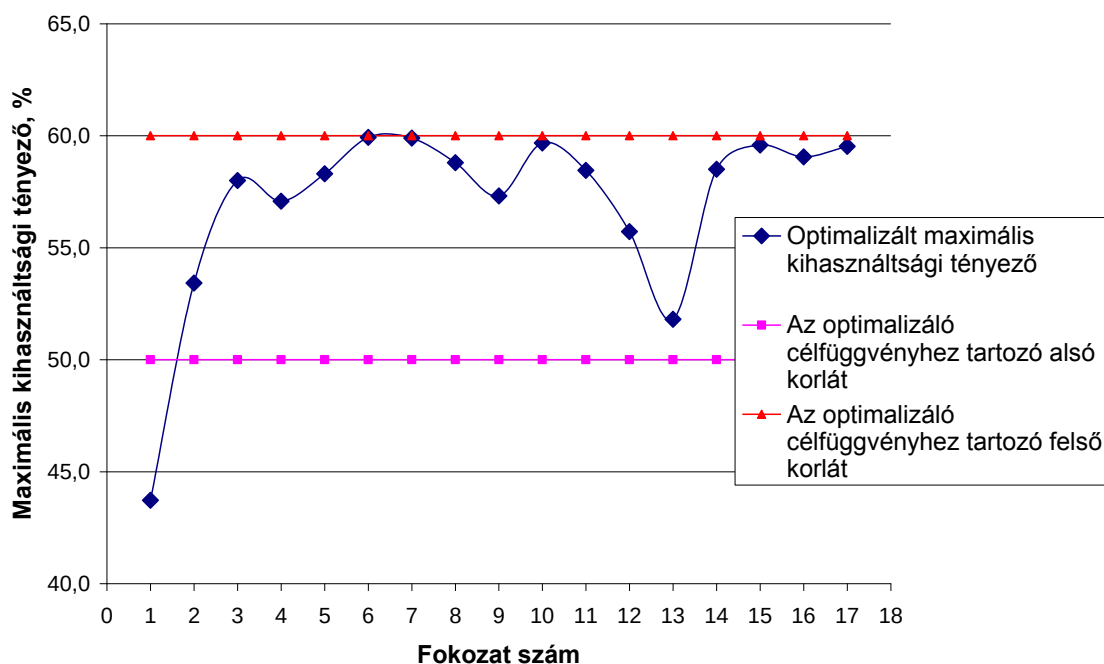


45. ábra. Az ipari és a komplexen optimalizált technológiához tartozó fokozatonként kilépő huzal-átmérők, és egyben a húzószerszám átmérők is. Anyagminőség C10, $v_{kész}=8,5$ m/s.

A kihasználtsági tényezők alakulását, fokozatról fokozatra a 46. és a 47. ábra szemlélteti. Az átlagos kihasználtsági tényező várt értéke itt is 0,5, míg a maximális kihasználtsági tényező 0,55. Az alsó és felső korlátok ezektől 0,05-tel térnek el. A tényezők értékét százalékosan mutatom be. Látható, hogy a komplex optimum létezen, mind az átlagos, mind a maximális kihasználtsági tényező esetén ki kellett használni azt az engedményt, hogy az adott érték kisebb is lehet, mint az alsó korlátja, ha a tényezőpárja a megengedett sávon belül marad.

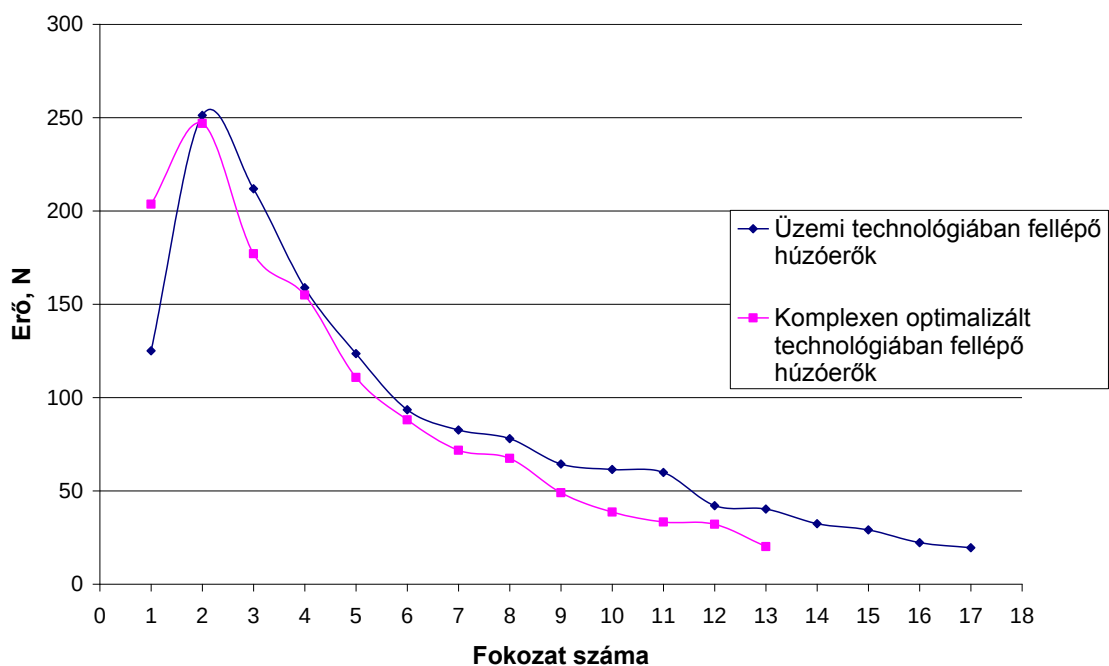


46. ábra. A DHCF 17 komplex optimalizált technológiájának átlagos kihasználtsági-tényezői, és az optimalizálási határsáv alsó és felső korlátja. Anyagminőség C10, $v_{kész}=8,5$ m/s.



47. ábra. A DHCF 17 komplex optimalizált technológiájának maximális kihasználtsági-tényezői, és az optimalizálási határsáv alsó és felső korlátja. Anyagminőség C10, $v_{kész}=8,5$ m/s.

A 48. ábrán bemutatom az üzemi, illetve a komplex optimalizálással kapott húzóerő-viszonyokat a húzási sorozat során. Látható, hogy a fokozatok túlnyomó részében kisebb húzóerő szükséges, így nemcsak a termék minőségét biztosítjuk, hanem a teljesítményszükséglet csökken, és a húzószerszámok élettartama is nő.

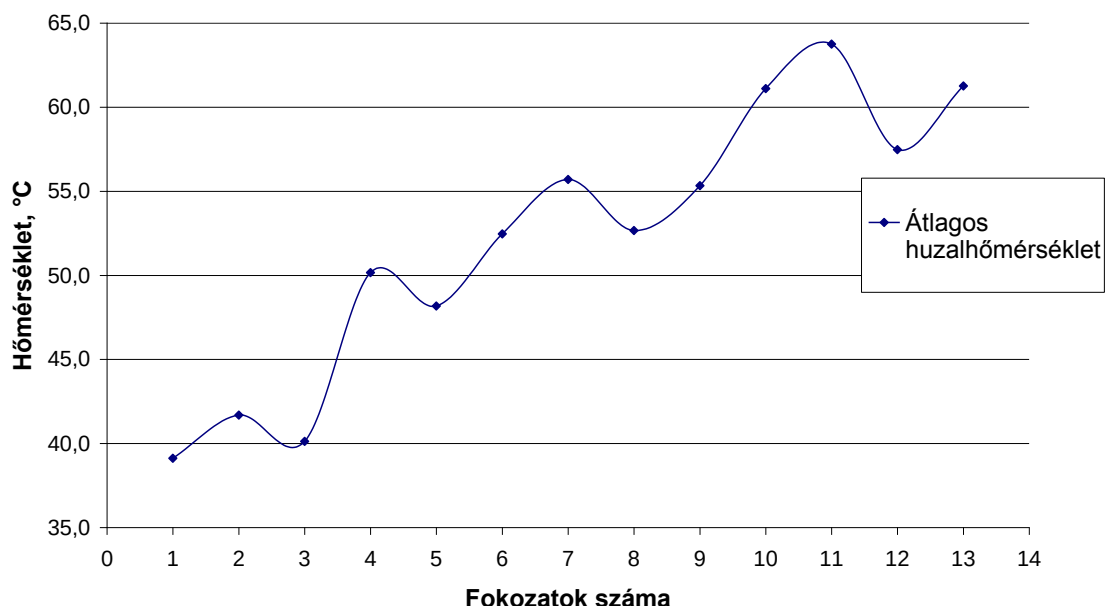


48. ábra. Az DHCF 17 ipari és komplexen optimalizált technológiájának esetén fokozatonként fellépő húzóerők a huzal szerszámból kilépő keresztmetszetén.

A komplex optimalizálás utolsó lépéseként a huzalhőmérsékleti korlátot vizsgáltam. Az optimalizált technológiához tartozó fokozatonkénti átlagos huzalhőmérséklet a 49. ábrán látható. A technológia nedves kenésű volt, így a húzási sebességben való módosítás nem szükséges, mivel még a nedves kenéshez tartozó a 60-65 °C-os korlátozó sávot sem lépi át az átlagos huzalhőmérséklet, amint az a diagramon is jól látszik. A komplex optimalizálással kapott technológia 8,5m/s-os húzási végsebességgel tehát hőmérsékleti szempontból is megvalósítható.

A bemutatott példa is jól mutatja, hogy az általam bevezetett komplex optimalizáló célfüggvények több szempontot is figyelembe vevő eljárások, melyek a huzalhúzás szinte minden fontosabb befolyásoló tényezőjét módosítják a kívánalmaknak megfelelően. Azt is megállapíthatjuk, hogy a költséghatékonyságot, sőt a termelékenységet is tovább javítják az eddig tervezéshez használt, önmagukban álló optimalizáló célfüggvényekhez képest.

A fenti megfontolások alapján a fejezetben bemutatott komplex optimalizáló célfüggvények a technológiatervezéshez ajánlhatók, és véleményem szerint sikeresen felhasználhatók. A tervezést ipari környezetben megkönnyítendő, a komplex optimalizálást az előző fejezetekben kiválasztott zárt, explicit formulákkal felírható huzalhúzási modellek segítségével célszerű végrehajtani. Ezáltal minimalizálható a tervezésre fordított számítási idő, ugyanakkor a lehető legpontosabb eredményt kapjuk a hasonló struktúrájú optimalizáló modellek közül.



49. ábra. A komplexen optimalizált technológia fokozatonkénti számított huzalhőmérsékletei (az (52,53) egyenletek szerint).

5.2. Szoftverfejlesztés

Az előző fejezetekben láttuk, hogy még a zárt, analitikus formulákkal felírható modellek alkalmazásakor is, az általuk kapott komplex optimumok már nem formalizálhatók explicit módon, a feltételes szélsőérték keresése már egy igen bonyolult függvényen történik. Ebben az esetben már csak rekurzív módon számíthatóak a komplex optimumok, egy beépített kereső algoritmus segítségével. Egy ilyen algoritmus valós idejű futtatásához már számítógépes segítségre van szükségünk. A komplex optimalizáló célfüggvényt egy gyorsan számoló szoftverrel valósíthatjuk meg, mely tetszőleges (iparban előforduló) durvahuzal átmérőre és késztermék átmérőre ki tudja számolni az optimális húzástechnológiát, figyelembe véve a berendezés (ellenező megléte, a tárcsákra feltekercselt menetszám, a meghajtás hatásfoka) és a kenés paramétereit. Ezáltal ez akár az iparban is felhasználható tervező programként számon tartható, viszont munkámban az optimális technológiai paraméterek matematikai szerkezetéről is tud további információkat nyújtani.

Az előző fejezetben két komplex optimalizáló célfüggvényt dolgoztam ki. Ezek közül elsőként a fokozatonként a (76) azonos kúpszöget kereső célfüggvény algoritmusát írtam fel, mellyel szoftvert fejlesztettem. Az algoritmus vázlatos folyamatábrája a 50. ábrán látható.

Az algoritmus bekéri a megfelelő anyagminőséget, majd a bemenő durvahuzal kezdőátmérőjét, és a termék készátmérőjét. Az algoritmus megkapja a húzóberendezés alapvető paramétereit, melyek közül a legfontosabb az, hogy fellép-e ellenhúzóerő az egyes fokozatokban. Ekkor meghatározza az erő-, a feszültség- és a teljesítmény-viszonyok számítási módszerét az algoritmus. Sorozathúzás esetén huzalhőmérséklet számításánál az (53) lehűlési egyenletet is figyelembe kell venni, mivel ekkor nem elegendő az idő a környezeti hőmérsékletre való visszahűléshez.

Az algoritmus első lépésben a hőkezelés(ek) optimális helyét határozza meg a technológiai sorban. Meghatározza, hogy hány (0...2) lágyítás szükséges a technológiai sorban, majd a (73) integrálegyenlet segítségével meghatározza a hőkezelések helyét, és az egyes húzási sorozatokban végrehajtandó alakváltozás nagyságát. Ezután bekéri a húzási sorozatok végsebességeit, melyet az alakváltozások, és a berendezés korlátai alapján választhat meg a felhasználó.

Ezt követően az algoritmus a kúpszögek előre meghatározott intervallumból választ egy értéket. Már korábban megmutattam, hogy ez az intervallum 3° és 30° közötti értékek halmaza. Tekintettel a kúpszögek gyakorlati kimunkálhatóságára, azok értékeit csak egy tizedes pontossággal határoztam meg. Ezáltal leszűkítettem a választható szögek halmazát 271 értékre, csökkentve az algoritmus számítási igényét.

Az algoritmus a következő lépésben a kihasználtsági tényezőkkel optimalizál. Ekkor a rögzített kúpszöggel kiszámolja az első fokozathoz tartozó fogyás (alakváltozás) nagyságát úgy, hogy legalább az egyik kihasználtsági tényező a biztonsági zónába essen, míg a másik a felső korlát alatti legyen. Az eljárás a kezdő keresztmetszetet csökkentő lépésként egy rögzített differenciával addig, amíg a kihasználtsági tényezők nem teljesítik az optimalizáló feltételeket. Szükséges a módosított optimalizáló feltételt használni, mivel a biztonsági zóna is „szűkebb” lett: a korlátok a számítógépes programban $\pm 0,005$ -tel térnek csak el az előre rögzített (0,5...0,55) értékektől. Ezt a pontosságnövekedést a számítógéppel kis számítási időnövekedéssel elő lehet állítani, viszont ekkor a két kihasználtsági tényező még kisebb eséllyel esik egyszerre a célfüggvény által elvárt biztonsági zónába, ezért indokolt a gyengített feltétel

alkalmazása. A kúpszögnek is erős befolyása van arra, hogy melyik kihasználtsági tényező a dominánsabb és esik bele akkor az optimális zónába úgy, hogy a másik tényező nem éri el a biztonsági sávot.

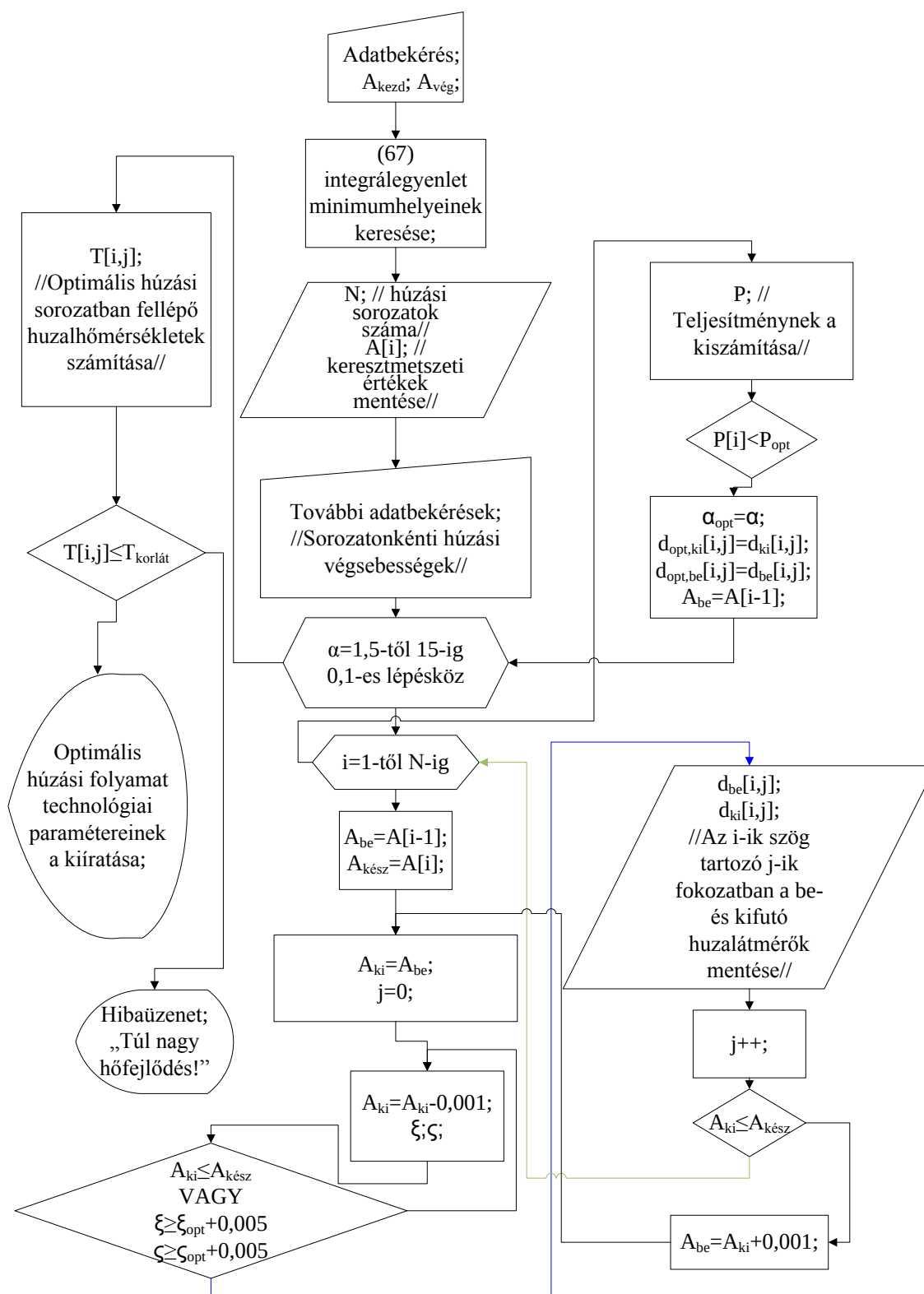
Ezután a következő fokozatra is kiszámolja az algoritmus a fogyás (alakváltozás) nagyságát ugyanezzel az eljárással, és folytatja a további fokozatok esetén is egészen addig, amíg az össz-fogyás meg nem egyezik azzal az értékkel, amelyet az algoritmus hőkezelést elhelyező első része kiszámolt az adott húzási sorozatra. Ha van lágyítás és azt követően további húzási sorozatok, akkor azokra is ismételten elvégzi a fenti eljárást az algoritmus.

Adott szögre elvégzett kihasználtsági tényezős optimalizálás után, a kiszámolt paraméterekkel a (74) egyenlet segítségével meghatározható a húzási sorozatonkénti felvett teljesítmény. Az első kúpszög-választás esetén a húzási sorozatok teljesítményei, a kúpszög és az optimalizált fogyási (alakváltozási) értékek elmentésre kerülnek.

Ezt követően a kúpszög-tartományból egy újabb szöget választunk és végrehajtjuk vele a fenti eljárást, majd a szögekhez tartozó teljesítményértékeket összeveti a már elmentett teljesítmény értékekkel. Ha az új érték kisebb, mint az elmentett, akkor ezt a teljesítményt menti el a továbbiakra az algoritmus, illetve a hozzá tartozó kúpszög és optimalizált fogyási értékekre cseréli a memorizált adatokat.

Az algoritmus megvizsgálja mind a 271 kúpszöget. A folyamat végére érve megkapjuk a komplex optimalizált paramétereket, amelyek az elmentett, húzási sorozatokhoz tartozó kúpszögek, fokozatonkénti fogyások és teljesítmény értékek.

Az algoritmus végül kiszámolja a huzalhőmérsékleteket minden egyes fokozatban, és jelzi, ha túllépi a kenésnek megfelelő felső korlátot.



50. ábra. Az azonos kúpszöget kereső komplex optimalizáló algoritmus vázlatos folyamatábrája.

Ezt az algoritmust egyetlen szoftverben valósítottam meg, mely három anyagminőségből álló csoportot kezel, és nedves kenést feltételez. Az 51. ábrán látható felhasználói felületen lehet kiválasztani azt az anyagminőséget, amelyiket az adott technológiatervezésben használunk.

A szoftver használatakor - a megfelelő anyagminőség kiválasztása után - megadjuk a bemenő durvahuzal kezdőátmérőjét, majd a termék készátmérőjét, század milliméterben skálázva.

Ezután a „Hőkezelés” gombra kattintva kiíratjuk egyrészt a végterméknek az adott kezdőméretből való elkészítéséhez tartozó összes logaritmikus alakváltozást, illetve az anyagminőséghez tartozó anyagkárosodás nélkül elviselhető megengedhető-alakváltozást. Ezekből az adatokból kiszámítja, hány lágyító hőkezelést kell közbeiktatnunk, hogy a húzási művelet elvégezhető legyen.

Ezt követően a teljes technológia optimalizálására rátérhetünk. Meghagytam azt az opciót, hogy az átlagos és maximális kihasználtsági-tényezőt a felhasználó válassza meg, bár mint azt igazoltam, a helytálló ajánlott érték a 0,5...0,55 közötti.

Következő opció az ellenerő fellépésének beállítása. Ezzel lényegében a berendezés típusát is megadjuk, mivel a csúszvahúzó, illetve egyenes húzó gépek esetén lép fel az ellenerő. Ellenkező esetben gyűjvehúzó illetve egyfokozatú húzógép vagy húzópad esete merül fel.

Végül megadjuk a húzási sorozatok kívánt végsebességét.

Ezek után az „Optimalizálás” gomb benyomásával elindítjuk a számítási eljárást.

Ha a számítás folyamán az jön ki, hogy a huzalhőmérséklet valamelyik fokozatban meghaladja az optimalizáló célfüggvény által megadott korlátot, akkor egy felugró „message box”-szal figyelmeztet rá a szoftver. Ekkor új bemenő paraméterekkel a szoftver újra futatható.

A négy optimumból összeállított komplex optimumhoz tartozó paramétereket végül a kezelőfelületen írja ki szoftver. Kiírja az optimumhoz tartozó össz-teljesítményfelvételt és kilistázza fokozatonként a szerszám félkúpszögét, átmérőjét, a fokozat kifutó szálának sebességét, a szerszámban a huzal felületén ébredő súrlódási együtthatót. Kilistázza továbbá a fokozatonkénti húzóerőt és az ott ható ellenerőt is, mint az az 51. ábrán is látszik.

Kör keresztmetszetű fémhuzalok húzási technológiájának számítógéppel támogatott tervezése és komplex optimalizálása

Szerszám	Félfűzőszög (°)	Huzalátmérő(küfuto, mm)	Húzási sebesség(küfuto, m/s)	Súrlódási együttható	Húzóerő(N)	Ellenerő(N)
0 : 4,2	0 : 20	0 : 0,2	0 : 0	0 : 0	0 : 0	0 : 0
1 : 4,2	1 : 18,17	1 : 0,2	1 : 0,16	1 : 32878,1	1 : 0	1 : 0
2 : 4,2	2 : 16,96	2 : 0,3	2 : 0,15	2 : 31029,2	2 : 7997,1	2 : 7997,1
3 : 4,2	3 : 15,91	3 : 0,3	3 : 0,15	3 : 27382,3	3 : 7547,4	3 : 7547,4
4 : 4,2	4 : 14,98	4 : 0,4	4 : 0,14	4 : 24121,9	4 : 6660,4	4 : 6660,4
5 : 4,2	5 : 14,13	5 : 0,4	5 : 0,13	5 : 21347,6	5 : 5867,3	5 : 5867,3
6 : 4,2	6 : 13,33	6 : 0,5	6 : 0,13	6 : 19022,8	6 : 5192,5	6 : 5192,5
7 : 4,2	7 : 12,58	7 : 0,5	7 : 0,12	7 : 17057,1	7 : 4627	7 : 4627
8 : 4,2	8 : 11,86	8 : 0,6	8 : 0,11	8 : 15366,3	8 : 4148,9	8 : 4148,9
9 : 4,2	9 : 11,16	9 : 0,7	9 : 0,11	9 : 13826,6	9 : 3737,6	9 : 3737,6
10 : 4,2	10 : 10,49	10 : 0,8	10 : 0,1	10 : 12385,5	10 : 3362,9	10 : 3362,9
11 : 4,2	11 : 9,85	11 : 0,9	11 : 0,09	11 : 11042,3	11 : 3012,6	11 : 3012,6
12 : 4,2	12 : 9,24	12 : 1	12 : 0,09	12 : 9798,2	12 : 2685,9	12 : 2685,9
13 : 4,2	13 : 8,65	13 : 1,2	13 : 0,08	13 : 8654,2	13 : 2383,2	13 : 2383,2
14 : 4,2	14 : 8,09	14 : 1,3	14 : 0,07	14 : 7616,3	14 : 2105	14 : 2105
15 : 4,2	15 : 7,55	15 : 1,5	15 : 0,07	15 : 6659,7	15 : 1852,5	15 : 1852,5
16 : 4,2	16 : 7,04	16 : 1,8	16 : 0,06	16 : 5821,7	16 : 1622,3	16 : 1622,3
17 : 4,2	17 : 6,56	17 : 2	17 : 0,05	17 : 5058,4	17 : 1416	17 : 1416
18 : 4,2	18 : 6,1	18 : 2,4	18 : 0,05	18 : 4383,6	18 : 1230,4	18 : 1230,4
19 : 4,2	19 : 5,67	19 : 2,7	19 : 0,04	19 : 3783,3	19 : 1066,2	19 : 1066,2
20 : 4,2	20 : 5,27	20 : 3,2	20 : 0,04	20 : 3258,9	20 : 920,2	20 : 920,2
21 : 4,2	21 : 4,89	21 : 3,7	21 : 0,03	21 : 2803,6	21 : 792,6	21 : 792,6
22 : 4,2	22 : 4,54	22 : 4,3	22 : 0,03	22 : 2406,9	22 : 681,9	22 : 681,9
23 : 4,2	23 : 4,24	23 : 5	23 : 0,02	23 : 1993,3	23 : 585,4	23 : 585,4
Lágyítás	Lágyítás	Lágyítás	Lágyítás	Lágyítás	Lágyítás	Lágyítás
1 : 4,2	1 : 3,84	1 : 0,3	1 : 0,15	1 : 1611,7	1 : 0	1 : 0
2 : 4,2	2 : 3,57	2 : 0,3	2 : 0,14	2 : 1501,1	2 : 392	2 : 392
3 : 4,2	3 : 3,35	3 : 0,4	3 : 0,14	3 : 1314,9	3 : 365,1	3 : 365,1
4 : 4,2	4 : 3,14	4 : 0,5	4 : 0,13	4 : 1150,7	4 : 319,8	4 : 319,8
5 : 4,2	5 : 2,96	5 : 0,5	5 : 0,12	5 : 1013,6	5 : 279,8	5 : 279,8
6 : 4,2	6 : 2,79	6 : 0,6	6 : 0,11	6 : 900	6 : 246,5	6 : 246,5
7 : 4,2	7 : 2,62	7 : 0,7	7 : 0,11	7 : 803,1	7 : 218,9	7 : 218,9
8 : 4,2	8 : 2,46	8 : 0,8	8 : 0,1	8 : 720,6	8 : 195,3	8 : 195,3
9 : 4,2	9 : 2,31	9 : 0,9	9 : 0,09	9 : 644,3	9 : 175,2	9 : 175,2
10 : 4,2	10 : 2,17	10 : 1	10 : 0,09	10 : 571,5	10 : 156,7	10 : 156,7
11 : 4,2	11 : 2,03	11 : 1,2	11 : 0,08	11 : 505,9	11 : 139	11 : 139
12 : 4,2	12 : 1,89	12 : 1,3	12 : 0,07	12 : 445,8	12 : 123	12 : 123
13 : 4,2	13 : 1,77	13 : 1,5	13 : 0,07	13 : 389,8	13 : 108,4	13 : 108,4
14 : 4,2	14 : 1,65	14 : 1,8	14 : 0,06	14 : 340,5	14 : 94,8	14 : 94,8
15 : 4,2	15 : 1,53	15 : 2,1	15 : 0,05	15 : 296,4	15 : 82,8	15 : 82,8
16 : 4,2	16 : 1,43	16 : 2,4	16 : 0,05	16 : 256	16 : 72,1	16 : 72,1
17 : 4,2	17 : 1,33	17 : 2,8	17 : 0,04	17 : 221,2	17 : 62,2	17 : 62,2
18 : 4,2	18 : 1,23	18 : 3,2	18 : 0,04	18 : 190,8	18 : 53,8	18 : 53,8
19 : 4,2	19 : 1,14	19 : 3,7	19 : 0,03	19 : 164,1	19 : 46,4	19 : 46,4
20 : 4,2	20 : 1,06	20 : 4,4	20 : 0,03	20 : 140,7	20 : 39,9	20 : 39,9
21 : 4,2	21 : 1	21 : 4,9	21 : 0,02	21 : 111,5	21 : 34,2	21 : 34,2

Hőkezelések száma

☒ Acél(C10)

☐ Aluminium(Al99.5)

☐ Réz(CuE)

D_kezdő_durvahuzal(*0,01mm)

2000

D_kész_termék(*0,01mm)

100

Összes logaritmus alakváltozás

5,99146454710798

Megengedett logaritmus alakváltozás

3,6

Hőkezelések száma

1

Hőkezelés

Technológia optimalizálása

Átlagos kihasználtsági tényező(*0,01)

50

Maximális kihasználtsági tényező(*0,01)

55

☒ Ellenerő fellép-e

Végsebesség az első húzási sorozatban(m/s)

5

Végsebesség a második húzási sorozatban(m/s)

5

Végsebesség a harmadik húzási sorozatban(m/s)

1

Össz.TeljesítményFelvétel(W)

348977,0

Optimalizálás

51. ábra. Azonos szögű komplex optimalizáló szoftver kezelői felülete; 20mm-ről 1mm-re történő technológiájának komplex optimalizálását követően.

A fokozatonként különböző kúpszögeket is megengedő (75) komplex optimalizáló célfüggvényt megvalósító algoritmus nagyobb bonyolultsággal rendelkezik, és ebből fakadóan a számítási igénye is nagyobb. Ha minden esetet végigszámolva keresné az optimumot, akkor a napjainkban elérhető komputer kapacitásával évekig tartana egy optimalizálás. Ennek lerövidítése érdekében algoritmuselméleti eszközökhöz folyamodtam segítségért. A felhasznált algoritmus a Bellman-Ford [71, 72] volt, mely egy élsúlyozott, irányított vagy irányítás nélküli, negatív összköltségű irányított kört nem tartalmazó véges gráfon határozza meg minden gráf-csúcsra, egy rögzített kezdő-csúctól vezető legrövidebb utat és annak hosszát.

Az algoritmuselméleti eszközök használatával is igen nagy marad számítási igénye az adott algoritmusnak, köszönhetően annak, hogy egy adott szög-fogyás párost megelőző szög-fogyás páros közvetlenül nem meghatározható. Csupán annak kiszámolása, hogy az összes lehetséges alakváltozást követően milyen optimális szög-fogyás párok léphetnek fel a következő fokozatban, legalább 3 nagyságrenddel meg tudja növelni az azonos-szögű komplex optimalizáláshoz képest a gépidőt. Erre a számításra tehát szükség van, mivel semmi nem jelöli ki számunkra előzetesen, hogy kihasználtsági tényezőkkel optimalizált húzási sorozatban, az egyes fokozatokban a huzal milyen előzetes alakváltozást szenvedett már el. Következő lépésben egy keresést kell végezni, hogy a szög-fogyás párokból egy húzási sorozat jöjjön létre, melynek a teljesítményfelvétele a legkisebb. Ezen párok számossága legalább 2-3 nagyságrenddel nagyobb, mint az azonos szögű komplex optimalizációnak a számítási igénye. Ezen párokon létrehozható „utak” (húzási sorozatok) számossága csillagászati nagyságrendű, ami jól jelzi a feladat bonyolultságát.

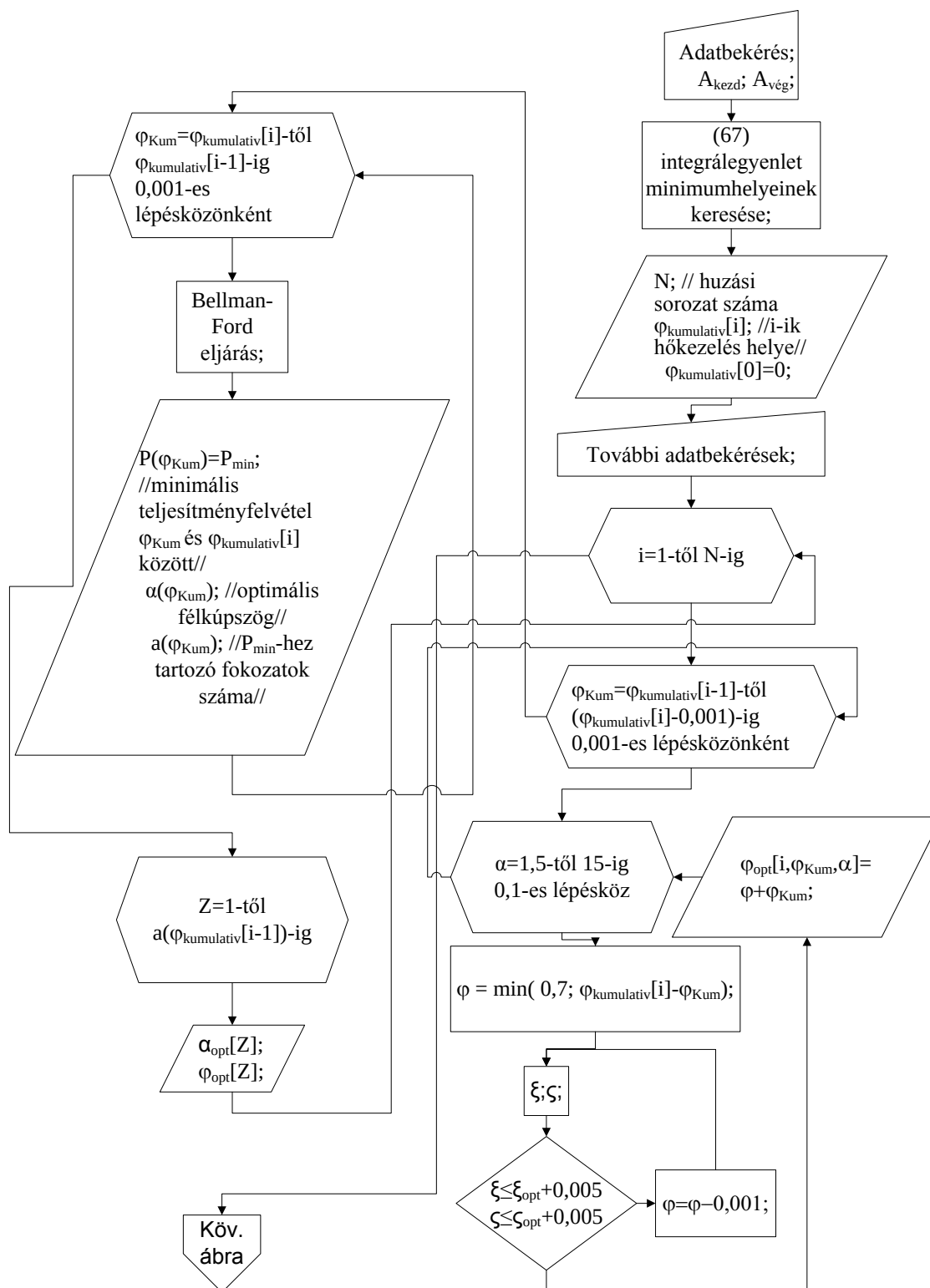
Az algoritmus első lépései megegyeznek az azonos szögű optimalizációt megvalósító algoritmuséval: adatbekérések, hőkezelések számának, helyének megállapítása.

Ezt követően a szög-fogyás párok számítása történik. Ez egy térkép-készítésnek tekinthető, ahol az adott pontig elszenvedett alakváltozás által jelzett pontból kiinduló éleket - melyeket szög-fogyás párok kódolnak – határoz meg az algoritmus. Így megkapjuk az adott pontokból kifelé irányuló élek által létrehozott szomszédságot és a köztük lévő úthossz (azaz a teljesítményfelvétel) nagyságát.

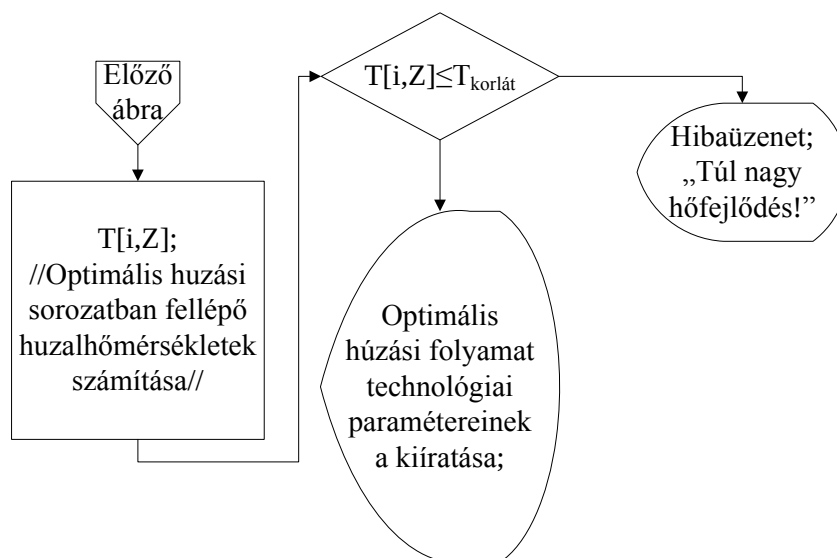
Az algoritmus további számításigény csökkentése miatt, az optimális paraméterekről további információkat gyűjtöttem az (64) egyenlet vizsgálatával. A kifejtett átlagos kihasználtsági-tényezőt leíró formula függvényvizsgálatából az iparban alkalmazható technológiai paraméterértékek esetén azt kaptam, hogy egy fokozatban elvégezhető logaritmikus alakítás nem lehet nagyobb 0,7-nél semmilyen körülmények között, mert ekkor, a kihasználtsági tényező érték csak nagyobb lehet, mint 0,5...0,55. A legkisebb alakváltozásnak a 0,02 választható, mely egy 100 mm átmérőjű rúdon is mindössze 1 mm-es csökkenést okoz. Ezen alakváltozási tartomány alatt (45) egyenlet gyors csökkenő viselkedése miatt, illetve (64)-ből következik, hogy a kihasználtsági tényezők semmilyen technológiai paraméter mellett sem tudják elérni a 0,5...0,55-ös értéket. Tehát azt kaptam, hogy egy fokozatban elfogadható alakváltozás tartománya 0,02...0,7 között van. A szerszám kimunkálhatóságának pontossága miatt, ezt a tartományt is diszkrét értékekre bontottam, ahol a szomszédos fogyások közötti különbség 0,001. Ezáltal a választható fogyáshalmazt 681 értékre szűkítettem le. Így amikor egy adott szögeértéknél keresi kihasználtsági tényező optimumot csak 681 értéket kell maximálisan megvizsgálnia az algoritmusnak, így a térképkészítés számítási igénye is maximálisan 681-szeres lesz az azonos szögű komplex optimalizáció számítási igényéhez képest.

Ezek után a kis útszakaszokból (szög-fogyás párokból) megkeresi a legrövidebb utat a kezdő és a végpont között az algoritmus. A csillagászati nagyságrenddel kifejezhető számossággal rendelkező úthalmazból a Bellman-Ford ötletes algoritmus keresi meg a legrövidebbet, mely keresésnek a számítási ideje nem nagyobb nagyságrendileg a térképkészítés gépigényénél. Ezzel a változószögű komplex optimum számítása összességében 2-3 nagyságrenddel lett csak nagyobb az azonos szögű változathoz képest, így ez az algoritmus már a jelenlegi számítógépes kapacitással is számíthatóvá teszi a célfüggvényt.

A változószögű komplex optimalizáló célfüggvény algoritmusának vázlatos folyamatábrája az 52. és 53. ábrán látható.



52. ábra. A húzási fokozatonként változó kúpszöget kereső komplex optimalizáló algoritmus vázlatos folyamatábrája (az ábra folytatódik).



53. ábra. (folytatás) A húzási fokozatonként változó kúpszöveget kereső komplex optimalizáló algoritmus vázlatos folyamatábrája.

5.3. A komplex optimumok összevetése

Az előző fejezetben láthattuk, hogy a két komplex optimalizáló célfüggvényt megvalósító algoritmus számítási ideje között jelentős különbség van. Egy sorozathúzás esetén az azonos kúpszöveget kereső komplex optimalizálás időtartama 5 perctől 1 óráig terjed, míg a változó kúpszöveget kereső eljárás napokban mérhető. Viszont az azonos szögű komplex optimalizálás soha sem adhat eredményül kisebb teljesítményfelvétellel rendelkező optimumot, mint a változó szögű eljárás. A két komplex optimum közötti különbség feltáratlan volt eddig.

Ezen érvek alapján szükségszerű volt a két optimum lehető legtöbb paraméterérték esetén történő összevetése, annak eldöntésének érdekében, hogy a kis számítási idejű azonos szögű eljárás mekkora hibával dolgozik a változószögű komplex optimalizáláshoz képest. A változó szögű algoritmus tíz hetes futtatásából kapott eredményeit vettem össze az azonos szögű eljárással.

A komplex optimalizálásokat a már említett három anyagminőség esetén végeztem el: **Al99,5; CuE; C10**. Az egyes optimalizálásokat különböző kezdő huzalátmérővel indítottam el: a legnagyobb **20 mm** volt, míg a további futtatások esetén 0,6 mm-ként csökkentettem ezt az értéket, egészen **0,2 mm**-ig. Egy sorozathúzási folyamat teljes alakváltozása megegyezett az adott anyag hozzávetőleges alakíthatóságának nagyságával. Ekkor hőkezelés ugyan nincs a húzási technológiában, viszont mégis jó összehasonlítást kaphatunk a két komplex optimalizáló célfüggvényről. A kezdő huzalátmérő változtatásán kívül a húzási sebességet is változtattam. A húzási végsebesség **1, 4 és 7 m/s**-ra lett választva. Összesen - a sebességek, kezdő huzalátmérők és anyagminőségek függvényében - 102 technológiai beállítás esetén számoltam végig a két komplex optimumot. Ezek a paraméterek a huzalgártásban alkalmazott technológiai értékhatározó nagy részét lefedik, ezáltal tetszőleges húzási sorozatra jó közelítéssel megadja a komplex optimumok viselkedését.

A 54., 55. és 56. ábrán láthatóak a komplex optimumok az egyes fokozatokhoz tartozó félkúpszögei a kezdő huzalátmérő és a húzási végsebesség függvényében.

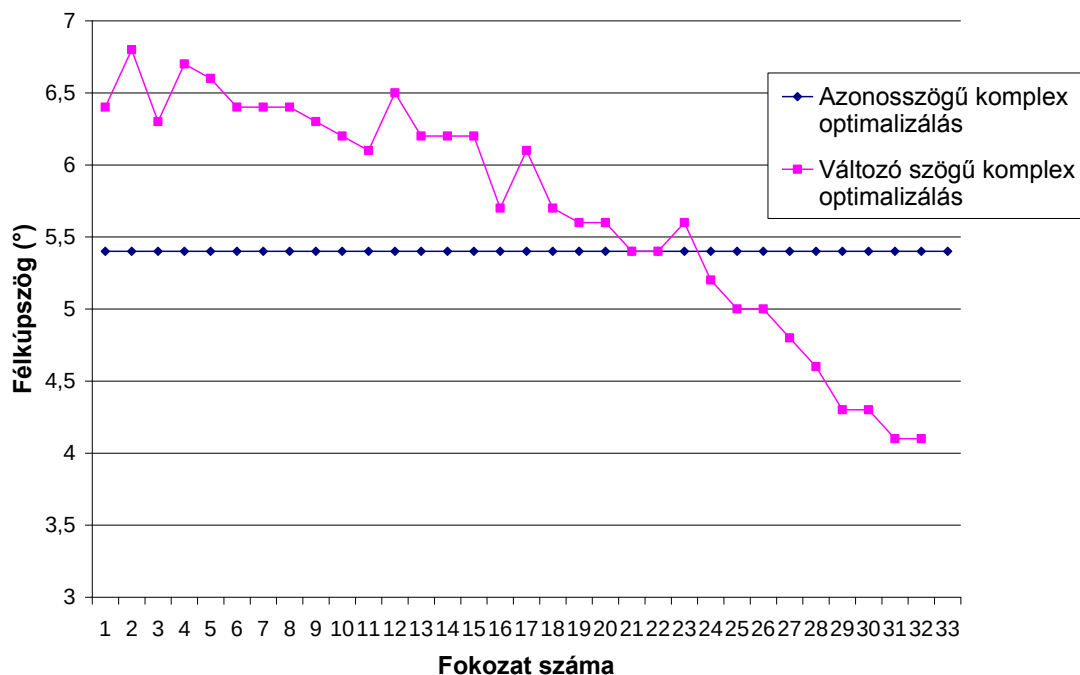
Láthatjuk az ábrákon, hogy a változó szögű komplex optimalizálás eredményeképpen minden esetben, olyan húzási sorozatot kapunk, amely 1 vagy 2 fokozattal kevesebbet tartalmaz. A húzási sebességtől, és a huzalátmérőtől függetlenül azt figyelhetjük meg, hogy a változó szögű esetben a fokozatok számának előre haladtával, így a huzalkeresztmetszet csökkentével együtt egy csökkenő trendet figyelhetünk meg a félkúpszögekben, bár a változás egyáltalán nem mondható monotonnak.

A szerszámok számának és geometriájának összehasonlítása mellett a legfontosabb a teljes alakításhoz szükséges, sorozathúzó berendezés meghajtása által felvett teljesítmény nagyságának az összevetése. Ehhez itt is a (31) abszolút hibanormát használtam fel, amely inputként azonos indexű helyre, az azonos technológiai beállításához tartozó komplex optimalizálásokkal kapott teljesítményfelvételeket helyettesíti be. A 102 beállításra (mintára) kapott hibanorma **0,0396**. Ez az érték elenyésző, így kijelenthetjük, hogy keresztmetszettől, húzási sebességtől, anyagminőségtől függetlenül az azonos szögű komplex optimalizálás nem okoz jelentős eltérést a teljesítményfelvétel tekintetében a változó szögű komplex optimalizáláshoz képest.

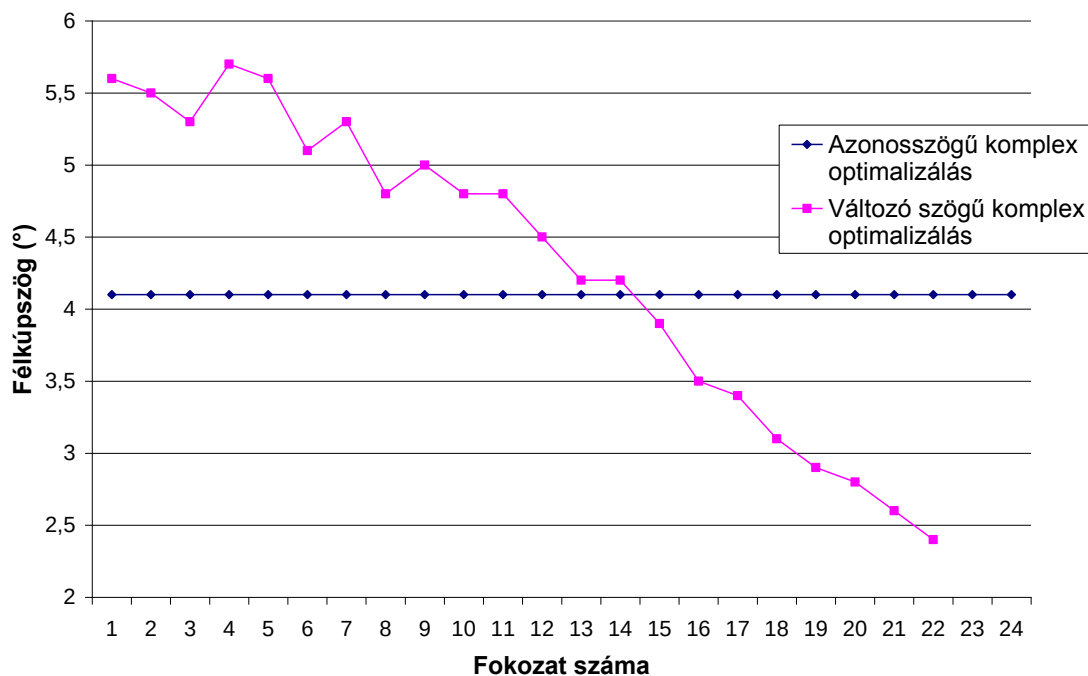
A hibanormák viselkedését az 57., 58. és 59. ábrán részletesebben is megvizsgáltam a kezdő huzalátmérő, a húzási végsebesség, és az anyagminőség függvényében. Az 57. ábra azt mutatja, hogy 3...4 mm kezdőátmérő felett a teljesítményfelvétel hibanormája konstans jelleggel 0,04 alatt van. Kisebb kezdő huzalátmérők esetén a hibanorma növekedni kezd. A növekedés meredeksége 1 mm alatt válik jelentőssé, bár még itt a hibanorma értéke 0,045 alatt van. Mint azt a modellalkotással foglalkozó fejezetekben is láttuk, hajszálhúzás esetén egyes komplex optimalizáló célfüggvénybe installált zárt analitikus összefüggések már nem helytállóak, így 0,5 mm alatti optimalizálás a disszertációban leírt rendszerrel nem javasolt. Viszont az elfogadott tartományban egy kicsiny és konstans eltérést találunk a komplex optimalizációk között, ami indokolttá teszi a rövidebb számítási idejű azonos szögű algoritmus használatát technológia tervezés esetén.

A komplex optimumok eltérését a sebesség függvényében vizsgálva (58. ábra) azt látjuk, hogy a hibanorma a húzási végsebességgel együtt növekszik, bár nincs egyenes arányosság köztük, az összefüggés egynél kisebb kitevőjű hatványfüggvénnyel közelíthető. A függvény viselkedéséből előre jelezhető, hogy 20 m/s esetén túllépi a hibanorma a 0,1-es sávot.

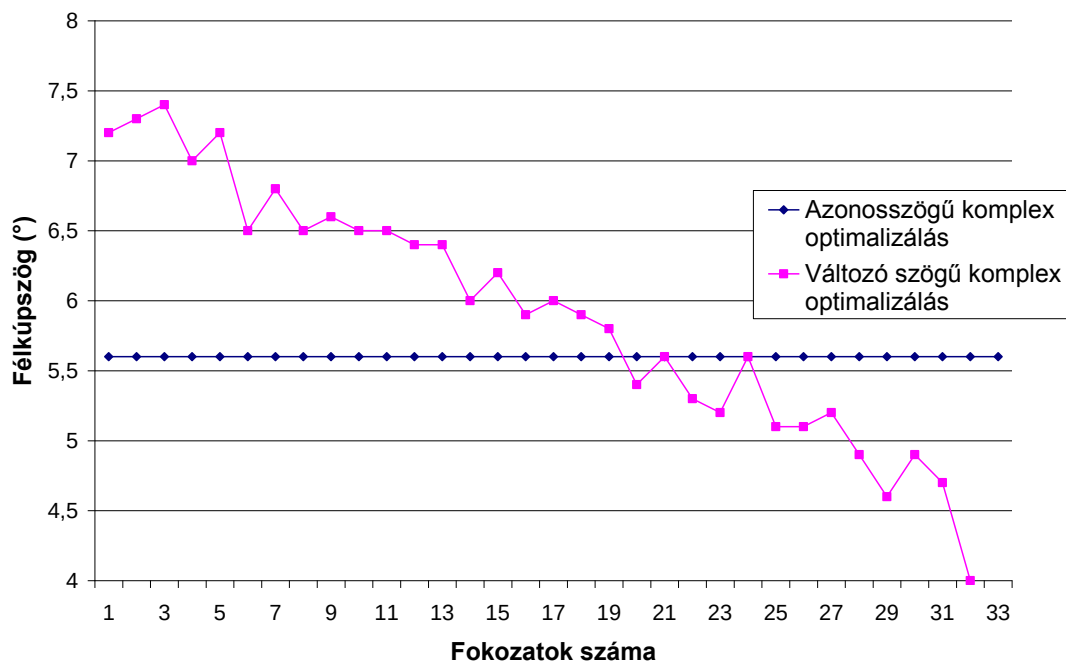
A három anyagminőség függvényében vizsgálva az eltérést, azt láthatjuk, hogy az anyag keményedési kitevője hatással van a hibanorma értékére. Minél nagyobb keményedéssel reagál az anyag az alakváltozásra, annál nagyobb az eltérés a komplex optimumok teljesítményfelvételei között. Az anyagminőség hatása viszont nem jelentős, az 59. ábrán láthatjuk, hogy a hibanormák legnagyobb különbsége is 0,01 körüli, és a réz esetében is a hibanorma jóval 0,045 alatt van.



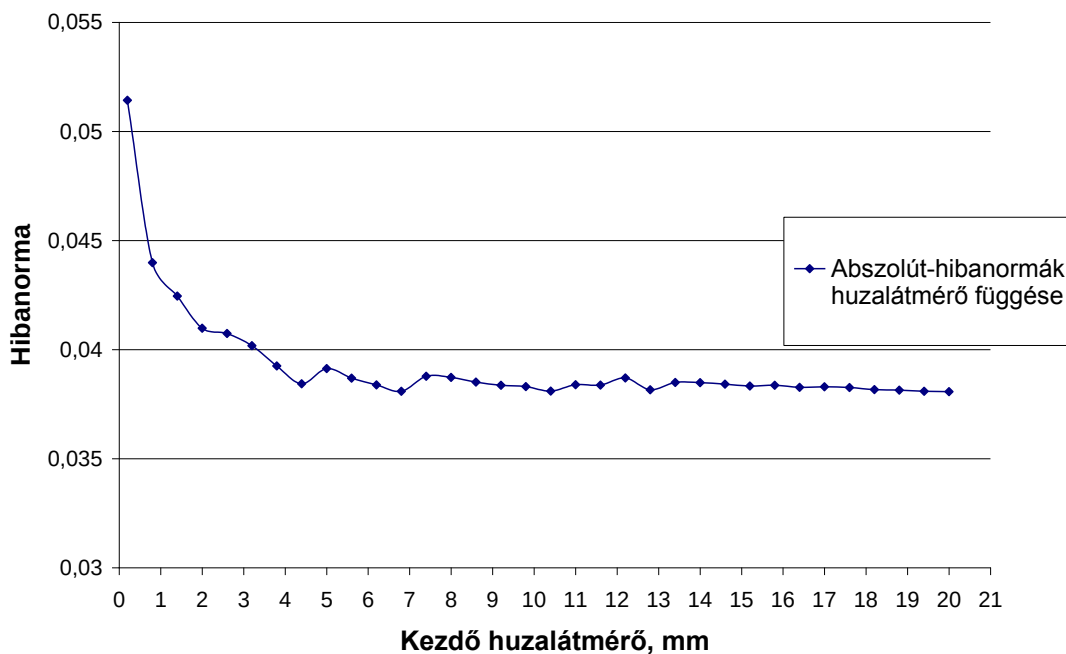
54. ábra. A kúpszögek alakulása a komplex optimalizáló célfüggvények függvényében 20 mm kezdő-, 2,575 mm kész-huzalátmérő, 1 m/s húzási végsebesség, és Al99,5 anyagminőség esetében.



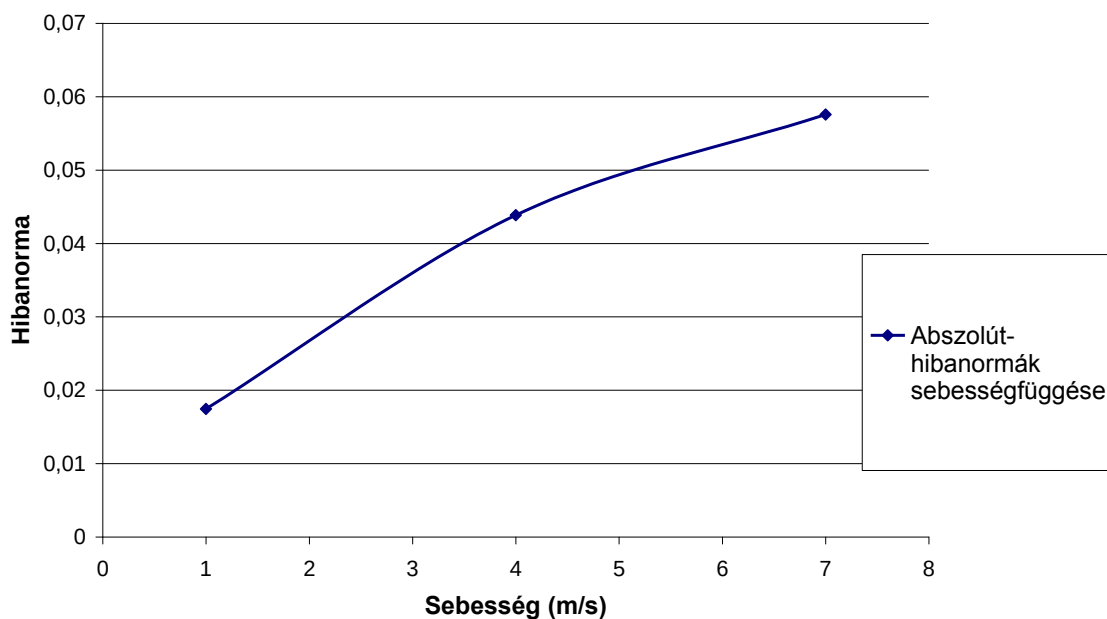
55. ábra. A kúpszögek alakulása a komplex optimalizáló célfüggvények függvényében 20 mm kezdő-, 2,575 mm kész-huzalátmérő, 7 m/s húzási végsebesség, és Al99,5 anyagminőség esetében.



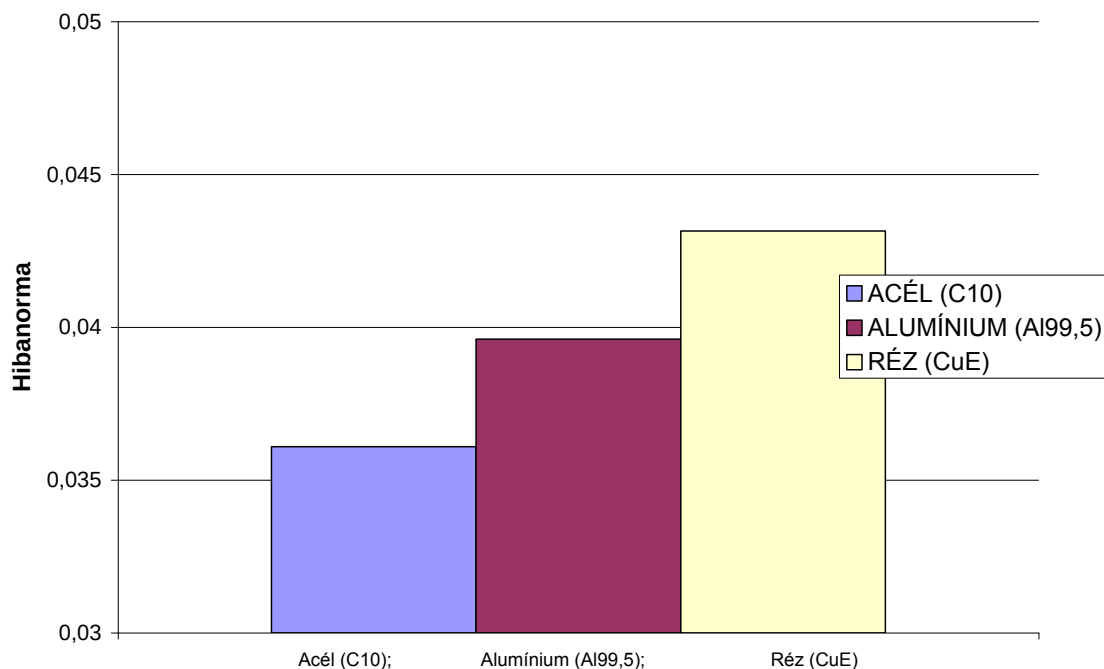
56. ábra. A kúpszögek alakulása a komplex optimalizáló célfüggvények függvényében 2,6 mm kezdő-, 0,335 mm kész-huzalátmérő, 1 m/s húzási végsebesség, és Al99,5 anyagminőség esetében.



57. ábra. A komplex optimumokhoz tartozó teljesítményfelvételek közötti eltérés abszolút hibanormákkal kifejezve a kezdő huzalátmérő függvényében, az alakíthatóság határáig végezve a húzást minden anyagminőség esetében.



58. ábra. A komplex optimumokhoz tartozó teljesítménnyelvételek közötti eltérés abszolút hibanormákkal kifejezve a húzási végsebesség függvényében, az alakíthatóság határáig végezve a húzást minden anyagminőség esetében.



59. ábra. A komplex optimumokhoz tartozó teljesítménnyelvételek közötti eltérés abszolút hibanormákkal kifejezve az anyagminőség függvényében, az alakíthatóság határáig végezve a húzást minden anyagminőség esetében.

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy az eltérés az azonos szögű és a változó szögű komplex optimalizáció eredményei között elenyésző mértékben érzékeny a kezdő átmérőre és az anyagminőségre. Viszont a húzási sebességnek már jelentősebb hatása van a komplex optimumokhoz tartozó hibanormákra. Durva-, közép-, és finomhúzógépek esetén hozzávetőlegesen 10 m/s végsebesség alatt az azonos szögű komplex optimalizáló célfüggvény eredményét minimális hibával elfogadhatjuk a termékminőség, mennyiség és költséghatékonyság szempontjából legjobb húzás-technológiai sornak. Viszont a hibanorma trendje alapján azt várhatjuk, hogy nagyobb sebességek esetén már jelentősebb - 8 %-nál nagyobb - eltérés lép fel a teljesítmény-felvétel tekintetében, valamint a húzási sorozatok is több mint 10%-kal tudnak megrövidülni, azaz egytizedével kevesebb fokozat kellhet. Ezért nagyobb végsebesség esetén már a változószögű komplex optimalizáció ajánlott az ipari eljárás szempontjából lehető leghatékonyabb technológiai sornak a tervezéséhez.

6. Összefoglalás és a kapott eredmények felhasználhatósága

A disszertáció fő célkitűzése az ipari technológiatervezés gyorsítása és hatékonyabbá tétele. További – a fő célkitűzés megvalósítását is elősegítő – célom volt az irodalomban közölt, technológiai paramétereket leíró modellek közül a legmegfelelőbb kiválasztása, valamint huzalhúzási kísérletek végzése a Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológia Intézet Képlékenyalakító Laboratóriumában, vertikális elrendezésű egyfokozatú durvahúzógépen, hogy a hőmérsékleti viszonyokról és a súrlódási együttható viselkedéséről újabb információkhoz jussak.

Munkám gerincét - fő célkitűzésemnek megfelelően - a huzalhúzási folyamatok új optimalizáló eljárásainak kidolgozása alkotta, mellyel az ipari technológiatervezést hatékonyan segíthetem.

Egy hatékony optimalizáló eljárás esetében, melynél kívánalom a konkrét optimumok számíthatósága, fontos a technológiai paramétereket leíró/számító modell definiálása. Ezért a már irodalomban közölt modellek halmazára értelmeztem két matematikai normát, melyekkel meghatározható számszerűen, hogy az adott modell milyen mértékben közelíti a mért adatokat. A (31,32) segítségével meghatározható a modellek között egy jósági sorrend, és kiválasztható a mért eredményeket legjobban közelítő elméleti leírás. A mért adatokat és a hozzájuk tartozó kísérleti paraméterértékeket túlnyomórészt szintén a szakirodalmi cikkekben találtam, valamint magam is végeztem huzalhúzási kísérleteket az Intézet Képlékenyalakító Laboratóriumában, melyekkel a huzalhőmérsékleti adatok számát gyarapítottam.

A modellezendő technológiai paraméterek a húzóerő, húzófeszültség, huzal hőmérséklet, alakítási szilárdság, súrlódási tényező voltak. Ezen modellező elméleteket körét szűkítettem, figyelembe véve az optimalizálási számító-eljárások komplexitását. A sorozathúzási eljárások technológiai paramétereit leíró módszerek matematikai szerkezetéből az olvasható ki, hogy optimalizálásuk: nemlineáris optimalizálásnak minősül. Nemlineáris optimalizálási esetben az extrémum helyek létezése, és számíthatósága mellett, az optimumot kiszámoló eljárás gyorsasága is nagyon fontos. Ezért a modellek kiválasztásánál nemcsak a mért adatokat jól közelítő, hanem a gyorsan számolható módszereket választottam. Ezek a modellek a zárt, explicit analitikus egyenletekkel leírt módszerek halmazából kerülnek ki, így én is ezek között kerestem a mérési adatokat legpontosabban megadó elméleti leírásokat. Munkámban megmutattam,

hogyan huzalhúzás esetén a zárt, explicit analitikus formulákkal leírt modellek is tudják produkálni azt a pontosságot, mint a nagyságrendekkel nagyobb számítási igényű végeselemes módszerek, köszönhetően az alakításhoz tartozó egyszerű geometriának. Ezekből következően megállapítottam, hogy nem csak a számítási igény, hanem a pontosság terén is helytállnak a zárt, explicit analitikus formulákkal leírható módszerek, így a hibanormák segítségével az általuk képzett modellhalmazból kerestem meg a legmegfelelőbbet.

A hibanormák segítségével sorozathúzás esetére a következő technológiai paramétereket leíró modelleket találtam a legjobbnak: fokozatonként fellépő húzóerőkre a (36,37), a fokozatonkénti huzalhőmérséklet növekedésre (52) egyenletekkel definiált elméleteket fogadtam el.

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. Végül a (45) modellt alakítottam ki a hiba javítására. A súrlódási tényező sebességfüggő viselkedésére a Stribeck diagram ad jó támpontot, ám annak a hiperbolikus lecsengését szintén a Képlékenyalakító Laboratóriumban végzett húzási kísérleteimmel tudtam pontosan megadni az (55) egyenlettel, a MOL Fortilmo AWD 150 Special olajjal történő nedves kenés esetére.

Az alakítási szilárdság leírására az igen jó pontossággal rendelkező és széleskörűen elterjedt Hajduk-féle modellt fogadtam el, ezáltal egy olyan komplex sorozathúzási modellt definiálva, mely minden paraméterében számítható, kísérleti mérések végzése nélkül. Így pusztán számítástechnikai eszközök segítségével olyan eredmény kapható ebből a komplex modellből, mely a valós, mérési adatokkal megfelelően pontos egyezést mutat.

Munkám további részében a legtöbb direkt módon szabályozható technológiai paraméterre optimalizáló célfüggvényeket írtam fel, melyek a termékminőség, a költséghatékonyság és a termelékenységi optimumát keresik.

Első lépésben a fokozatonként fellépő alakváltozásokat optimalizáló célfüggvényt írtam fel, melynek értelmezési tartományát meghatározó feltételrendszerét a (61,62) kihasználtsági tényezők gyakorlati korlátjaival adtam meg. Ezzel egy minimális fokozatszámú húzási sorozatot kapunk a terméke minőségének biztosításával együtt.

Következő lépésben a (73) fajlagos alakítási munka egyenletének minimalizálásával a sorozathúzási eljárásba - az anyag alakíthatóságának kimerülése miatt - beiktatandó lágyítás helyét meghatározó célfüggvényt írtam fel. Eredményként egy alakváltozás kapunk, mely elérésénél a húzott terméket lágyítani kell, ezáltal a fajlagos energia-felvételt, és így a költségeket minimalizáljuk.

Harmadik lépésben az említett teljesítmény-optimalizációt terjesztettem ki sorozathúzás esetére. Ez a célfüggvény a kúpszögek korlátos halmazán (3° - 30°) keresi a meghajtás teljesítmény-igényét kifejező (74) függvény minimumát.

Végül a kenőanyag hőmérsékletre vonatkozó ipari korlátokat kiterjesztettem az általános huzalhőmérsékletre, mely a huzalsebességre vonatkozóan ad egy felső korlátot.

A meghatározott optimalizáló célfüggvényekből egyetlen komplex optimalizáló célfüggvényt írtam fel. A komplex célfüggvény, olyan célfüggvény, melynek értelmezési tartományát korlátozó feltételrendszerében egyenletek és egyenlőtlenségek helyett más optimalizáló célfüggvények találhatók. Az irodalomban a sorozathúzás technológia paramétereire vonatkozó komplex optimalizációs eljárás – szakirodalmi

kutatásaim szerint – nem lett felírva eddig. Ezáltal az általam felírt komplex célfüggvény egy új utat nyit meg a sorozathúzási technológiatervezés egyszerűbbé, ugyanakkor kidolgozottabbá tételében.

A (75) komplex optimalizáló eljárás elsőrendű célfüggvénye a teljesítmény-igényt optimalizáló célfüggvény, melynek feltételrendszerében vannak a fajlagos alakítási munkát, a fokozatonkénti alakváltozást, illetve a huzalhőmérsékletet optimalizáló célfüggvények.

Egy újabb komplex optimalizáló célfüggvényt kaptam (lásd (76) függvény) egy további feltételnek a feltételrendszerbe beépítésével. A feltétel az a megkötés volt, hogy az optimumhoz tartozó kúpszögeknek minden fokozatban azonosaknak kell lenniük. Ez tovább szűkíti a célfüggvény értelmezési tartományát, viszont a számítási igényét is tovább csökkenti.

A komplex optimalizáló célfüggvény eredményét - nem-linearitásából következően - analitikusan nem tudjuk megkapni, hanem algoritmikus, rekurzív módszerek segítségével válnak csak kiszámíthatókká.

Munkám következő lépésében a két (azonos- és változó-szögű) komplex optimalizáló célfüggvényt hasonlítottam össze, a számolt optimumok és a számítási idejük alapján.

A komplex optimalizáló eljárások algoritmizálásával megállapítottam a két célfüggvény számítási ideje közötti különbséget. Azt találtam, hogy az eltérés a számítási idők között legalább 2 nagyságrendű, azaz 100-szoros (például néhány perccel szemben egy teljes napos futási idő áll).

A komplex optimalizáló eljárásokat szoftveresen is megvalósítottam. A szoftveres futtatások eredményeit összevetve megállapítottam a komplex optimumok közötti eltéréseket, a meghajtás teljesítmény-igényének és az összes fokozatszám összehasonlításával. Azt kaptam, hogy az eltérés abszolút hibanormája 0,04 alatt van, tehát általánosságban jó egyezést mutat a két komplex optimalizálás.

Részletesebb vizsgálatok után arra a következtetésre jutottam, hogy finom-, közép-, durvahuzalok esetén (átmérő: 0,5...20 mm), 10 m/s végsebesség alatt anyagminőségtől függetlenül a jelentősen rövidebb számítási idővel bíró azonos-szögű optimalizáló eljárás alkalmas egy ipari technológia tervezés leghatékonyabb megvalósítására. Ezekről eltérő sebesség illetve átmérő esetén a sorozathúzási technológia tervezéséhez – ha az ipari technológia hatékonyságának további növelése a cél – a változó-szögű komplex optimalizálás ajánlott.

7. Summary

Computer-aided planning and complex optimization of the drawing technology of metallic wires with circular cross-section

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 (3° - 30°).

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.

8. Tézisek

- 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 huzalhúzási paramétereket zárt (explicit) analitikus formulákkal leíró modellek halmazát adtam meg, figyelembe véve azt a tényt, hogy ezen modellek a legkisebb számítási igénnyel, és – amint azt kimutattam – azonos pontossággal rendelkeznek a többi húzáselméleti 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 huzalgyártó ipari gyakorlatban általánosan használt acél, alumínium és réz anyagcsoportok esetén. A komplex modell – az anyagminőségek nagy családjára (a nagyszámú kutatás eredményeképpen) ismert paraméterekkel rendelkező Hajduk-féle alakítási szilárdság modell mellett – az alábbiakból épül fel:

- 1.1 Az abszolút és kvadratikus hibanormák segítségével igazoltam, hogy a fokozatonként fellépő húzóerő nagysága, a (36, 37) egyenletek segítségével írható le legpontosabban, ha ellenhúzóerő is felléphet a húzási folyamatban (az egyes változók értelmezését lásd a jelölések listájában).

$$F = k_{k, Ellen} \cdot \Delta A \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right) + 0,77 \cdot A_2 k_{fk} \cdot \alpha + F_{Ellen} \quad (36)$$

$$k_{k, Ellen} = \frac{k_{fk} (1 - 0,385\alpha) - \sigma_{Ellen}}{1 + \frac{\Delta A}{2A_2} \left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right)} \quad (37)$$

- 1.2 Az abszolút és kvadratikus hibanormák segítségével igazoltam, hogy a fokozatonként fellépő hőmérsékletnövekedést a (52) egyenlet írja le a legpontosabban

$$\Delta T = k_{fk} \frac{\varphi + \alpha}{\rho c} + \frac{1 - \left(1 - \frac{2b}{D_2}\right)^2}{3} 1,22 \beta_{súrl} \mu k_{fk} v_{átl} \left(\frac{t_{al}}{\lambda c \rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (52)$$

- 1.3 Kimutattam, hogy az 1.1 pontban legpontosabbként elfogadott húzóerő modelltől származtatott, Geleji által felírt analitikus maximális feszültség modell elvi hibát tartalmaz kis alakváltozások esetében. Kidolgoztam a (45) egyenletekkel leírt modellt, mely a Geleji modell hibáját javítja, és a maximális feszültség jó analitikus leírását adja.

$$\sigma_{\max} = k_{fk} \left((1 - 0,385\alpha) \epsilon \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \frac{1}{1 + \epsilon \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right)} + \alpha \left(1,27 + \frac{1}{\epsilon \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right)} \right) e^{\frac{-0,03}{\epsilon}} \right) \quad (45)$$

- 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:

$$\mu(v) = 0,0072 + \frac{1}{6,93 \cdot v + 5,1} \quad (55)$$

- 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 (63) alakváltozást maximalizáló célfüggvényt.

$$\max \{ \varphi | \xi = \text{konst}, \zeta = \text{konst} \} \quad (63)$$

A célfüggvényt pontosítottam úgy, hogy a feltételben szereplő gyakorlati átlagos és maximális kihasználtsági tényezők konstans értékeit meghatároztam. Az adott konstansok meghatározása során a kihasználtsági tényezők elméleti optimumhoz tartozó értékét, valamint az anyagjellemzők inhomogenitását és gyártási bizonytalanságokat figyelembe vevő biztonsági tényezőt használtam fel. A biztonsági tényező meghatározását a gépészeti tervezői szempontok figyelembevételével végeztem el.

A célfüggvény feltételrendszerében szereplő 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 fajlagos energiafelhasználása 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 (73) fajlagos alakítási integrálfüggvény értéke minimális.

$$W = \int_0^{\varphi_{\text{lágyítás}}} k_f(\varphi) d\varphi + \int_0^{\varphi - \varphi_{\text{lágyítás}}} k_f(\varphi) d\varphi \quad (73)$$

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

- 2.3 Kidolgoztam sorozathúzás esetére a teljesítményt 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 (74) függvény minimalizálódik.

$$P_{\text{össz}} = \sum_{h=1}^H \left(\sum_{i=1}^{N_h-1} \frac{F_i v_i + (F_i - F_{\text{Ellen},i+1}) v_{\text{rel},i}}{\eta_{\text{meghajtás},i}} + F_{N_h} v_{N_h} \right) \quad (74)$$

A meghajtás teljesítmény-igényének minimalizálásával a fajlagos energiafelhasználás 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 elsőrendű 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 technológia tervezés egy eljárás keretein belül elvégezhető, az eddigi tervezői processzusokhoz képest kidolgozottabb módon.

$$\min \left\{ P_{\text{össz}} \mid \max(\varphi | \xi = (0,5 \dots 0,55); \varsigma = (0,5 \dots 0,55)) \}; \min(W); \right. \\ \left. T_{\text{átl,huzal}} \leq T_{\text{korlát}}(\text{kenés}); \forall i, j \in \{\text{Fokozatok}\} \alpha_i = \alpha_j \right\} \quad (76)$$

$$\min \left\{ P_{\text{össz}} \mid \max(\varphi | \xi = (0,5 \dots 0,55); \varsigma = (0,5 \dots 0,55)) \}; \min(W); T_{\text{átl,huzal}} \leq T_{\text{korlát}}(\text{kenés}) \right\} \quad (75)$$

- 4 Bizonyítottam, hogy az azonos-szögű és a változószögű komplex optimalizáló eljárások által eredményül kapott teljesítmény-igények különbsége olajba mártással történő finom-, közép-, durvahuzal húzása esetén nagyon kicsi. Az komplex optimumok közötti eltérés abszolút hibanormája 0,04 alatt van. A huzalanyagok

alakváltozó képességéig történő húzás esetén a húzási sorozat fokozatszáma maximálisan 1-2 fokozattal csökken.

- 4.1 Bizonyítottam, hogy az azonos-szögű és a változószögű komplex optimalizáló eljárások eredményének különbsége 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 a huzalhúzási technológia tervezésekor a kisebb számítási igényű (76) azonos-szögű komplex optimalizáló célfüggvény alkalmazható a (75) változószögű optimalizáló célfüggvénnyel hozzávetőlegesen azonos pontossággal, a gyártó által megválasztható technológiai paraméterekre vonatkozó feltételek teljesülése mellett: 10m/s-nál kisebb húzási sebesség, 0,5...20 mm huzalátmérő, tetszőleges huzalanyag.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném megköszönni konzulenseimnek: Dr. Mertinger Valériának, Dr. Voith Mártonnak és Dr. Zupkó Istvánnak iránymutatásukat, támogatásukat és segítségüket munkámban és a disszertációm elkészítésében. Köszönettel tartozom Bán Róbertnek és Márkus Zoltánnak a húzási kísérleteimben végzett munkájukért és ötleteikért, Horváth Tibornak és Bézi Zoltánnak a programozási illetve végeselemes feladatokban nyújtott segítségükért.

Dr. Roósz Andrásnak és Dr. Gácsi Zoltánnak köszönöm a biztatást és a támogatást, valamint a disszertációm megírásához szükséges háttér biztosítását.

Köszönet kollégáimnak (a teljesség igénye nélkül): Dr. Krállics Györgynek, Pálincás Sándornak, Szűcs Máténak, Dr. Harcsik Bélának, Puskás Csabának, Mikó Tamásnak, Szabó Gábornak,..., hogy mindig bizalommal fordulhattam hozzájuk segítségért.

Végül, de nem utolsó sorban, hálásan köszönöm családomnak, hogy munkám közben töretlenül támogattak, bíztak bennem és nagy türelemmel viseltettek irántam.

A disszertáció a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

9. Irodalomjegyzék

- 1 Reisz Gyula: Inhomogén alakváltozás hatásának vizsgálata rúd-, huzal-, csőhúzáskor. Miskolc, NME, 1969. Disszertáció.
- 2 Kiss E., Voith M.: Kohógéptan, Tankönyvkiadó: Budapest, 1974.
- 3 Barkóczy István: Sodronykötél és huzal, Fux Zrt.: Miskolc, 1996.
- 4 Voith Márton: A képlékenyalakítás elmélete, Miskolc Egyetemi Kiadó: Miskolc, 1998.
- 5 Avitzur, Betzalel: Metal Forming, McGraw-Hill Book company: New York, 1968.
- 6 Nistor, L., Ancău, M.: Creșterea productivității în trefilarea multiplă a sârmelor prin optimizarea numărului de trefilări folosite. Metalurgia, Vol. 59., 2007/2., pp.: 5-13.
- 7 Geleji Sándor: Die Kräfte und der Kraftbedarf bei der Formgebung im bildsamen Zustande der Metalle. Mitteilungen der berg- und hüttenmänn. Abt., Sopron, Vol.14., 1942., pp.:268-311.
- 8 Geleji Sándor: Rúd- és csőhúzás. Magy. Tud. Akad. Műsz. Tud. Oszt. Közleményei, Vol. 33., 1964., pp.: 365-382.
- 9 Sachs, G.: Zur Theorie des Ziehvorgangs. Zeitschrift für Mathematik und Mechanik, Vol. 7., 1927., pp.: 235.
- 10 Kiss E., Voith M.: Kohógéptan III. Tankönyvkiadó: Budapest, 1969.
- 11 Körber F.; Eichinger A.: Die grundlagen der bildsamen Formgebung. Mitt. K.Wilh. Inst. Eisenforsch, Vol. 22(395), 1940., pp.: 57-80.
- 12 Kalpakjian, S.: Manufacturing Processes for Engineering Materials, 2nd ed., Addison-Wesley: Reading, MA, 1991, pp. 739.
- 13 Siebel, E.: Der derzeitige Stand der Erkenntnisse über die mechanischen Vorgänge beim Drahtziehen. Stahl u. Eisen, Vol. 66/67., 1947., pp.: 171-180.
- 14 Whitton, P. W.: The calculation of drawing forces and die pressure in wire drawing. J. Inst. Metals, Vol. 85., 1958., pp.: 417.
- 15 Perlin, I. L.: Теория волочения, Металлургиздат: Москва, 1957.
- 16 Pomp, A.:Stahldraht, Verl. Stahleisen: 1952.
- 17 Avitzur B.: Analysis of wire drawing and extrusion through conical dies of large cone angle. Trans. ASME. J. Eng. Ind., Vol. 86, 1964., pp.: 305–316.
- 18 Davis, E. A. ; Dokos, S.J.: Theory of Wire Drawing. J. appl. Mech., Vol.11:A, 1944., pp.: 193-198.
- 19 Lippmann, H., Mahrenholtz, O.: Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe, Springer-Verlag: Berlin, Germany, 1967.
- 20 Rojas, H.A.G., Calvet, J. V., Bubnovich, V. I.:A new analytical solution for prediction of forward tension in the drawing process. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 198., 2008., pp.: 93–98.
- 21 Haddi, A., Imad, A., Vega, G.:Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process. Materials and Design, Vol. 32., 2011., pp.: 4310–4315.
- 22 Bacherer-Soliz, G.: Elementare Plastizitätstheorie der Umformtechnik in werkstoffgerechter Darstellung. RWTH Aachen, 1978. Disszertáció.

- 23 Troost, A.: Werkstoffmechanische Grundlagen der Fertigungsverfahren. Vorlesung an der RWTH Aachen: Aachen, 1991.
- 24 Linicus, W., Sachs, G.: Versuche über die Eigenschaften gezogener Drähte und den Kraftbedarf beim Drathziehen. Mitteilungen der deutsche Materialprüfung. Anst. Sonderh. (Spanlose Formung der Metalle), Vol. 16., 1931., pp.: 38-66.; Zeitschrift für Metallkunde, Vol. 23., 1931., pp.: 205-210.
- 25 Vega, G., Haddi, A., Imad, A.: Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing. Materials and Design, Vol. 30., 2009., pp.: 3308–3312.
- 26 Marius Tintelecan: Evoluția forței în procesul de trefilare a sârmelor de oțel cu strat protector de Zn (Respectiv Zn-Al). Metalurgia, Vol. 57., 2005/12., pp.: 24-31.
- 27 Николаев, В.А., Таратута К.В.: Возможность уменьшения трения при волочении стали в сборном инструменте. СТАЛЬ, №8, 2001., pp.:89-92.
- 28 Николаев, В.А.: Волочение проволоки с противонапряжением. Известия высших учебных заведений. Черная Metallургияб №1, 2007., pp.: 31-34.
- 29 Трофумое В.Н.: Определение долевых напряжений при волочении биметаллической заготовки. Известия высших учебных заведений. Черная Metallургияб №5, 2006., pp.: 23-26.
- 30 Столяров, А.Ю., Харитонов, В.А., Гофман, Н.Г.: Разработка рациональных маршрутов волочения проволоки для металлокорда. СТАЛЬ №7, 2006. P.:66-68.
- 31 Харитонов, В.А., Зюзин, В.И., Радионова, Л.В., Ролышиков, Л.Д.: Новые технологические смазки для волочения стальной проволоки. СТАЛЬ № 12, 2001., pp.:49-50.
- 32 Petz Dénes: Bevezetés a lineáris analízisbe és alkalmazásaiba. Egyetemi jegyzet, BME, TTK, Budapest, 2012. (<http://www.math.bme.hu/~petz/la.pdf>)
- 33 Diószegi György: Gépszerkezetek méretezési zsebkönyve, Műszaki Könyvkiadó: Budapest, 1984.
- 34 Ruminski, Maciej; Majta, Janusz; Luksza, Janusz; Skowronek, Rafal: Modelling and experimental study of multi-pass wire drawing of hipo-eutectoid steels. Steel Research, Vol. 73., 2002., No. 11., pp.:480-490.
- 35 Celentano, D. J., Palacios, M. A., Rojas, E. N., Cruchaga, M. A., Artigas, A. A., Monsalve, A. E.: Simulation and experimental validation of-multiple-step wire drawing process. Finite Elements in Analisis and Design, Elsevier, 2008., pp.:18.
- 36 A DHCF 17 típusú húzó gép technológiai paramétereinek elméleti és kísérleti vizsgálata. Kutatási jelentés. Készítette: Nehézipari Műszaki Egytem Kohógéptani és Képlékenyalakítási Tanszék. 1966.
- 37 Semiatin, S.L.: ASM Metals Handbook, Volume 14., ASM International: Metals Park, Ohio, 1988.
- 38 E. Felder, C. Levraua, M. Mantel, N.G. Truong Dinh: Identification of the work of plastic deformation and the friction shear stress in wire drawing. Wear (2011), doi:10.1016/j.wear.2011.05.029.
- 39 Verhoeven, J.D.: Fundamentals of Physical Metallurgy, John Wiley & Sons: Toronto, 1975.
- 40 Kiss Ervin: Képlékeny alakítás, Tankönyvkiadó: Budapest, 1987.
- 41 Geleji Sándor: Bildsame Formgebung der Metalle, Akademie-Verlag: Berlin, 1967.

- 42 Michael T. Hillery, Vincent J. McCabe: Wire drawing at elevated temperatures using different die materials and lubricants. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 55., 1995, pp.: 53-57.
- 43 S.K. Lee, D.C. Ko, B.M. Kim: Pass schedule of wire drawing process to prevent delamination for high strength steel cord wire. *Materials and Design*, Vol.: 30, 2009, pp.: 2919–2927.
- 44 Sang-Kon Lee, Seon-Bong Lee, Byung-Min Kim: Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72 wt% C steel wire. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210., 2010, pp.: 776–783.
- 45 Vámos Endre: *Tribológiai kézikönyv*, Műszaki Könyvkiadó: Budapest, 1983.
- 46 Harkányi István: A súrlódás és kopás mechanizmusa. *Gép*, Vol. 27., 1975, pp.: 99-105.
- 47 Wolfhart Müller: *Temperaturverhältnisse und Reaktionskinetik beim Ziehen und Wärmebehandeln von Draht*. Freiberg, TU Bergakademie, 1998. Doktori disszertáció.
- 48 Kapitány Sándor: Az alakítási sebesség hatása a súrlódási feszültségre. *Gépgyártástechnológia*, Vol. 20., 1980, pp.: 397-400.
- 49 Eickemeyer, J., Vogel, H.-G., Reichert, J.,Rehm, M.: Some tribological and enviromental aspects in metal drawing. *Tribology International*, Vol. 29., 1996, pp.:193-197.
- 50 Tattersal, G., H.: Hydrodynamic lubrication in wire drawing. *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 3., 1961, pp.: 378-393.
- 51 Hensel, A., Spittel, T.: *Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie: Leipzig, 1978.
- 52 Rapcsák Tamás: Nemlináris optimalizálás. Egyetemi jegyzet, Budapesti Corvinus Egyetem, MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézete, Budapest, 2007. (www.oplab.sztaki.hu/tanszek/download/nemlinopt.pdf)
- 53 J. G. Wistreich: Investigation of the mechanics of wire drawing. *Proc. Inst. Mech. Engrs.*(London), Vol. 169, 1955, pp. 654-665.
- 54 W. Evans, B. Avitzur: Measurement of friction in drawing, extrusion and rolling. *Trans ASME Series F, J Lub Tech.*, Vol. 90, 1968, pp. 72-80.
- 55 U. S. Dixit, P. M. Dixit: An analysis of the steady-state wire drawing of strain-hardening materials, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 47, 1995, pp. 201-229.
- 56 Z. Zimmerman, H. Darlington, H. E. Kottkamp: Selection of operating parameters to prevent central bursting defects during cold extrusion. In: Hoffmanner AL (ed) *Metal forming: interrelation between theory and practice*. Plenum Press, New York, 1979, pp. 47
- 57 C. C. Chen, S. I. Oh, S. Kobayashi: Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing, *Trans ASME Series B, J. Eng. Ind.*, Vol. 101, 1979, pp. 36–44.
- 58 L. Chevalier: Prediction of defects in metal forming: application to wire drawing, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 32, 1992, pp. 145–153.
- 59 P. McAllen, P. Phelan: A method for the prediction of ductile fracture by central bursts in axisymmetric extrusion, *J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 219, 2005, pp. 237–250.
- 60 P. McAllen, P. Phelan: Numerical analysis of axisymmetric wire drawing by means of a coupled damage model, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 183, 2007, pp. 210–218.

- 61 H. B. Campos, P. R. Cetlin: The influence of die semi-angle and of the coefficient of friction on the uniform tensile elongation of drawn copper bars, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 80–81, 1998, pp. 388–391.
- 62 T. Kuboki, M. Abe, Y. Neishi, M. Akiyama: Design method of die geometry and pass schedule by void index in multi-pass drawing, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 127, 2005, pp. 173–182. DOI:10.1115/1.1830490
- 63 A. Mihelič and B. Štok: Optimization of single and multistep wire drawing processes with respect to minization of the forming energy, *Struct. Opt.*, Vol. 12, 1996, pp. 120–126.
- 64 S. Roy, S. Ghosh, R. Shivpuri: A new approach to optimal design of multi-stage metal forming processes with micro genetic algorithms, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 37, 1997, pp. 29–44.
- 65 G. Celano, E. Fichera, E. Fratini, F. Micari: The application of AI techniques in the optimal design of multi-pass cold drawing processes, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 113, 2001, pp. 680–685.
- 66 P. J. M. Van Laarhoven, E.H.L. Aarts: *Simulated annealing: theory and applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1987.
- 67 T. Massé, L. Fourment, P. Montmitonnet, C. Bobadilla, S. Foissey: The optimal die semi-angle concept in wire drawing, examined using automatic optimization techniques, *Int. J. Mater. Form.*, 2012. DOI 10.1007/s12289-012-1092-9
- 68 Lemaitre, J.: A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107., 1985, pp.: 83.
- 69 Mkaddem, A., Hambli, R., Potiron, A.: Comparison between Gurson and Lemaitre damage models in wiping die bending processes. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 23., 2004, pp.: 451–461.
- 70 Venkata Reddy, N., Dixit, P., M., Lal, G., K.: Ductile fracture criteria and its prediction in axisymmetric drawing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40., 2000, pp.: 95–111.
- 71 Bellman, Richard: On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 16., 1958, pp.: 87–90.
- 72 Ford, L. R., Jr., Fulkerson, D. R.: *Flows in Networks*, Princeton University Press: Princetown, 1962.

10. Az alkalmazott főbb jelölések összefoglalása

A	keresztmetszet [mm ²]
A _S	szakadó felület [mm ²]
A _T	külső felület, melyen a külső kényszerek hatnak [mm ²]
A ₁ , A ₂	adott fokozatban a huzal belépő, illetve kilépő keresztmetszete [mm ²]
b	súrlódási hő behatolási mélységéhez [m]
c	huzal fajlagos hőkapacitása [J/(kg·°C)]
C ₂ , C ₃	konstans szorzófaktorok a Hajduk-féle modellben [-]
D	abszolút károsodás [-]
D _c	kritikus károsodás [-]
D _{rel}	=D/D _c [-]
D ₁ , D ₂	adott fokozatban a huzal belépő, illetve kilépő átmérője [mm]
D _{1c}	kritikus károsodás egytengelyű terhelés esetén [-]
E	Young modulus [N/mm ²]
F, F _{Ellen}	húzóerő, ellen-húzóerő [N]
F _{Külső,j}	j-dik külső kényszerítő mely az alakított darabra hat [N]
F _S	húzó tárcsa és a huzal között fellépő súrlódási erő [N]
h	húzási sorozat sorszáma [-]
H	húzási sorozatok száma [-]
i	húzási fokozat sorszáma
J	energetikai funkcionál [W]
k _f	alakítási szilárdság [N/mm ²]
k _{f1} , k _{f2}	adott fokozatban a huzal belépő, illetve kilépő alakítási szilárdsága [N/mm ²]
k _{fk}	=(k _{f1} +k _{f2})/2 közepes alakítási szilárdság [N/mm ²]
k _{f0}	Hajduk-féle alakítási szilárdság konstans kezdőértéke [N/mm ²]
k _k	szerszám felületén fellépő alakítási ellenállás [N/mm ²]
k _{k,Ellen}	alakítási ellenállás ellenhúzó erő felléptekor [N/mm ²]
K _T	hőmérséklet hatását kifejező szorzófaktor a Hajduk-féle modellben [-]
l _h	kalibráló öv hossza [mm]
ℓ ₁	szerszámba befutó huzalhossz [m]
n	húzódobon lévő menetszám [-]
N	mért adatok száma
n _{dob}	húzó tárcsra feltekercselt menetszám [-]
N _h	h-dik sorozat fokozatainak a száma [-]
n ₂	keményedési kitevő a Hajduk-féle modellben [-]
n ₃	alakváltozási sebesség hatványkitevője a Hajduk-féle modellben [-]
P _{int}	belső (interior) erők teljesítménye [W]
P _{Külső}	külső kényszerek teljesítménye [W]
P _{össz}	meghajtás által felvett összes teljesítmény [W]
P _S	szakadó felületi teljesítmény [W]
R _B	szakadási feszültség [N/mm ²]
R _M	huzal anyagának szakítószilárdsága [N/mm ²]
R _{Max,közepes}	huzal anyagának a szerszámon belüli közepes szakítószilárdsága [N/mm ²]
Rp _{0,2}	egyezményes folyáshatár [N/mm ²]
S	károsodási ellenállás [N/mm ²]

t_{al}	huzal egy anyagi pontjának az alakítási zónában töltött átlagos ideje [s]
$T_{körny}$	hűtőközeg (levegő vagy kenőanyag) állandó hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]
T_2	adott fokozatból kilépő huzal hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]
u	hőátadási tényező a huzal és a hűtőközeg között [$\text{W}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2)$]
v	húzási sebesség [m/s]
V	az alakított anyag térfogata [mm^3]
$v_{átl}$	$= (v_1 + v_2)/2$ átlagos huzalsebesség a szerszámban [m/s]
v_j	j-dik kényszererőhöz tartozó és azzal megegyező irányú sebesség [m/s]
v^{ker}	a húzótárcsa/dob kerületi sebessége [m/s]
v_{rel}	tárcsa vagy dob kerületi sebessége és a huzal sebessége közötti különbség [m/s]
v_1, v_2	adott fokozatban a huzal belépő, illetve kilépő sebessége [m/s]
W	fajlagos alakítási munka [N/mm^2]
x_j, y_j	j- dik számított adat, j- dik mért adat
α	húzószerszám félkúpszöge [$^{\circ}$]
β_{al}	az alakításváltozási hő megoszlási hányadosa [-]
$\beta_{súrl}$	a súrlódási hő megoszlási hányadosa [-]
ΔA	$= A_1 - A_2$ [mm^2]
$\Delta \ell$	adott fokozatban a huzalhossz-változás [m]
ΔL	két fokozat közötti huzaldarab hossza [m]
ΔT	hőmérsékletnövekedés a huzalban [$^{\circ}\text{C}$]
ΔT_{al}	alakváltozási hő által generált hőmérsékletnövekedés [$^{\circ}\text{C}$]
ΔT_h	huzal két fokozat közötti hőmérséklet csökkenése [$^{\circ}\text{C}$]
$\Delta T_{súrl}$	súrlódási hő által generált hőmérsékletnövekedés [$^{\circ}\text{C}$]
Δv	szakadó felületen fellépő irányváltásból adódó sebességváltozás [m/s]
ε	relatív fogyás (mérnöki nyúlás) [-]
ε^p	effektív képlékeny alakváltozás [-]
$\eta_{meghajtás}$	meghajtás hatásfoka [-]
λ	huzal hővezetési tényezője [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$]
μ	súrlódási tényező a szerszámban [-]
μ_{dob}	húzótárcsa és a huzal közötti súrlódási tényező [-]
ν	Poisson állandó [-]
ξ, ξ_{elm}	átlagos kihasználtsági tényező, elméleti átlagos kihasználtsági tényező [-]
$\bar{\xi}$	egyenértékű alakváltozási sebesség [1/s]
ρ	huzal anyagának sűrűsége [kg/m^3]
ζ, ζ_{elm}	max. kihasználtsági tényező, elméleti max. kihasználtsági tényező [-]
$\bar{\sigma}$	Huber-Mises-Hencky-féle egyenértékű feszültség [N/mm^2]
σ_{Ellen}	átlagos ellenhúzó feszültség [N/mm^2]
σ_1	adott pontban fellépő feszültség állapot első főfeszültsége [N/mm^2]
σ_2	adott pontban fellépő feszültség állapot második főfeszültsége [N/mm^2]
σ_3	adott pontban fellépő feszültség állapot harmadik főfeszültsége [N/mm^2]
τ	szakadó felületen fellépő nyírófeszültség [N/mm^2]
φ	logaritmikus alakváltozás [-]
$\dot{\varphi}$	alakváltozási sebesség [1/s]
φ_B	logaritmikus szakadási nyúlás [-]
$\varphi_{lágýtás}$	adott húzási sorozatban a lágýtó hőkezelésig elvégzett alakváltozás [-]
φ_{R^M}	szakítószilárdsághoz tartozó logaritmikus nyúlás [-]