

**AZ ACÉL SZÉLESSZALAG
MELEGHENGERTÉSI TECHNOLÓGIA
TERVEZÉSÉNEK ÚJSZERŰ ALAPELVEI**

Braun Gábor
okl. kohómérnök

Ph.D. értekezés

Témavezető:
Dr. Voith Márton
egyetemi tanár

Kerpely Antal
Anyagtudományok és technológiák
Doktori Iskola

Miskolc
2003

TARTALOMJEGYZÉK

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	3
1. BEVEZETÉS	4
2. A TÉMA ELŐZMÉNYEI, A SZAKIRODALOM FELDOLGOZÁSA UTÁN LEVONHATÓ KÖVETKEZTETÉSEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK	8
2.1. Melegalakítás során az acélokban lejátszódó legfontosabb folyamatok.....	8
2.1.1. A melegalakítás és az újrakristályosodás kapcsolatai	8
2.1.2. A szerkezetszabályozó melegalakítás fémteni alapjai.	9
2.2. Az acélok meleghengerlésének hőmérsékleti vonzatai.....	11
2.2.1. A termomechanikus hengerlés kialakulásáról.....	11
2.2.1.1. Elért részeredmények	13
2.2.1.2. Néhány további eredmény	15
2.2.2. Az előzőek alapján megtehető összefoglalás	16
2.4. Egy teljes hengersorra vonatkozó hőmérsékletvezetés alapelvei	19
2.5. Következtetések és célkitűzések	21
3. A SZALAGHŰTÉSI TECHNOLÓGIA HŐMÉRSÉKLETVEZETÉSE	22
3.1. A szalaghűtésre vonatkozó fizikai elvek.....	22
3.2. A szalaghűtés vonatkozó fizikai modell	22
4. A FOLYTATÓLAGOS SORI KÉSZREHENGERTÉSI HŐMÉRSÉKLETVEZETÉSE	27
4.1. Technológia tervezési lehetőségek a folytatólagos soron.....	27
4.2. A folytatólagos hengersorra vonatkozó fizikai elvek	29
4.2.1. A hengerelt szalag hőmérsékletváltozása.....	29
4.2.2. A hengerelt szalag hengerlési sebességének meghatározása	33
4.2.3. A hengerlési erőnek és nyomatéknak számítása	34
5. AZ HENGERTÉSTECHNOLÓGIA OPTIMALIZÁLÓ PROGRAM ELLENŐRZÉSÉRE SZOLGÁLÓ MÉRÉSI ADABÁZIS LÉTREHOZÁSA.....	37
5.1. Mérési adatok rendezése	37
5.2. Adatbázis értékelés	38
6. A KOMPLEX OPTIMALIZÁLÁST LEHETŐVÉ TEVŐ INTERAKTÍV SZÁMÍTÓGÉPES PROGRAM FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE	48
6.1. Az optimalizáció számítógépes megvalósításának lehetőségei	48
6.2. Az acél szélesszalagok számítógéppel támogatott optimalizációjának fizikai elvei	50
6.3. Acél szélesszalag termomechanikus hengerlésének optimalizációja	52
6.3.1. A „Virtual HOTRolling Mill” optimalizáló program felépítése	52

6.3.1.1. A program menürendszere.....	53
6.3.1.2. A számítási blokkrendszer használata	58
6.3.1.3. A grafikus felület használata	61
6.3.2. Az acél széles szalag gyártástechnológiájának számítógépes optimalizációja	62
6.3.2.1. A „Virtual HOTRolling Mill” program számítási eredményeinek ellenőrzése .	62
6.3.2.2. Gyártástechnológia optimalizálás	68
6.3.2.3. A „Virtual HOTRolling Mill” program jelentősége.....	76
7. LEVONT KÖVETKEZTETÉSEK.....	77
8. IRODALOMJEGYZÉK	81
9. TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK.....	84
Előadások.....	84
Folyóíratcikkek	84
ÖSSZEFOGLALÁS	85
RÉSUMÉ	87
MELLÉKLET.....	88

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Értekezésem alapjául a Miskolci Egyetem Anyag- és Kohómérnöki Kar Fémtechnológiai Tanszékén eltöltött három év tanulmányai és kutatómunkája illetve a DUNAFERR Dunai Vasmű Rt.-ben végzett szakmai gyakorlat szolgál. Köszönet illeti a DUNAFERR Rt. mindenkori vezetését, hogy biztosította számomra a doktori iskola elvégzésének anyagi háttérét is.

Ezúton köszönöm Dr. Grega Oszkárnak, a DUNAFERR Rt. volt műszaki-fejlesztési igazgatójának, a szakmai segítséget és hogy lehetőséget adott arra, hogy doktorandusz hallgató lehessek.

Köszönöm a „DUNAFERR a magyar kohómérnök képzésért” Alapítvány kuratóriumának a források biztosítását külföldi szakmai tanulmányutaimhoz és nyelvtanulásomhoz.

Külön szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Voith Mártonnak, a szakmai segítségéért, az átadott szakmai és emberi tapasztalatért és hogy lehetőséget biztosított a kutatásaim elvégzésére.

1. BEVEZETÉS

Az alakítástechnológiákban a feszültségi viszonyokon túlmenően, a hőmérsékleti hatások komplex figyelembe vétele egy olyan összekötő kapocs, amelyik lehetővé teszi a jelenleginél jobb, sőt több szempontból optimális technológiák kimunkálását. A hőmérsékleti hatások ugyanis fontos szerepet játszanak nem csak a tényleges alakítási technológiákban, hanem mind az előkészítő, mind a kikészítő műveleteknél, illetve egy-egy alakítási művelet előtt, alatt és után is. Ez a hatás kiterjed az alakított anyagra, az alakító szerszámmra, a hűtő vagy hűtő-kenő folyadékra, sőt részben a környezetre is, mégpedig mind meleg-, mind hidegalakításkor.

A korszerű, növelt alakítási/alakváltozási sebességgel dolgozó alakító technológiákban a hőmérsékleti hatások egzakt megtervezése teszi lehetővé a technológia - valamilyen szempontból – történő optimalizálását. Az optimalizálás célfüggvényei hideg-, illetve melegalakításkor, sőt ezen belül a különböző alakító műveleteken belül is eltérnek/eltérhetnek egymástól, azonban az alakított darab és az alakító szerszám mindenkor hőmérséklete mindig meghatározó, és alapvetően befolyásolja a gyártás gazdaságosságát és a termék minőségét.

Egy képlékenyalakítási technológia a hőmérsékleti hatások szempontjából nézve legtöbbször akkor helyes, ha minden „lépésében” (pl. hengerléskor minden egyes szúrásban) annyi és pontosan annyi hő fejlődik, mint amennyit a hűtő-kenő közeg el képes vinni, mert ekkor mondhatjuk, hogy az alakítás hőmérsékleti szempontból stacionárius, a darab és a szerszám minden egyes pontjában és minden időpillanatban azonos a hőmérséklet. Ez a kialakuló szövetszerkezet, de a méretpontosság szempontjából is lényeges szempont. (Értelemszerűen a kívánt hőmérséklet-szint egyes technológiákban lehet változó is.) A fenti viszonyok tervezéséhez és betartásához ismernünk kell azt, hogy hol és mennyi hőmennyiség keletkezik, és az hová távozik (hogyan oszlik meg).

Hőmennyiség két helyen (két forrásból) keletkezik: Az egyik a tiszta alakváltozási munka hőegyenértéke. Ez a darab belsejében keletkezik, és - elsősorban az alakítás időadataitól, vagyis a szerszámmal való érintkezés idejétől függően - részben a darabban marad, növelve annak kezdeti hőmérsékletét, részben a szerszámnak adódik át, míg harmadik része a környezetet (elsősorban a hűtő-kenőanyagot) melegíti. A másik hőforrás a merev testként viselkedő (tehát állandó felületi vagy kerületi sebességű) szerszám és a csökkenő keresztmetszetével arányosan egyre nagyobb sebességgel áramló anyag (térfogat-állandósági vagy folytonossági törvény) közötti relatív sebesség által keltett súrlódás munkája. Értelemszerűen ez is a fenti három szereplő között oszlik meg. A megoszlás a fizikai jellemzőktől (hőátadási tényező, hővezetési tényező, sűrűség, fajlagos hőkapacitás, felületi érdesség stb., stb., és sajnos a legtöbb fizikai

paraméter hőmérséklet-függő is!) és az időadatoktól függ, és az elméletileg kiszámított értékeket kísérleti vizsgálatokkal lehet pontosítani.

A melegalakítás (meleghengerlés, kisajtolás, kovácsolás stb.) üzemi gyakorlatában sokáig megelégedtek azzal, hogy a fémeket a megengedhető legnagyobb hőmérsékleten kezdték alakítani, és arra törekedtek, hogy az alakítás az újrakristályosodási hőmérséklet felett fejeződjék be. A nagy kezdőhőmérséklet a viszonylag lassú alakítógépek és a darab átadásával/átvezetésével együtt járó nagy közidők (hűlés) miatt korábban indokolt volt; a keményedés elkerülésének stratégiája a továbbalakíthatóság megőrzéséből született. Ezzel szemben ma már tudjuk, hogy az alakítás befejező hőmérsékletének csökkentésével a szövetszerkezet rendszerint finomabb lesz, és javulnak a mechanikai tulajdonságok is (szabályozott hőmérsékletű képlékenyalakítás).

A kisebb befejező hőmérséklet az alakítási folyamat megszakításával, illetve közbeni hűtéssel is elérhető, észszerűbb azonban már az első alakítás hőmérsékletét, vagyis a kezdőhőmérsékletet eleve kisebbre választani. A kezdőhőmérséklet csökkentésének az anyag alakíthatósága, az alakító gépek és szerszámok terhelhetősége, az izzítókemence adottságai, valamint a késztermék keménysége határt szabhatnak.

A kezdőhőmérséklet csökkentése a minőség javítása mellett a fajlagos energiafelhasználást is csökkenti. Kisebb kezdőhőmérsékletet választva, a darab felmelegítéséhez szükséges energiamennyiség csökken, viszont a kisebb hőmérsékletre tartozó nagyobb alakítási szilárdság következtében az alakításhoz szükséges energia-mennyiség növekszik. E két tendencia ellentétes, tehát elvileg található egy olyan optimális kezdőhőmérséklet, amelynek választása esetén a hevítés és az alakítás fajlagos energiafelhasználásának (vagy fajlagos energiaköltségének) az összege minimális.

A fentiek alapján az értekezés célkitűzése első pillanatban azt a látszatot kelti, hogy egy olyan témakörben kíván újszerű eredményeket bemutatni, amely sokszorosan megkutatott. Azonban az eddigi hengerlési elméletek és technológia-tervező gyakorlatok minden esetben a folyamatot kronológiai sorrendben vizsgálták, ami azt jelenti, hogy meleghengerlésről lévén szó, először az alapanyag felmelegítését vizsgálták, vagyis egy előre megálmodott és lehetőleg minél nagyobb hőmérsékletű alapanyagot kívántak a kemencéből kihúzni. A nagy hőmérséklet elérésének a célja egyrészt az volt, hogy így kerüljék el a darab lehűlését, másrészt – és ez elsősorban a mikroötvöztött minőségeknél volt szempont – még az izzítás ideje alatt oldatba vigyék a beadagolt mikroötvözőket.

A továbbiakban ezt a már felmelegített anyagot „kezelték”, vagyis az anyagminőség, a gépészeti adatok stb. ismeretében dolgoztak ki egy ehhez a szemlélethez tartozó optimális előnyújtó- és készrealakító hengerlési technológiát, azaz határozták meg a szűrőszámot, a

szúrásokénti alakváltozások nagyságát, a hengerlési sebességeket, stb., és ezek ismeretében vizsgálták a darab hőmérsékletének a változását. Egy ilyen szempont alapján készített hengerlési technológia eredménye – értelemszerűen – az, hogy a kész állványból kifutó darab hőmérséklete egy adott értékű lesz.

A tervezés menetében ezután ezt az adott hőmérsékletű darabot kellett „lehűteni”, vagyis elérni azt a hőmérsékletet, amelyet az optimális szövetszerkezet igényel. Itt tehát egy „kényszerhűtési” technológiára volt szükség, ami alatt azt értem, hogy egy adott hűtőberendezés feltételezésével kellett meghatározni a hűtővíz szükséges mennyiségét¹. Az eredmény lehet sikeres lehűlés, vagy sikertelen lehűlés. Előbbi esetben például a vízfelhasználás mennyisége „véletlenszerű”, pedig elvileg azt minimalizálni is lehet, míg utóbbi esetben a technológia készítését mintegy előlről kellett kezdeni, átszámolva, illetve megváltoztatva annak eredményeit, vagyis a készállványból kifutó darab hőmérsékletét és sebességét.

Az általam javasolt újszerű technológia-tervezés alapelvei ezzel mintegy „ellentétes” irányú gondolkozást igényelnek, vagyis a kiinduló adatokat a késztermék oldaláról kell felvenni. Ez alatt egy adott szelvényméretű és anyagminőségű darab gyártásakor értem a következőket: A kész termék alakja és felületi minősége értelemszerűen kifogástalan kell, hogy legyen (ennek a régi technológia-tervezésekor is természetesen így kellett lennie). A termék mechanikai tulajdonságai azonban a gyártástechnológia változtatható paraméterein keresztül - egy azonos kémiai összetételű anyagminőségen belül is – előre megtervezhetők, és a felhasználó igényeinek megfelelően szűkebb-tágabb határok között betarthatók. A késztermék minőségét befolyásoló egyik legjelentősebb adat a csévélési hőmérséklet, ami acélok meleghengerlésekor nem sokkal az A_1 hőmérséklet alatt kell, hogy legyen. Mivel ez a csévélési hőmérsékletköz viszonylag szűk érték (egyes acélminőségek esetében gyakran például csak 20 °C), ezt a hőmérsékletet a darabnak, annak minden pontjának, biztonsággal el kell érnie.

A technológia-tervezés alapelvei ezután a következőkben foglalhatók össze: A csévélési hőmérsékletet - egy adott összetételű és keresztmetszetű szelvény esetén - a készállványból kifutó sebesség (v_n) és hőmérséklet (T_n), mint kétváltozós függvény határozza meg. Megkereshető ennek a kétváltozós függvénynek olyan szélsőértéke, amely mellett a felhasznált hűtővíz mennyisége a minimális. Ezt az optimalizálást vagy egy adott konstrukciójú

¹ Az értekezés acélszalagok meleghengerlési technológiájára vonatkozik, ezért csak azt az esetet elemzi, amikor átalakulás közben lehűlő lapos terméket felcsévélve gyártanak. A megfontolások és alapelvek értelemszerűen vonatkozhatnak/vonatkoznak a felcsévélve gyártott acélprofilokra (például a köracélokra) is. Nem tartozik a vizsgálatok körébe a szálban gyártott és így hűtőpadon lehűlő rúd- és profilacélok gyártástechnológiája, bár egyes megállapítások erre az esetre is átvihetők. Szintén az értekezés témakörén kívülre esik az átalakulás nélkül lehűlő anyagminőségek hengerléstechnológiájának az elemzése, így például az alumínium szélesszalag meleghengerlés, ugyanis itt a hengerrészből kifutó készterméket szinkroncsévélelőn tekercselik fel, mert a csévélés hőmérsékletének csak a menetek összetapadása szab felső határt.

hűtőberendezésre vonatkozóan lehet elvégezni, vagy ez alapján megtervezhető az optimális vízfelhasználást eredményező hűtőberendezés.

A fenti gondolatmenet eredményeképpen kiadódik a hűtés saját optima. Tekintettel azonban arra, hogy a meleghengerrlési folyamat a csévélésen és a hűtésen kívül alakításból (előnyújtó- és készrehengerrlésből), illetve melegítésből is áll, az egész folyamat eredménye nem feltétlenül az előzőekben kapott és összetartozó T_n — v_n értékpár lesz. A továbbiakban tehát az összes lehetséges (elérhető) T_n — v_n értékpár feltételezésével, vagyis ezen az érték-készleten továbbhaladva, kereshető a hengerrlési technológia optima. Ehhez a hengerállványok szúrásokénti azonos (megfelelő biztonsággal megválasztott maximális) kiterhelési szintjét kell meghatározni de úgy, hogy a kapott eredmény minden esetben a megvalósítható T_n — v_n értékpárt adja. Ez vagy egy adott gépészeti berendezés (adott a szúrásszám) esetén a kiinduló darab vastagságát adja meg, vagy ha a szúrásszám nem megkötött, egy előre megválasztott kiinduló bugavastagság érhető el. Ennek az optimalizálásának az eredményeként az előzőekben kapott T_n — v_n értékpár tovább szűkül.

A kiinduló darab T_0 kezdőhőmérséklete vagy úgy érhető el, hogy a folyamatos öntőművön gyártott h_0 vastagságú terméket – csak hőntartó berendezést alkalmazva – tulajdonképpen az öntési meleg „kihasználásával” vezetjük be a hengersorra, vagy – és ez még ma az általánosabb – a folyamatosan öntött buga egy, a hengeremtől távolabb lévő öntőműből közel hidegen (jobb esetben néhány száz fokon) érkezik, és ezt izzítókemencében melegítik fel a kívánt kezdőhőmérsékletre.

Még tovább szűkül a T_n — v_n értékpár akkor, ha a melegítés és alakítás együttes fajlagos energiafelhasználásának a minimumára törekszünk, vagyis meghatározzuk azt a kiinduló hőmérsékletet, amelyhez ez a minimum tartozik.

A fenti elvek szerint kidolgozott és komplex optimumot jelentő meleghengerrlési technológia alapelveinek részletes kidolgozásán túlmenően értekezésemben néhány konkrét technológiát is bemutatok és ezeket összehasonlítom egy-egy üzemben jelenleg járatos hengerrlési technológiával.

2. A TÉMA ELŐZMÉNYEI, A SZAKIRODALOM FELDOLGOZÁSA UTÁN LEVONHATÓ KÖVETKEZTETÉSEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Ebben a fejezetben azt kívánom bemutatni és indokolni, hogy miért lehet/kell az acélok meleghengerlési technológiájának az elméleti alapjait újragondolni és az eredményeket hogyan lehet alkalmazni.

2.1. Melegalakítás során az acélokban lejátszódó legfontosabb folyamatok

Tágabb értelemben akkor beszélhetünk melegalakításról, ha az újrakristályosodás (lágyulás) az alakítás után spontán (külön hőkezelés nélkül) lejátszódik, azaz a kapott termék lényegében lágyított állapotú lesz. A szűkebb értelemben vett melegalakítás kritériuma az, hogy a lágyulás két alakító művelet (például hengerléskor a két egymás utáni szúrás) között is lejátszódjék, ugyanis ekkor nem kell számolni az alakítási keményedés hatásával. Acélok esetében a helyzetet bonyolítja az, hogy a melegalakítást fázisátalakulás követi, ami lényegesen megnehezíti a fémtani folyamatok vizsgálatát.

A fentiek szerint a melegalakítási folyamatoknál az újrakristályosodásnak kiemelkedő szerepe van, de mellette az alábbi hatásokat is vizsgálni kell:

- az alakítás hőmérsékletén nem oldódó fázisok (zárványok, karbidok) alakjának, méreteinek a változását,
- a szilárd oldatban lévő elemek koncentráció-különbségeinek (dúsulásának) a változásait.

2.1.1. A melegalakítás és az újrakristályosodás kapcsolatai

Mivel az acélok döntő többsége a melegalakítás hőmérsékletén ausztenites állapotú és lehűlés közben átalakul, elsősorban az ilyen acélok ausztenitjének újrakristályosodási törvényszerűségeit érdemes megfogalmazni. Az ausztenit újrakristályosodása az A_3 -nak nevezett hőmérsékleten kezdődik meg, és az A_1 hőmérsékleten fejeződik be. Ha az átalakulást lehűlés közben figyeljük, ezeket a jellemző hőmérsékleteket A_{r3} , illetve A_{r1} jellel említjük. Az A_1 hőmérséklet alatt az ausztenit semmiképpen sem lehet állandó, hanem valamilyen (eutektoidos, bénites, martenzites) módon átalakul, ha az acélt elég hosszú ideig tartjuk A_1 hőmérséklet alatt.

A gyakorlat szempontjából elsősorban az újrakristályosodás sebességének és az újrakristályosodás során kialakuló szemcseméretnek van jelentősége: az előbbitől függ, hogy két alakító művelet közben a darab teljes térfogatában lejátszódhat-e az újrakristályosodás (nem kell-

e az alakítási keménnyedéssel számolni?), az ausztenit szemcsemérete pedig az átalakulási termékek szemcseméretét (és részben mennyiségi arányait) befolyásolja jelentős mértékben.

Az átalakuló acélok ausztenitjének újrakristályosodási időszükségletéről viszonylag kevés konkrét adat ismert. Az ötvöztelen acélok melegalakításuk szokásos hőmérséklet-tartományában általában igen gyorsan újrakristályosodnak és két alakító művelet között rendszerint kilágyulnak. A kialakuló ausztenit szemcseméretét az alakítás mértéke és hőmérséklete szabja meg. Mivel az esetek többségében kis ausztenit szemcseméretre törekszenek, a szemcsedurvulás elkerülése érdekében kerülni kell a kismértékű alakításokat, és a technológiai lehetőségek határain belül kis hőmérsékleten kell befejezni az alakítást.

A szilárd oldatot alkotó ötvözők legtöbbször lassítják az újrakristályosodást, az átalakulási folyamatokat pedig a kisebb hőmérsékletek és a hosszabb idők felé tolják el. Ezt tudatosan kihasználva, erősebben ötvözött acélok esetében különleges hatások érhetők el: Az alakítás jelentős részét vagy teljes egészét olyan kis hőmérsékleten végzik el, ahol az ausztenit lassan kristályosodik újra, és az alakítást követő megfelelő lehűlés hatására az alakított állapotú ausztenit alakul át martenzitté vagy bénitté (auszforming). A keletkező átalakulási termékek lényegesen finomabbak, ami már önmagában is, vagy pedig megeresztéssel kombinálva kedvező mechanikai tulajdonságokat hoz létre.

Az erősen ötvözött acélok között vannak olyanok, amelyek a melegalakítás hőmérséklete és a szobahőmérséklet között nem alakulnak át (ferrites, illetve ausztenites sav- és hőálló acélok). Ezek melegalakítási technológiájának a kialakításakor figyelembe kell venni, hogy szövetszerkezetük pusztán hőkezeléssel már nem finomítható.

Az ausztenit újrakristályosodását – a hidegalakítást követő lágyítás során lejátszódó újrakristályosodáshoz hasonlóan – lényegesen befolyásolják a kisméretű kiválások (nitridek, karbo-nitridek). Hatásukat elsősorban a mikroötvözött acélok szabályozott alakításakor használják ki. [1]

2.1.2. A szerkezet szabályozó melegalakítás fémtani alapjai.

Az átalakuló acélok szövetszerkezete a meleg hengerlés és az azt követő lehűlés paraméterein keresztül viszonylag széles határok között változtatható. Ezt tudatosan kihasználva, bizonyos acéltípusok esetén kedvező tulajdonság-kombinációk érhetők el melegen hengerelt állapotban is, és ez lehetővé teszi bizonyos külön elvégzendő hőkezelő műveletek elhagyását. A szabályozott melegalakítás különböző változatai - gazdaságosságuknál fogva – különösen gyorsan terjednek.

A szerkezetszabályozó melegalakítást a kis C - tartalmú, hegeszthető szerkezeti acélok hengerléséhez alkalmazták először, és azóta is itt alkalmazzák a legnagyobb mértékben. A kedvező tulajdonság-kombináció (nagy folyáshatár mellett kis átmeneti hőmérséklet) ilyen acélok esetén két lehetőség kihasználásával érhető el:

- a ferrit szemcseméretének a csökkentésével, vagy
- a finom kiválások szilárdságnövelő hatásával (kiválások keményedés).

A ferrit szemcseméretének a csökkentése mind a folyáshatár, mind az átmeneti hőmérséklet szempontjából kedvező (az előbbi növeli, az utóbbit csökkenti), míg a kiválások keményedés a szilárdságnövelés mellett növeli az átmeneti hőmérsékletet.

A két hatásmechanizmus egyidejű kihasználását a mikroötvözött acélok kifejlesztése tette lehetővé. Ezek az acélok kis mennyiségű (általában néhány század, maximálisan egy-két tized százaléknyi) erős nitrid-, vagy karbid-képző elemet tartalmaznak. A legfontosabb mikroötvözők: a Nb, a V és a Ti, de nitrid-képző hatása miatt gyakran ide számítják a dezoxidálásra használt Al-ot is. Ez utóbbi csak akkor indokolt, ha az oxigén lekötéséhez szükségesnél nagyobb mennyiségben van jelen az acélban. Az újrakristályosodást a Nb fékezi a leghatásosabban.

A melegalakítást követő lehűlés során kialakuló szövetszerkezetet az ausztenit újrakristályosodása és az átalakulás kinetikája együttesen határozza meg. A nagy hőmérsékletű alakítást gyors újrakristályosodás és erőteljes szemcsedurvulás követi, és a durva ausztenitből ilyenkor képződő tűs szövetszerkezet a tulajdonságok szempontjából kedvezőtlen. Az alakítási hőmérséklet csökkentésével kisebb lesz az újrakristályosodott ausztenit-szemcseméret, az átalakulási termék pedig finom ferrit-perlit. Még kisebb alakítási hőmérsékleten az átalakulás előtt csak részleges lesz az újrakristályosodás, vagy egyáltalán meg sem indul az. Az alakított állapotú ausztenitből különösen finom ferrit-perlites szövet képződik, mert a csíráképzésben a szemcsehatárok mellett a deformációs sávok is részt vesznek. Az ilyen körülmények között végzett melegalakítást termomechanikus kezelésnek is szokták nevezni.

A hagyományos (mikroötvözés nélküli) acélokban az újrakristályosodás és a szemcsedurvulás rendkívül gyors, így a gyakorlatban alkalmazható hengerlési hőmérsékleteken a finom ferrit-perlit szövettípus elérése (különösen nagyobb szelvényméreteknél) nehézségekbe ütközik. Ilyenkor külön hőkezeléssel (normalizálással) lehet célt érni.

A mikroötvözők jelenlétében keletkező finom kiválások olyan mértékben lefékezhetik az ausztenit újrakristályosodását, hogy a kedvező szövettípusok a hengerlési véghőmérséklet szabályozásával (esetleg megfelelő közbenső hűtés beiktatásával) üzemi körülmények között is elérhetők.

A felsorolt eljárások mindegyike az anyag összetételétől és keresztmetszetétől függő, jól „kézbentartott” darabhőmérsékleteket, és jól szabályozható hűtőrendszert igényel. [2,3]

2.2. Az acélok meleghengerlésének hőmérsékleti vonzatai

Úgy tűnik, hogy napjainkban a meleghengerlés sebesség-szintjének növelése elérte a kívánt szintet: Ez szabadkifutás esetén kb. 10 m/s, míg egy drótsoron akár a 100 m/s-os hengerlési végsebességet is jelent. A sebesség növekedése a hőmérsékleti viszonyok átgondolását is maga után kell, hogy vonja. A régi nyitott, esetleg még részben kézi kiszolgálású, de mindenképpen kis sebességgel dolgozó hengersorokon érthető volt az a törekvés, hogy az alapanyagot – ami esetleg még nagy keresztmetszetű öntött tuskó volt – a megengedhető legnagyobb hőmérsékletre hevítsék, hisz a lassú alakítás, a sok szúrás, valamint a nagy közidők miatt rendszerint a kihengerelt kész termék hőmérséklete alig haladta meg a melegalakítás alsó hőmérsékleti korlátját. Ezt az újrakristályosodás kezdőhőmérsékletének, vagy az Ar₃ hőmérsékletnek lehet tekinteni. A legnagyobb kezdőhőmérsékletet az ausztenites állapot „megőrzése” jelenti.

Felmerül a kérdés: Az acél összetételétől – és a mikrodúsulásoktól - függő két hőmérsékleti határ (azaz a megengedett legnagyobb és az újrakristályosodási kezdőhőmérséklet) között hol helyezkedjen el a hengerlési hőmérséklet, elsősorban a folyamat elején és a végén? A továbbiakban erre kívánunk rávilágítani a lehetséges különböző – és esetenként egymásnak ellentmondó – szempontok és azok hatásának elemzésén keresztül.

2.2.1. A termomechanikus hengerlés kialakulásáról

Kezdetben a nagy szilárdságú, jól hegeszthető, szívós (kis átmeneti hőmérsékletű) acélok hagyományos alapanyaga kb. 2,5 % Ni-t tartalmazott, mint például az ASTM-A 203 jelű acél. Később, az 1960-as években kifejlesztették a kis C-Si-Mn tartalmú acélokat. Az ebből készített anyagokat a hengerlés végén gyorsan hűtötték le, majd megeresztették (edzés + megeresztés). Ezeknek az acéloknak a szívósságuk növeléséhez a szokásosnál kicsit kisebb S tartalom is hozzájárult. Bebizonyosodott, hogy ez az új acél a szabályozottan finom szövetszerkezetének köszönhetette kedvező tulajdonságait.

1970-ben a Trans-Alaska olajvezetékhez a hegesztett csövek gyártásához az alapanyagot Nb-mal mikroötvözték, kis C-Mn-Si tartalmú acél szabályozott hőmérsékletvitelű hengerlésével állították elő. Már korábban is ismerték a Nb szilárdságnövelő hatását, azonban az átmeneti hőmérsékletet lerontó hatása miatt a Nb-ötvözést nem alkalmazták. Ezt az ellentmondást a

szemcsefinomítás oldotta meg: Először viszonylag nagy hőmérsékleten és nagy alakítással finomszemcsés ausztenit-szövetet állítottak elő. Ezt lehűtötték arra a hőmérsékletre, ahol az ausztenit már nem kristályosodik újra, és egyúttal a NbCN-vegyületek kiválnak. Ezt követően újabb meleghengerlést végeztek, aminek az eredményeképpen olyan finomszemcsés szövet alakult ki, amely N=12-es szemcsefinomságú, nagy szilárdságú és jó szívósságú.

A fentiek szerint tehát a finomszemcsés, nagy szilárdságú és hegeszthető hengerelt acéltermékek gyártástechnológiája a következő fejlődési lépcsőkön ment keresztül:

a) Hagyományos hengerlés. Az alapanyagot nagy, kb. 1200...1250 °C hőmérsékletre hevítik és innen készméretre hengerlik. A hengerlési véghőmérséklet kb. 950...1050 °C. A melegen hengerelt késztermék szemcsemérete csökkenthető azáltal, ha a hengerlési véghőmérsékletet csökkentik, vagy növelik a szúrásonkénti alakváltozások nagyságát (ennek sok feltétel szab korlátot: a darab alakíthatósága, a hengerállványok terhelhetősége, a meglévő üregsorok és hengergarnitúrák, stb.), vagy csökkentik a kiinduló buga ausztenit-szemnagyságát. Ez utóbbi vagy előalakítás és hőkezelés kombinációjával érhető el (ami költséges), vagy a FAM-on jelentősen kisebb szelvény öntésével (ekkor a nagyobb süllyesztési sebesség miatt gyorsabb a megszilárdulás és kisebb lesz a primer szemcsék mérete).

b) Szabályozott hőmérsékletű hengerlés mikroötvözés nélkül. Az alapanyagot 1200...1250 °C kiinduló hőmérsékletről hengerlik 800...850 °C befejező hőmérsékletig. A kis C-Mn-Si tartalmú acélokban ekkor az alakított ausztenit újrakristályosodási hőmérséklete kb. 850 °C, tehát a 800...850 °C-on végzett hengerléskor (utolsó szúráások) a megnyúlt ausztenit szemcsék újrakristályosodásuk közben még magukon viselik a képlékenyalakítás hatását. Az eredmény a finomszemcsés szövetszerkezet.

c) Mikroötvözött acélok szabályozott hőmérsékletű hengerlése. Az alapanyag kis C-Mn-Si tartalmú acél, amelybe Ti, V és/vagy Nb mikroötvözőket adagoltak. A mikroötvözők hatására mintegy 100 °C-kal megemelkedik az ausztenit újrakristályosodási hőmérséklete. Ennek következtében a szabályozott hőmérsékletű hengerléskor alkalmazott kis befejező hőmérsékleten az erősen megnyúlt szemcsék újrakristályosodásakor a keletkező szövet finomszemcsés lesz.

[4, 5]

2.2.1.1. Elért részeredmények

A fenti hengerléstechnológiai változatok - felsorolásuk sorrendjében - egyre növekvő szilárdságot és szívósságot biztosítottak. A további fejlődés feladata volt, hogy pontosítsa a legkedvezőbb acél-összetételt és a hozzá tartozó legkedvezőbb hengerlési technológiát. Az elméleti és a gyakorlati fejlesztések során a következő eredmények születtek:

1) Tanaka és munkatársai kísérletileg megmérték a $\gamma \rightarrow \alpha$ átalakulási hőmérsékletet (az Ar3-at) a termomechanikus hengerlés során. A mérések alapján három szakaszt állapítottak meg:

- az egyidejű alakváltozás és újrakristályosodás szakasza;
- a kis hőmérsékletű ausztenit alakítási szakasza;
- az ausztenit+ferrit szerkezetű acél alakításának a szakasza.

Az első szakasz 1000 °C feletti alakítást jelent. Az ausztenit szemcsefinomítása ekkor az ismétlődő újrakristályosodással érhető el (min. 20 μm -es szemcseméret). A második szakasz 950 °C és A_{r3} közötti hőmérséklet-közben végzett hengerlést jelent. Az ausztenit szemcsék ilyenkor megnyúlnak és sok szub-szemcsét tartalmaznak. Ennek eredménye az előzőnél viszonylag kis mértékben finomabb szövetszerkezet. A harmadik szakasz A_{r3} hőmérséklet alatti hengerlést, az $\alpha+\gamma$ szövetű anyag hengerlését jelenti. Az alakítás során az új ferritszemcsék is deformálódnak és felkeményednek. Ekkor a stabilizálódott szubszerkezet idézi elő a mechanikai tulajdonságok kedvező alakulását. Így ez a második szakasznál sokkal szilárdabb és szívósabb szerkezetet eredményez.

2) Kozasu és munkatársai a fenti első és második szakaszt vizsgálták. Megállapították, hogy a ferrites szövet szemnagyságát az ausztenit szemnagysága és az alakításkor keletkező diszlokációs cellák szemnagysága együttesen befolyásolja. Az általuk bevezetett új fogalom: az egységnyi térfogatra eső effektív ausztenit-felület, amit sv -vel jelöltek (dimenziója: mm^{-1}). Az sv magában foglalja az ausztenit felületét és az újrakristályosodási hőmérséklet alatti hengerléskor keletkező szubszemcsék felületét is.

3) Le Bon és munkatársai melegcsavaró berendezéssel szimulálták a termomechanikus hengerlést. Az ausztenit szövetszerkezetét a gyorsan lehűtött acél szerkezetéből rekonstruálták. A Szerzők által meghatározott jellemző diagrammokból egy jellegzetest mutat be az 1. ábra, amely jól szemlélteti a Tanaka által definiált szakaszokban a ferrit szemnagyságát, illetve a Nb-nek e szakaszokra gyakorolt hatását. A Nb mikroötvözés kb. 100 °C-kal megnöveli a harmadik szakasz kezdőhőmérsékletét. Kimutatták továbbá, hogy az ausztenit-szemnagyság és a megalakítási keményedési diagram között szoros összefüggés állapítható meg.

4) Fukoda és munkatársai tekercselt szalagok és táblalemezek termomechanikus hengerlését elemezték. Rámutattak azokra a fémtani különbségekre, amelyek az eltérő technológiákból következnek. (A tekercselt szalag lehülési sebessége ugyanis nagyon kicsi.) A hűtési technológiák különbségéből következően más a mikroötvözők szerepe. Igazolták, hogy a viszonylag nagy (kb. 800 °C-os) tekercselési hőmérsékleten kedvezőtlen a V-mal történő mikroötvözés, valamivel kedvezőbb a Nb adagolása. E vizsgálattal ráirányították a figyelmet arra, hogy a különböző mikroötvözők hatásmechanizmusa különböző.

Az 1...4) alatti hengerlés-technológiai változatok nagy hengerlési kezdőhőmérsékletet, de kis hengerlési véghőmérsékletet tételeztek fel. A nagy bugahevítési hőmérséklet a mikroötvözők teljes oldatba-viteléhez szükséges. Az ismertetett elméleti alapok is ezekre az ideális körülmények között végrehajtott termomechanikus hengerlésekre, azok egyes szakaszaira vonatkoztak. Alapvetően megváltozott azonban a helyzet az energia-válságot követően, ugyanis több szempontból is kedvezőtlen a nagy hengerlési kezdőhőmérséklet. Elsősorban azért, mert nagy az izzításhoz használt energiaköltség, de a nagyobb hőmérséklettel együtt járó több reveképződés vagy a mélyebb dekarbonizálódott rétegvastagság is a kisebb izzítási véghőmérséklet felé mutat. Ezekkel szemben a hengersorok terhelési szintjének (és villamosenergia felhasználásának) némi romlása áll. Ma ideális állapotnak az alacsony fajlagos gyártási költségeket tekintjük. Ez vezet az

5) Energiatakarékos termomechanikus hengerlési technológia kidolgozásához. Ennek a technológiának jellemzője a kisebb (de a gépészetileg még megengedhető terhelési szintet kielégítő) hevítési hőmérséklet, amely általában 1000 °C-nál kisebb kezdőhőmérsékletet jelent. Ez a kis hevítési hőmérséklet azonban nem teszi lehetővé sem a Ti, sem a Nb teljes oldódását, ami a mikroötvözők hatékony, illetve gazdaságos felhasználását rontja. Kedvezőtlen jelenség még a kis C-tartalmú és Nb-mal mikroötvözött acéloknál a durva szövetszerkezet létrejötte is.

A kedvezőtlen hatások ellensúlyozására egyrészt a Mo-adagolást, másrészt a 0,01 %-os Ti mikroötvözést dolgozták ki. A Mo adagolásával egyrészt nő az átedzhetőség, másrészt a hevítési hőmérséklettől független finomszemcsés kiinduló és újrakristályosodott szövet érhető el, mert a Mo gátolja az ausztenit újrakristályosodását. A kb. 0,01 % Ti-t tartalmazó acélban a finom, diszperz TiN részecskék gátolják hevítéskor az ausztenit újrakristályosodását (az ausztenit-szemcsék durvulási hőmérséklete kb. 1300 °C), és ezáltal érik el a hevítési hőmérséklettől független mechanikai tulajdonságokat.

A fejlesztés további iránya az, hogy olyan ötvözeteket hozzanak létre, amelyekben az anyag mechanikai tulajdonságai függetlenek a hengerlési hőmérséklettől.

6) Szűkített tűrésű mechanikai jellemzőkkel rendelkező hengerelt termékek szabályozott hőmérsékletű hengerlési technológiája. Azok az acélok, amelyek olyan tulajdonsággal rendelkeznek, hogy mechanikai jellemzőik függetlenek a hengerlési hőmérséklettől, igen kedvezőek, mert a hengerlési hőmérséklet hibája (eltérése) csak kis mértékben hat. Ennek érdekében a mikroötvöző-rendszerek (például Nb+V együtt) jelentettek előrelépést, mivel a különböző mikroötvözők együttesen alkalmazva szélesítik az újrakristályosodás hőmérsékleti sávját. A hengerlést követő gyors hűtés ($3...30\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) $50...160\text{ N/mm}^2$ szilárdság-növelést eredményez anélkül, hogy a szívósság csökkenne. Ennek oka a hűtési sebesség szerkezet-finomító hatása. A Nb és a V kiválásos keményítő hatása elméletileg akkor a legjobb, ha a gyorshűtés kb. $500...600\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig tart. A Nb szerepe éppen az, hogy a bénites (finom tűs) szerkezetet stabilizálja anélkül, hogy kisebb hőmérsékletekig kellene a gyorshűtést folytatni. [6, 7, 8, 9, 10, 11]

2.2.1.2. Néhány további eredmény

Amin és társai, valamint Weiss és munkatársai alapvető ismereteket közölnek arról, hogy hogyan lehet elérni a hengerlésre kerülő buga minél kisebb ausztenit-szemnagyságát, illetve, hogy miképpen befolyásolja a mikroötvöztetés és a hevítési hőmérséklet a hengerelt termék szemnagyságát. Rámutattak arra, hogy akár Ti, akár Nb, akár V a mikroötvöző, azok hatását az általuk alkotott vegyületek jellemzői határozzák meg. Nagy a különbség a mikroötvözők karbidjainak és nitridjeinek a tulajdonságai között, ezért a szemcsedurulás megakadályozása érdekében a legkívánatosabb a stabil, diszperz TiN. Hevítéskor az ausztenit-szemcse durvulását a V kb. $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig, míg a Nb kb. $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig késlelteti, azonban sokkal kisebb mértékben hatásos, mint a $0,01\text{ }\%$ Ti ötvözőtartalom. Az alakított ausztenit újrakristályosodását mind a Nb, mind a V+N egyformán késlelteti. A késleltetés szempontjából a legkedvezőbb a Nb+V mikroötvöztetés, nagy N tartalom mellett.

Santella és munkatársai összefoglalták a mechanikai tulajdonságok javításának optimális lehetőségeit: A ferrit szemcseméretének csökkentése az egyedüli tényező, amely növeli az acél folyáshatárát és javítja a képlékenységet is. A mechanikai tulajdonságok javításának leghatásosabb eszköze az újrakristályosodási hőmérséklet alatti hengerlés. Ez az alakított, nagy diszlokáció-sűrűségű (ezért kis diszlokációs-cellamérettel jellemezhető) ausztenit nagy sv-vel rendelkezik, ezért a belőle kialakult ferrit is finomszemcsés lesz. A hagyományos termomechanikus hengerlés e vonatkozásban kedvezőtlen technológiai feltételeket követel, nevezetesen az intenzív hűtést a hengerson és az utolsó szűrásokban a "hideg" darabon nagymértékű alakításokat. Nb-mal mikroötvözött acél esetén vizsgálták a viszonylag kis

bugahevítési hőmérséklet hatását és megállapították, hogy a fel nem oldott NbN részecskék elősegítik a finomszemcsés szövet kialakulását. Ehhez a kedvező mennyiségű Nb mellett nagy N tartalom szükséges.

Cuddy megállapította, hogy a rekrisztallizáció kezdőhőmérséklete igen lényeges a termomechanikus hengerlési technológia gazdaságos kidolgozásához. Ebből a szempontból a legkedvezőbb ötvöző a Nb, amely a legnagyobbra növeli az acél újrakristályosodási hőmérsékletét. Santellával ellentétben azonban azt tartja kedvezőnek, ha a Nb már a bugahevítéskor oldatba jut.

Siwecki és munkatársai egy 0,12%C, 1,3%Mn, 0,35%Si, 0,09%V és 0,006...0,019% N összetételű alapanyagon elméletileg is és kísérletileg is vizsgálták a N-ötvözésnek a V-mal mikroötvözött acélokra gyakorolt hatását. A N adagolása, valamint a hengerlést követő hűtési sebesség fokozása növelte az acél folyáshatárát. Megállapították, hogy a N a ferrit szemcsenagyságára az sv növelésén keresztül hat. A szilárdság-növeléskor leglényegesebb az Orowan-mechanizmus, amelynél a VN részecskék mérete és azok távolsága a döntő tényező - azonos mikroötvöző-tartalom mellett. A hűtési sebesség fokozása is a VN részecskék diszperzitását növeli, valószínűleg azzal összefüggésben, hogy a diszlokációcella-szerkezet "leépülése" időfüggő folyamat. A kiválasztott keményedéskor a N szerepe az, hogy biztosítja az optimális VN részecskék keletkezésének a feltételeit.

Bacroix és munkatársai a 0,3% Mo ötvözésnek a rekrisztallizáció kezdőhőmérsékletére gyakorolt hatását vizsgálták, illetve az újrakristályosodás késleltetésére. Megállapították, hogy a Mo a mikroötvözők hatását fokozza, ezáltal nagyobb hengerlési véghőmérsékletek és kisebb hűtési sebességek alkalmazhatóságát teszik lehetővé.

Yamamoto és munkatársai részletesen elemezték a lágyulás (diszlokációszerkezet leépülése) és az újrakristályosodás kinematikáját. A V, Nb és Ti hatását vizsgálva megállapították, hogy a Nb-nek van a fenti jellemzőkre a legnagyobb hatása. A termomechanikus hengerlés szempontjából a lágyulásra kifejtett hatás a mértékadó. Ezt a mikroötvözők mellett az alakítási hőmérséklet és a C-tartalom is befolyásolja. [12, 13, 14, 15, 16]

2.2.2. Az előzőek alapján megtehető összefoglalás

A technológia-fejlesztések eredményeiből az alábbi trendek fogalmazhatók meg:

- minél kisebb ausztenit-szemmagyságú kiinduló bugából történő hengerlés elterjedése, beleértve a kis hengerlési kezdőhőmérsékletű alakítást is,
- a meglévő berendezésekhez alkalmazkodó, azokkal a maximális sv-t megvalósító acélfajták kialakítása.

Hidegen jól alakítható, azaz finomszemcsés melegen hengerelt előtermék gyártási feltételei a vonatkozó irodalom [4] alapján:

Az utolsó alakítás hőmérséklete csak igen kevéssel lehet az Ar3 hőmérséklet felett, azért, hogy az utolsó állványból kilépő darabot gyorsan lehessen hűteni kb. 550 °C alá. Ezzel a szövet-durvulást tudjuk megakadályozni.

A „gyors” hűtésre rendelkezésünkre álló időtartamot nagymértékben megnöveli a mikroötvözés, vagyis mikroötvözött acélokat biztonságosan lehet teljes keresztmetszetükben úgy hűteni, hogy a csévélig érve már valóban biztonsággal elkerülhető legyen a további kristály-növekedés, vagyis a szövet-durvulás.

A mikroötvözés már az alakítás közben is kifejti szemcsefinomító hatását azáltal, hogy jelenlétével (ötvözeteinek kiválásával) gátolja a szemcsedurvulást.

Az utolsó alakítás hőmérsékletének azért kell az Ar3 hőmérséklet felett lennie, hogy utána legyen újrakristályosodás, vagyis az ausztenit szemcsék a végső lehűtés előtt kapjanak alakítást (legyenek elnyújtottak).

Az utolsó alakítás hőmérséklete akkor lehet kevéssel az Ar3 hőmérséklet felett, ha vagy az utolsó szúrás (ez az utolsó alakváltozás) előtt intenzíven lehet hűteni (van beépített hűtőzóna/zónák),

vagy (illetve és) a kezdőhőmérséklet (ami egyben az izzítási véghőmérséklet) kicsi.

A csökkentett kezdőhőmérséklet egyéb előnyökkel is jár. Ezek például: Kevesebb a fajlagos összes energiafelhasználás (a melegítéshez szükséges földgáz mennyisége lényegesen csökken, míg az alakításhoz, azaz a hengerek hajtásához szükséges villamos energiamennyiség ennél csak sokkal kisebb mértékben nő), kisebb a reveveszteség, kisebb a dekarbonizálódott rétegvastagság, nagyobb (hosszabb) a kemence élettartama stb.

A kezdőhőmérséklet nem átgondolt csökkentésének hátrányai is lehetnek. Ilyenek például: A hengerállványok erő- vagy nyomaték-vonali esetleges túlterhelése, az üregtöltési viszonyok megváltozása (kisebb hőmérsékleten az anyag másképpen szélesedik, de ezt a résállítással kompenzálni lehet) stb.

A megfelelő (finom) szemnagyság azt jelenti, hogy a termomechanikusan helyesen melegen hengerelt szelvény fémtanilag akár egyenértékű is lehet a patentált szövetű anyaggal [1]. Nb-mal mikroötvözött acéloknál a fenti feltétel teljesüléséhez ajánlott irodalmi adatok:

Izzítási véghőmérséklet: 1150...1170 °C

Hengerlési véghőmérséklet: kb. 900 °C

Gyorshűtés a csévéőlőig, 550 °C alá.

A NAC Finomhengersorán üzemi hengerlési feltételek között elvégzett hengerlések tapasztalatai alapján [5] állíthatjuk, hogy a finomszemcsés szövetszerkezet kialakulásához elegendő volt a 980 °C izzítási véghőmérséklet. Ez 120 x 120 mm-es buga, lépésköz: 180 mm, izzítási (kemencében tartózkodási) idő kb. 120 perc mellett volt igaz. Úgyszintén igaznak látszik az a tapasztalat is, hogy a hengerlési véghőmérséklet csökkentése (akár 700 °C alá is csökkentettük!) javít a mechanikai tulajdonságokon. Az, hogy a továbbhúzás megkívánt körülményei ezt megengedik-e, nem vizsgáltuk. [17, 18, 19, 20, 21]

2.3. Az alakíthatóság hőmérsékleti vonzatai

Az acélok melegalakíthatósága – az alakító eljárások sokfélesége, illetve az alakítás során fellépő igénybevételek változatossága miatt – viszonylag nehezen definiálható fogalom. Vizsgálatára a legelterjedtebben a melegzőmítő és a melegcsavaró kísérleteket alkalmazzák. Ezek eredményeiből a gyakorlat számára elég jól egyező „sorrendek” adódnak a különböző összetételű acélok melegalakíthatóságára.

A melegalakíthatóság egy adott anyagminőség esetén alapvetően a következő tényezőktől függ:

- az alakítás hőmérséklete,
- az alakítás technológiája (az igénybevétel módja, sebessége, a súrlódóerők nagysága és iránya stb.),
- az alapanyag krisztallitjainak a melegalakíthatósága,
- a kristályhatárok mentén kialakuló kis képlékenységű „hártyák”, sűrűn elhelyezkedő kiválás-sorok vagy egyéb dúsulások.

A melegalakítás hőmérsékletén a következő szövetszerkezetekkel számolhatunk:

- homogén ausztenit (az átalakuló acélok zöménél és az át nem alakuló ausztenites acéloknál),
- homogén ferrit (erősen ötvözött, át nem alakuló ferrites acéloknál),
- heterogén szövetszerkezet (ausztenit+karbid például a szerszámacéloknál, ausztenit+ferrit például az erősen ötvözött ferrit-ausztenites acéloknál).

Az átalakuló, a melegalakítás hőmérsékletén homogén ausztenites acélok melegalakíthatósága általában jó. Ide tartozik az ötvözetlen és gyengén, illetve közepesen

ötvözött acélok döntő többsége. A C-tartalom hatása az átalakulási hőmérsékletükkel hozható összefüggésbe: Kisebb C-tartalmú acélok 1300 °C körül, nagyobb C-tartalmú acélok 1200 °C körül a legképlékenyebbek. Ez az ausztenites mezőben végzett túlhevítéssel magyarázható.

Az erősen ötvözött sav- és hőálló ausztenites acélok megalakíthatósága mind az előző acél-csoportnál, mind a ferrites acéltípusokénál gyengébb.

Az alakítás hőmérsékletén heterogén szövetszerkezetű acélok alakíthatósága általában rosszabb, mint a homogén szövetszerkezetű acéloké. Ennek oka az, hogy a különböző fázisoknak más az alakíthatósága, így a jobban alakítható fázis alakváltozó képessége hamarabb kimerül.

A legtöbb gyakorlati problémát a kristályhatárokon kialakuló hártványok és dúsulások okozzák. Ebből a szempontból a legveszélyesebb a kén és a réz hatása. Hatásmechanizmusuk hasonló: Kedvezőtlen esetben az ausztenitkristályok határán olvadákhártványt képezhetnek, ami a húzó-igénybevételeknek nem képes ellenállni. [22, 23, 24, 25]

2.4. Egy teljes hengersorra vonatkozó hőmérsékletvezetés alapelvei

Egy-egy acél szélesszalag meleghengermű technológia-optimalizálás szempontjából négy - többé-kevésbé önállónak tekinthető - nagyobb egységből áll. ezek a technológia sorrendjében:

- Bugamelegítés
- Előnyújtó (reverzáló) hengerlés
- Készrehengerlés (folytatólagos üzemmódban)
- Lehűtés a csévélési hőmérsékletre

A teljes technológiának egyetlen, optimálisnak nevezhető változata nem kereshető, mivel a fenti négy egységen belül is többféle, és a többi egységgel esetleg ellentétes szempont szerint kereshetők "optimálisnak" mondható technológiai variációk. Egy minden szempontból optimálisnak tekinthető technológiának nem csak matematikailag lenne nehéz a megoldását megkeresni (több, sőt igen sokváltozós szélsőérték-számítással), hanem éppen az egymásnak ellentmondó feltételek - nevezhetők ezek célfüggvényeknek - nem teszik lehetővé az egységes optimum megfogalmazását. Erre néhány példa:

Az alapanyag felmelegítésének vizsgálatakor cél lehet a minél kevesebb földgáz-felhasználás mellett elérni a névleges bugahőmérsékletet, de úgy, hogy közben a buga belsejében (a keresztmetszetek mindegyikében és minden keresztmetszetben) a hőmérséklet-eloszlás lehetőleg egyenletes legyen, azaz ne alakuljon ki benne káros nagyságú hőfeszültség. Ezek a feltételek a viszonylag kis izzítási véghőmérséklet (ekkor a revésedés is kisebb, és ez igen

lényeges gazdasági sőt kemence-üzemeltetési tényező is!) és a kemencében való hosszú tartózkodási idő tervezését követelik meg. Ezzel szemben az előnyújtó hengerlés (amennyiben van ilyen) a viszonylag nagy kezdőhőmérsékletet kívánná meg, mivel ekkor kisebb az anyag alakítási szilárdsága, azaz kisebb a fellépő hengerlési erő és nyomaték (a sor terhelési szintje), vagy azonos terhelési szint mellett a szúrásszám esetleg csökkenthető. Ha csak az izzítást és az előnyújtó hengerlést kellene egy közös optimalizálási feladatként kezelni, találhatnánk egy olyan izzítási véghőmérsékletet és ehhez tartozó bugán belüli hőfeszültség-megoszlást, amely a két technológiai folyamat fajlagos energiafelhasználásának az együttes optimalizálását lehetővé teszi.

Ezzel szemben, illetve ezen túlmenően azonban a folytatólagos készsor és a csévélési feltételek is befolyásolják a technológiát: Például a folytatólagos sor utolsó dolgozó állványából kilépő szalag hőmérséklete is és a sebessége is csak akkora lehet, amelyek mellett a hűtősor a csévélési hőmérsékletre az anyagot le tudja hűteni. Tovább gondolva ez utóbbi megfogalmazást, nem mindegy, hogy a hűtőszakaszban mennyi hűtővizet használunk a szalag csévélési hőmérsékletre történő lehűtéséhez: Nyilvánvaló, hogy célszerű a vízfelhasználást minimalizálni. A minimális vízfelhasználás viszont a hűtősorba befutó, adott geometriájú és anyagminőségű termék hőmérsékletének és sebességének egymással szigorú összhangban történő megválasztását jelenti, ami matematikai szempontból egy kétváltozós szélsőérték-keresés.

A folytatólagos készsorba befutó illetve a készsorból kilépő szalag hőmérséklete és a csévélési hőmérséklet szempontjából a szabályozott hőmérsékletvezetésű hengerlési technológia alkalmazása újabb, az említett szempontokon túlmenő megkötöttségeket jelent. Például a fémtani folyamatok lejátszódásához szükséges idő, hőmérséklet és alakváltozás betartása elsőrendű fontosságú. Egy komplex optimalizálási feladatból tehát a minőségi paraméterek tervezése sem hagyható ki: A mechanikai tulajdonságokat - adott kémiai összetétel esetén - elsősorban az utolsó alakítás (szúrás) hőmérséklete szabja meg, mivel az alakváltozás nagysága az utolsó (kész) szúrásban a kívánt alakhúségtól (lencséségtől) függ és alig variálható. Az alakváltozási sebesség sem jelent a mechanikai tulajdonságokban számottevő változást, tehát a hengerlési végsebességet nem a megkívánt mechanikai tulajdonságok elérése, hanem sokkal inkább a hengersor gépészeti adottságai és a hűtési optimalizálás eredménye szabja meg. A folytatólagos sor készállványából kilépő szalag hőmérséklete a folytatólagos sori, az előnyújtási, sőt még az izzítási technológiától is függ, azaz egyetlen célfüggvénnyel nem írható le az adott termék esetén betartandó véghőmérsékletre tartozó valamennyi technológiai paraméter.

Kulcsfontosságú paraméter a hengerlési véghőmérséklet és a csévélési hőmérséklet, ezért tehát a technológia komplex optimalizálását a tényleges technológia időbeli lefolyásával ellentétben éppen fordított sorrendben célszerű lefolytatni. A meleghengerműből kibocsájtott

késztermék: a szalagtekercs megkívánt mechanikai-, méret- és alaktulajdonságainak a biztosítása alapvetően fontos szempont; ezt azonban több, sőt sokféle résztechnológiai lépésen keresztül is el lehet (kell!) érni. [26, 27, 28, 29]

2.5. Következtetések és célkitűzések

A hengerlés utáni hűtés elsőrendű feladata az, hogy a hengersor utolsó dolgozó állványából kilépő darab hőmérsékletét az anyagminőségtől és a keresztmetszet nagyságától függő (ez technológiai alapadat) hőmérséklet alá hűtse. Ezt a legnagyobb még megengedhető hőmérsékletet nevezzük a továbbiakban $T_{hűt,max}$ -nak. Ez alá a határhőmérséklet alá mindenképpen gyorsan kell lehűlnie a darabnak (beleértve annak minden keresztmetszetét, akár a szálhossz elején, akár a végén is van) Különösen igaz ez akkor, ha a terméket felcsévélik: Mikorra a szál a csévéelőig elér, az ennél nagyobb hőmérsékleten végzett felcsévézés, illetve pontosabban az ezzel együtt járó kismértékű maradó alakváltozás az ennél nagyobb hőmérsékleten - a további lehűlés felcsévélt állapotban igen lassú, tehát van rá idő - durva újrakristályosodást eredményez.

A csévélési hőmérséklet, bár kisebb kell legyen, mint a $T_{hűl,max}$, de azt nem szabad nagyon "alul-lépni", azaz a túlzottan kis csévélési hőmérséklet sem kívánatos, mivel az esetleg egyrészt feleslegesen nagy hűtővíz-fogyasztást jelent, másrészt a hidegebb anyag nagyobb alakítási szilárdsága nagyobb felcsévélési nyomatékszükségletet jelent, harmadrészt a tekercsben rugalmas feszültségek is maradhatnak vissza.

A hűtési technológiának tehát olyannak kell lennie, hogyha az adott vastagságú szalag hengerlését bármilyen $T_{be, hűtő} \cong T_{vég}$ (a hűtősorba belépő hőmérséklet első közelítésben azonosnak vehető az utolsó állványból kilépő darab véghőmérsékletével, mivel az utolsó hengerállvány és az első vízhűtőszakasz közötti távolságon a darab "levegőn hűl" vagyis alig változik a hőmérséklete) hőmérsékleten és bármilyen $v_{vég}$ kilépő sebességgel is fejezik be, a csévélőnél valamennyi keresztmetszetének a hőmérséklete valamelyest a $T_{hűt,max}$ alatt kell, hogy legyen.

Annak érdekében, hogy az utolsó alakítás hőmérséklete a megkívánt értékű legyen, a technológia paramétereit ennek megfelelően kell megválasztani. A befejező hőmérsékletre legnagyobb hatása a kezdőhőmérsékletnek, a hengerlési sebesség-szintnek, valamint az esetleges hengerlés közbeni (állványközi) hűtésnek van. Más megfogalmazásban: Kívánt szemnagyságú termékek meleghengerlési technológiáját úgy kell megtervezni, hogy a szál hőmérsékletének a biztosítása az elsőrendű és legfontosabb szempont legyen.

3. A SZALAGHŰTÉSI TECHNOLOGIA HŐMÉRSÉKLETVEZETÉSE

3.1. A szalaghűtésre vonatkozó fizikai elvek

A szalaghűtés elsőrendű feladata az, hogy a hengersor utolsó dolgozó állványából kilépő szalag hőmérsékletét az anyagminőségtől és a szalagvastagságtól függő (ez technológiai alapadat) hőmérséklet alá hűtse. Ezt a legnagyobb még megengedhető csévélési hőmérsékletet nevezzük a továbbiakban $T_{cs,max}$ -nak. Ez alá a határhőmérséklet alá mindenképpen le kell hűlnie a szalagnak (beleértve annak minden keresztmetszetét, akár a szalaghossz elején, akár a végén is van) mikorra a csévéelőig elér, mivel az ennél nagyobb hőmérsékleten végzett felcsévélés, illetve pontosabban az ezzel együttjáró kismértékű maradó alakváltozás ezen a nagyobb hőmérsékleten - a lehűlés igen lassú, tehát van rá idő - durva újrakristályosodást eredményez.

A hűtési technológiának tehát olyannak kell lennie, hogyha az adott vastagságú szalag hengerlését bármilyen $T_{be} = T_{vég}$ hőmérsékleten és bármilyen $v_{vég}$ kilépő sebességgel is fejezik be, a csévéelőnél valamennyi keresztmetszetének a hőmérséklete valamelyest a $T_{cs,max}$ alatt kell legyen.

3.2. A szalaghűtés vonatkozó fizikai modell

A lamináris hűtésnek az a lényege, hogy a szalag felületére a hűtővizet kis nyomással és párhuzamos sugárban juttatják (innen a lamináris jelző), azért, hogy így a szalag felületére jutó víz lehetőleg egyenletes rétegben terüljön szét. A vízréteg olyan vastag legyen, amely megakadályozza az összefüggő gőzréteg képződését.

A lamináris áramlásnak az a feltétele, hogy a kifolyó vízszugárban a Reynolds szám kisebb legyen, mint $(2...2,2) \cdot 10^4$.

A Reynolds szám a következőképpen fejezhető ki:

$$Re = v_{v\acute{z}} \cdot \frac{D}{\nu}, \quad 3.1.$$

ahol $v_{v\acute{z}}$ a víz kifolyási sebessége [mm/s]

D a vízszugár átmérője [mm]

ν kinematikai viszkozitás [mm²/s]

Az így kiömlő víz egységnyi térfogata által elvitt hőmennyiség és a Reynolds szám között igen szoros összefüggést mutattak ki Myake, Y. és társai [4]:

$$Q_w = 4,2 \cdot 10^7 \cdot Re^{-0,645}, \quad [\text{kJ/m}^2\text{h}], \quad 3.2.$$

ahol Q_w a víz által elvitt hőmennyiség .

A lamináris hűtéskor egy csövön kifolyó víznek egy négyzetméter szalagfelületre jutó percenkénti mennyisége (Φ) az egy csövön időegység alatt áthaladó vízmennyiségből meghatározható:

$$\Phi = V / P_L \cdot P_C, \quad [\text{m}^3/\text{min}] \quad 3.3.$$

ahol: P_L a két csősor közötti távolság [m],

P_C két szomszédos cső közötti távolság [m].

Az áthaladó vízmennyiség a vízsebességből ($v_{\text{víz}}$) és a cső keresztmetszetéből ($A_{\text{cső}}$) adódik:

$$V = v_{\text{víz}} \cdot A_{\text{cső}} \cdot 60, \quad [\text{m}^3/\text{min}] \quad 3.4.$$

ahol $v_{\text{víz}}$ a víz áramlási sebessége [m/s].

A szalag felületén a hőáramsűrűség:

$$q_w = 4,056 \cdot 10^8 \cdot \Phi^{0,355} \cdot \left\{ \frac{(2,5 - 1,15 \log T_v) \cdot D \cdot 10^{-3}}{P_L \cdot P_C} \right\}^{0,645}, \quad [\text{kJ/m}^2\text{h}] \quad 3.5.$$

ahol D a cső belső átmérője [m],

T_v a hűtővíz hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$].

Az egy fűvókán átfolyó víz hatására a szalagtól elvont hő okozta lehűlés:

$$\Delta T_1 = \frac{4,2 \cdot q_w \cdot t_i}{3,6 \cdot c \cdot \rho \cdot h}, \quad [^{\circ}\text{C}] \quad 3.6.$$

ahol $t_i = \frac{P_L}{v}$ a vízrétegen történő áthaladás ideje [s],

v a szalag sebessége [m/s],

c az acél fajhője [kJ/kgC°],

ρ az acél sűrűsége [kg/m³],

h a szalag vastagsága [mm].

Minthogy egy hűtőegységen a szalag haladási irányával párhuzamosan n sor cső van, a hűtőegységben megvalósítható lehűlés:

$$\Delta T_f = n \cdot \Delta T_i, \quad [^\circ\text{C}]. \quad 3.7.$$

Az alsó hűtés hatását a következő gondolatmenet alapján számítjuk ki: Különböző üzemi vizsgálatok azt igazolták, hogy ugyanannyi víz felhasználása esetén a permetező hűtéssel a szalag lehűlése a lamináris hűtésnek csak 85 %-a. Másrészt az alsó hűtés során alkalmazott vízmennyiség az egész vízmennyiségnek z -ed része, azaz a felső víz mennyiségének $\left(\frac{z}{z-1}\right)$ -szerese. Az alsó hűtés hőmérsékletcsökkenése a felsőhöz képest tehát arányos a hűtővíz relatív mennyiségével, és a hűtés hatékonyságával:

$$\Delta T_a = 0,85 \cdot \left(\frac{z}{1-z}\right) \cdot \Delta T_f. \quad 3.8.$$

A szalag teljes lehűlése egy hűtőszakaszon történő áthaladás után:

$$\Delta T_i = \Delta T_f + \Delta T_a, \quad [^\circ\text{C}] \quad 3.9.$$

A szalag hőmérséklete pedig:

$$T_{sz i} = T_{sz(i-1)} - \Delta T_i, \quad [^\circ\text{C}] \quad 3.10.$$

ahol $T_{sz(i-1)}$ az i -edik hűtőszakaszba belépő szalag hőmérséklete [C°].

Az egyes hűtőszakaszok között nagyobb térközön halad át a szalag, ahol csak levegőn történő hűtést kap. A következő hűtőszakasz az idézett cikkben közölt mérések szerint fajlagosan több hőmennyiséget képes elvonni. A hőelvonás többletet egy k_j tényezővel vesszük figyelembe. A k_j értékét a vízhűtőszakaszt megelőző léghűtő szakasz relatív hosszának függvényében az alábbiak szerint számítjuk:

$$\text{Ha } \frac{l_i}{P_L} \leq 3 \text{ akkor: } k_j = \left(1 + \frac{l_i}{P_L}\right)^{0,4}, \quad 3.11.a.$$

$$\text{ha } \frac{l_i}{P_L} > 3 \text{ akkor: } k_j = 1,74. \quad 3.11.b.$$

Itt l_i a hűtőszakaszt megelőző léghűtőszakasz hossza.

Egy léghűtési szakaszt követő vízhűtés által okozott lehűlés tehát:

$$\Delta T_i^* = k_j \cdot \Delta T_i \quad 3.12.$$

Az 3.1.-3.10. összefüggésekkel meghatározható a vízhűtő szakaszokon a szalag lehűlésének mértéke.

Ott, ahol a szalag a szabad levegőn hűl, a lehűlést a sugárzás, illetve a konvektív hőáramlás biztosítja. Minthogy a hengerlési, illetve a csévélési hőmérsékletek közti tartományban a lehűlést a felületi sugárzás hozza létre, így annak mértékét a Stefan-Boltzmann összefüggéssel lehet meghatározni:

$$\Delta T_l = \frac{2 \cdot C_s \cdot t_l}{3,6 \cdot h \cdot \rho \cdot c} \cdot \left[\left(\frac{T_{sz} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k + 273}{100} \right)^4 \right], [C^\circ] \quad 3.13.$$

ahol T_{sz} a szalag hőmérséklete [C°],
 T_k a környezet hőmérséklete [C°],
 C_s felületi sugárzási szám [$\text{kJ/m}^2\text{h } C^\circ$],
 c a szalag fajhője [$\text{kJ/kg } C^\circ$],
 ρ az acél sűrűsége [kg/m^3],

- h a szalag vastagsága [mm],
 t_l a szalagnak a levegőn való tartózkodási ideje [s].

A t_l idő a vízzel nem hűtött görgősori szakasz hosszából, valamint a szalag kifutási sebességéből egyszerűen meghatározható:

$$t_l = \frac{L_1^*}{v}, \quad 3.14.$$

- ahol L₁^{*} a vízzel nem hűtött szakasz hossza [m],
 v a hengerlési sebesség az utolsó állványban [m/s].

Az L₁^{*} a részleges vízhűtés esetén a következőképpen adódik:

$$L_1^* = L_1 + n \cdot l_v + 5, \quad [\text{m}], \quad 3.15.$$

- ahol L₁ a vízhűtő szakasz és a csévélő közti távolság [m],
 l_v egy vízhűtő szakasz hossza (6,3 m),
 n a kikapcsolt vízhűtő szakaszok száma (a technológiától függően).

Az ismertett összefüggésekkel az egyes technológiai paraméterek függvényében egy adott méretű és minőségű szalag lehűlésének folyamata meghatározható. [1, 7]

4. A FOLYTATÓLAGOS SORI KÉSZREHENGERTÉSI HŐMÉRSÉKLETVEZETÉSE

4.1. Technológia tervezési lehetőségek a folytatólagos soron

A folytatólagos hengersoron elvégezhető optimalizálási lehetőségeknek az összefoglalását az alábbiak szerint tekinthetjük át:

A hűtési lehetőségekből valamint az előírt csévézési hőmérsékletből kiadódik a utolsó készárványból kilépő szalag kívánt (és hangsúlyozzuk: összetartozó !) "sebesség - hőmérséklet" $[v_n - T_n]$ értékpárja. Ezt úgy kell érteni, hogy a két érték közül az egyik viszonylag szabadon megválasztható, azonban a másik ekkor már a hűtési-hűlési lehetőségek és követelmények által szigorúan megszabott, mint azt a 3. fejezetben már láthattuk. Ez a szigorú követelmény minden- képpen betartandó.

A technológia-tervezés a folytatólagos soron tehát a következő választási lehetőségeket adja a hengerésznek:

- Megválasztható a folytatólagos hengersorba belépő előlemez vastagsága.
- Megválasztható a folytatólagos hengersorba belépő előlemez hőmérséklete.
- Előírható a folytatólagos sor hengerállványai között különböző intenzitású közbenső darabhűtés (állványközi hűtés).
- Megtervezhető az egyes állványokra eső magasságcsökkenések nagysága, azaz ezzel az állványról-állványra haladó darab hőmérséklete némileg befolyásolható.

Értelemszerűen a felsorolt és úgynevezett technológia-optimalizáló lehetőségeket minden esetben csak szigorú korlátok között lehet igénybe venni. Ilyen korlátozó feltételek:

- A hengersor terhelési szintje a megengedett értéket ne lépje túl. Ebben a viszonylatban különböző nagyságú "biztonsági" tényezők vehetők fel, amelyekkel a terhelési szintet mintegy le lehet korlátozni és ezáltal a gépelemek élettartamát (értelemszerűen a termelési kapacitás

rovására) megnövelni. A terhelési szintet mind az erő, mind a nyomaték vonalában külön-külön kell vizsgálni és külön-külön lehet a korlátozást jelentő biztonsági tényezőt megválasztani.

- Valamennyi hengerállványnál be kell tartani a folytonossági feltételt, vagyis a sebességek a hengerelt darab keresztmetszetének csökkenésével arányosan növekednek. A számított (kívánt) sebességeknek azonban minden állványnál a gépészetileg megvalósítható minimum és maximum között kell elhelyezkedniük.

- Mindenképpen biztosítani kell azt, hogy a szalag átlagos vastagsága a kihengerelt szalaghossz mentén állandó legyen (a tűrésmezőn belül maradjon). Ezt a hengerrés(ek) szabályozásával lehet elérni.

- További követelmény a szalag lencsésességének a tűrésmezőn belül való tartása. Ez az előző feltétel betartásával némileg ellentétes követelményt jelent, hiszen ha a hengerlési erőt változtatjuk (szabályozzuk), a többi paraméter állandósága esetén a lencsésesség azonnal megváltozik. A szalag lencsésége a mechanikai terhelésen (a hengerek rugalmas alakváltozásán) kívül a hengertestre ráköszörült alapdomborítástól és a hengertest térbeli (!) hőállapotától is függ. A hengertestben uralkodó, a viszonylag nagy időállandó miatt több tízperces időtartam alatt kialakuló, tengelyirányban is és sugárirányban is változó hőállapot egy adott hődomborítást jelent a hengertesten. Ez a hődomborítás a köszörült alapdomborítással és a hengerlési erőtől függő rugalmas hengerrés-változással együtt eredményezi a szalagon mérhető lencsésiséget. Állandó lencsésesség elérése csak viszonylag állandósult hőállapotú hengertestekkel lehetséges, vagyis a hengerlésnek mindenképpen ütemesnek kell lennie. Ezen túlmenően a lencsésesség adott (megkívánt) $[v_n - T_n]$ értékpár mellett a hengerlési erő nagyságára is hatást gyakoroló magasságcsökkenéssel (Δh_n -nel) befolyásolható, ami értelemszerűen az átlagos magasságot is megváltoztatja.

A bezárulni látszó bűvös kör feloldására alapvetően két út járható: Vagy igen pontosan be kell tartani a jó eredményeket jelentő, megfelelően megtervezett és kipróbált hengerlési technológiát (pl. úgy, hogy a hengerkormányos egy monitoron látja a beállítandó paramétereket), vagy megfelelő mérő-szabályozó berendezést kell felszerelni a hengersorra, amelyik - több paraméter mellett - állandóan méri a készállványból kilépő szalag lencsésességét és legalább a készállványon a hengerrés folyamatos szabályozására is képes. Erre ma már igen sok gépészeti megoldás ismert. [6, 12]

4.2. A folytatólagos hengersorra vonatkozó fizikai elvek

4.2.1. A hengerelt szalag hőmérsékletváltozása

Egy vizsgált hengerállvány hengerrésében alakváltozást szenvedő szalag kilépő hőmérsékletét az alábbi hőegyensúly határozza meg:

Hőmérsékletcsökkenés a sugárzás hatására.

A görgősoron futó darab hőmérsékletét az eltelt idő függvényében a következő összefüggés szerint számítjuk:

$$T = T_{\text{levegő}} + (T - T_{\text{levegő}}) \cdot \exp\left(-\frac{K}{A} \cdot \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot u \cdot t_g\right), \quad [^{\circ}\text{C}] \quad 4.1.$$

ahol:

$T_{\text{levegő}}$	A környezeti hőmérséklet, $^{\circ}\text{C}$
$K=2 \cdot (h_e + b_e)$	Az előlemez kerülete, m
$A=h_e b_e$	Az előlemez keresztmetszet-területe, m^2
c	Az előlemez anyagának valódi fajhője, $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$
ρ	Az előlemez anyagának sűrűsége, kg/m^3
u	Hőátadási tényező, $\text{kJ/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$
t_g	Szállítási idő, s.

Az u hőátadási tényező értéke a meleghengerműnek végzett sok üzemi mérésorozat alapján [3]:

$$u = \xi \left\{ 97,55 \cdot \frac{T - 800}{100} + 0,419 \cdot \left(\frac{T - 800}{100} \right)^4 + 117,24 \cdot \sqrt{v} + 251,22 \right\}, \quad [\text{kJ/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}] \quad 4.2.$$

ahol:

T	a hengerelt darab hőmérséklete, $^{\circ}\text{C}$, $(800 \leq T \leq 1250 \text{ } ^{\circ}\text{C})$,
v	a darab haladási sebessége, m/s

ξ a konkrét lehűlési viszonyokat (revésedés, emissziós tényező, geometria stb.) figyelembe vevő tényező. Értéke az előnyújtó soron: $\geq 0,4$, míg a folytatólagos egység környezetében: $< 2,2$.

Az acél fajhője, illetve sűrűsége a hőátadási tényezőhöz hasonlóan hőmérsékletfüggő, amit az alábbi függvények írnak le:

Ha az acél karbontartalma: $C < 0,2 \%$:

$$c = -0,67241 + 3,44312 \cdot 10^{-3} \cdot T - 2,950677 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 8,68889 \cdot 10^{-10} \cdot T^3, \text{ [kJ/kg}^\circ\text{C]} \quad 4.3.$$

Ha $0,2 < C < 0,6\%$:

$$c = 0,502811 + 1,26057 \cdot 10^{-4} \cdot T - 2,8804 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 8,77161 \cdot 10^{-12} \cdot T^3, \text{ [kJ/kg}^\circ\text{C]} \quad 4.4.$$

Az acél sűrűségének hőmérsékletfüggése:

$$\rho = 7817,985 - 0,241113 \cdot T - 7,14433 \cdot 10^{-5} \cdot T^2, \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad 4.5.$$

Mivel a darab hőmérsékletének meghatározására szolgáló összefüggés a hőmérséklettől függő paramétereket is tartalmaz, így az egymáshoz tartozó értékeik meghatározása csak többlépcsős iterációs számítással lehetséges. Ennek során a darab $t=0$ időpillanathoz tartozó hőmérsékletének és az iterációs körben számított új hőmérsékletének számtani átlagával új u ; ρ ; c értékek állapíthatók meg, amelyek a darabhőmérséklet egyre pontosabb meghatározását eredményezik.

Hőmérsékletváltozás a hengerrésben

Az alakváltozás során keletkező hőmennyiség az anyag hőmérsékletét T_{al} -al emeli:

$$\Delta T_{al} = \frac{1000 \cdot \varphi}{c \cdot \rho} \cdot (k_f - \sigma_{h,köz}), \quad [^\circ\text{C}] \quad 4.6.$$

ahol

$\varphi = \ln(h_{be}/h_{ki})$	a szűrés során megvalósított alakváltozás nagysága,
k_f	a hengerelt anyag alakítási szilárdsága, N/mm ² ,
$\sigma_{h,köz} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{be} + \sigma_{ki})$	a hengerelt szalagban fellépő közepes húzófeszültség,
N/mm ² ,	
c	a hengerelt acél fajhője, kJ/kg°C,
ρ	a hengerelt acél sűrűsége, kg/m ³ .

A k_f alakítási szilárdságot a Hajduk képlet szerint számíthatjuk:

$$k_f = k_{f0} \cdot K_T \cdot K_\varphi \cdot K_{\dot{\varphi}}, \quad [\text{N/mm}^2] \quad 4.7.$$

a K_T , K_φ , $K_{\dot{\varphi}}$ behelyettesítése után:

$$k_f = k_{f0} \cdot A_1 \cdot \exp(-m_1 \cdot T) \cdot A_2 \cdot \varphi^{m_2} \cdot A_3 \cdot \dot{\varphi}^{m_3}, \quad [\text{N/mm}^2] \quad 4.8.$$

ahol:

k_{f0}	A $T=1000$ °C alakítási hőmérséklethez, a $\varphi=0,1$ alakváltozáshoz és $\dot{\varphi}=10$ s ⁻¹ alakváltozási sebességhez tartozó alakítási szilárdság
$A_1; A_2; A_3; m_1; m_2; m_3$	Termodinamikai tényezők
φ	A szűrés során megvalósított alakváltozás nagysága
$\dot{\varphi}$	A szűrés során megvalósított alakváltozási sebesség nagysága

A szalag hőmérsékletének csökkenése a hengerek által elvont hő hatására:

$$\Delta T_{heng} = \frac{2 \cdot u_{heng} \cdot l_d}{3600 \cdot c \cdot \rho \cdot v \cdot h_{ki}} (T_{sz} - T_{heng}), \quad [^\circ\text{C}] \quad 4.9.$$

ahol

u_{heng}	a hengerelt darab és a hengerek közötti hőátadási tényező. Értéke: 21000 kJ/m ² h°C, ami a hengerek hűtésére szolgáló
------------	---

	víz hatását is figyelembe veszi,
T_{sz}	a szalag közepes hőmérséklete a hengerrésben, °C,
T_{heng}	a hengerek közepes felületi hőmérséklete, °C,
l_d	a nyomott ív hossza, mm,
v	hengerlési sebesség, m/s,
h_{ki}	a hengerrésből kilépő szalag vastagsága, mm.

Az l_d nyomott ív hosszát az alábbiak szerint számoljuk:

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad 4.10.$$

ahol

R	a munkahenger sugara, m
Δh	a szalag magasságcsökkenése, m

A szalag hőmérsékletét a henger és a darab között ébredő súrlódási hőmennyiségneknek a szalagba áramló része $\Delta T_{súrl}$ -al növeli:

$$\Delta T_{súrl} = \frac{10^6 \cdot \xi \cdot F \cdot (1 - e^{-\varphi})}{c \cdot \rho \cdot b \cdot h_{ki}}, \quad [^{\circ}\text{C}] \quad 4.11.$$

ahol:

ξ	a keletkezett súrlódási hőmennyiség hengerekbe áramló hányada (iterálás előtt előzetesen felvéve: 0,1),
μ	súrlódási tényező a hengerrésben, a hengerfelületen,
F	hengerlési erő, kN,
b	a hengerelt szalag szélessége, mm.

A μ súrlódási tényező meghatározására az alábbi összefüggést használjuk:

$$\mu = 0,80 - 0,0005T - 0,056v \geq 0,22 \quad 4.12.$$

ahol	T	a hengerrésben a darab közepes hőmérséklete, °C,
	v	a hengerlési sebesség, m/s.

A darab hőmérséklete egy-egy, az éppen vizsgált hengerrészből történő kifutáskor a fenti rész hőmérséklet-különbségek algebrai összegével egyenlő:

$$T_{ki} = T_{be} + \Delta T_{al} + \Delta T_{súrl} - \Delta T_{heng}, \quad [^{\circ}\text{C}] \quad 4.13.$$

A tényleges darabhőmérséklet és a hengerlési erő együttesen csak iterációs eljárással határozható meg. Ennek során első lépésben kiszámítjuk a bemenő hőmérséklettel a hengerlési erőt, majd ezt felhasználva számítjuk a 4.13. összefüggés szerinti T_{ki} kimenő hőmérsékletet. Ezzel ismét kiszámítjuk a hengerlési erőt, és ezt követően az új T_{ki} kimenő hőmérsékletet. Az eljárást addig folytatjuk, amíg a két egymás után számított kilépő hőmérséklet egy tetszőlegesen kis értéknél - esetünkben 1°C -nál - kisebb nem lesz. Az utolsó iterációs körben számított hengerlési erőt és kimenő hőmérsékletet fogadjuk el pontos értéknek. A számítást valamennyi állványon hasonlóképpen végezzük el. [1, 3, 7]

A fenti számításokat állványról-állványra elvégezve meghatározható a szalag mindenkor hőmérséklete a folytatólagos készcsoporthoz minden egyes állványában, mind a belépő, mind a kilépő oldalon.

4.2.2. A hengerelt szalag hengerlési sebességének meghatározása

A hengerversorban lévő szalag sebességváltozását a szűrőstern értékeit felhasználva a folytonossági feltétel felhasználásával határozhatjuk meg.

$$A_n \cdot v_n = A_{n+1} \cdot v_{n+1} = A_{n+2} \cdot v_{n+2} = \dots = \text{konst.} \quad 4.14.$$

Ahol

A a szalag keresztmetszetének területe, m^2
 v a szalag sebessége, m/s

Mivel a hengerállvány utáni sebességet ismerjük, így a hengerállvány előtti sebességet az alábbi képlettel számíthatjuk:

$$v_n = \frac{A_{n+1}}{A_n} \cdot v_{n+1}, \quad [\text{m/s}] \quad 4.15.$$

ahol

$$A_n = b_n \cdot h_n, \quad [\text{mm}] \quad 4.16.$$

$$A_{n+1} = (b_n + (0,35 \cdot (h_n - h_{n-1}))), \quad [\text{mm}] \quad 4.17.$$

Ezzel megkapjuk a hengerállványonkénti hengerlési sebességet. A hengerállványokban átfutó szalag sebességét behatárolja az állványok gépészeti sebesség minimuma illetve maximuma. Ezeket a határértékeket a hengerlési sebesség számolásánál figyelembe kell venni.

4.2.3. A hengerlési erőnek és nyomatéknak számítása

A hengerlési erő és nyomaték meghatározásának egyik jelentősége, hogy a hengerállványok gépészeti paraméterei által engedélyezett lehetőségeket maximálisan ki tudjuk használni. Hiszen minden egyes hengerállványhoz egy maximális hengerlési erő illetve nyomaték tartozik.

A hengerlési erő és nyomaték számolására több elmélet létezik, mi a számoláshoz az alábbi képleteket használtuk.

Hengerlési erő:

$$F = k_k \cdot A_{ny} = k_k \cdot b_k \cdot l_d, \quad [\text{kN}] \quad 4.18.$$

ahol

k_k	Alakítási szilárdság
b_k	A szalag közepes szélessége
l_d	A nyomott ív hossz

Az alakítási szilárdságot és a nyomott ív hosszát a 4.8. és 4.10. képlet alapján számolhatjuk. A szalag közepes szélességét pedig a szalag hengerállványba be illetve kilépő szélességének az átlaga.

$$b_k = \frac{b_n + b_{n+1}}{2}, \quad [\text{mm}] \quad 4.19.$$

b_n	Hengerállványba befutó szalag szélessége
b_{n+1}	Hengerállványból kifutó szalag szélessége

A kiszámolt hengerlési erőt a hengerállvány gépkönyvében megtalálható maximális hengerlési erővel összehasonlítva el lehet dönteni, hogy a szűrásterv szerint megadott magasságcsökkenés a hengerállvány tartós károsodása nélkül megvalósítható-e.

Hengerlési nyomaték:

$$M = (M_{al} + M_{cs} \pm M_{gy}) \cdot \frac{1}{\mu_{\delta}}, \quad [\text{kNm}] \quad 4.20.$$

ahol

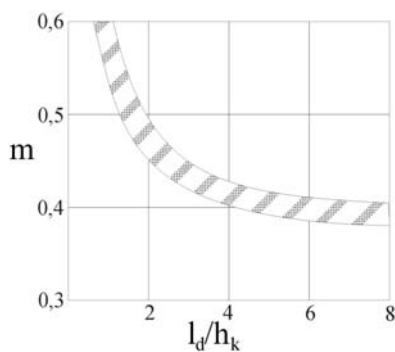
M_{al}	Alakítási nyomaték [kNm]
M_{cs}	Csapsúrlódási nyomaték [kNm]
M_{gy}	Gyorsítási nyomaték [kNm]
μ_{δ}	A hajtás összehatásfoka

$$M_{al} = 2 \cdot F \cdot m \cdot l_d, \quad [\text{kNm}] \quad 4.21.$$

ahol:

F	Hengerlési erő [kN]
m	Kar korrekciós tényező
l_d	Nyomott ív hossz [m]

Az m hengerlési kar korrekciós tényezőt megleghengerlésnél az alábbi diagramból tudjuk meg :



4.1. ábra

Az m hengerlési kar korrekciós tényező meghatározása

$$M_{cs} = 2 \cdot F \cdot \mu_{cs} \cdot r_{cs}, \quad [\text{kNm}] \quad 4.22.$$

ahol:

F	Hengerlési erő [kN]
μ_{cs}	Súrlódási tényező (0,005 ... 0,1 csapágytól függően)
r_{cs}	Csap sugár [m]

$$M_{gy} = \Theta \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad [\text{kNm}] \quad 4.23.$$

ahol:

Θ	A gyorsítandó elemek tehetetlenségi nyomatéka [kNms^2]
$\frac{d\omega}{dt}$	Az elemi szöggyorsulás [$1/\text{s}^2$]

A hengerlési nyomatékokat a henger meghajtómotorának gépkönyvében megtalálható maximális hengerlési nyomatékkal összehasonlítva el lehet dönteni, hogy a szűrásterv szerint megadott magasságcsökkenést a hajtómotorok tartós károsodása nélkül megvalósítható-e. [7]

5. AZ HENGERLÉSTECHNOLÓGIA OPTIMALIZÁLÓ PROGRAM ELLENŐRZÉSÉRE SZOLGÁLÓ MÉRÉSI ADABÁZIS LÉTREHOZÁSA

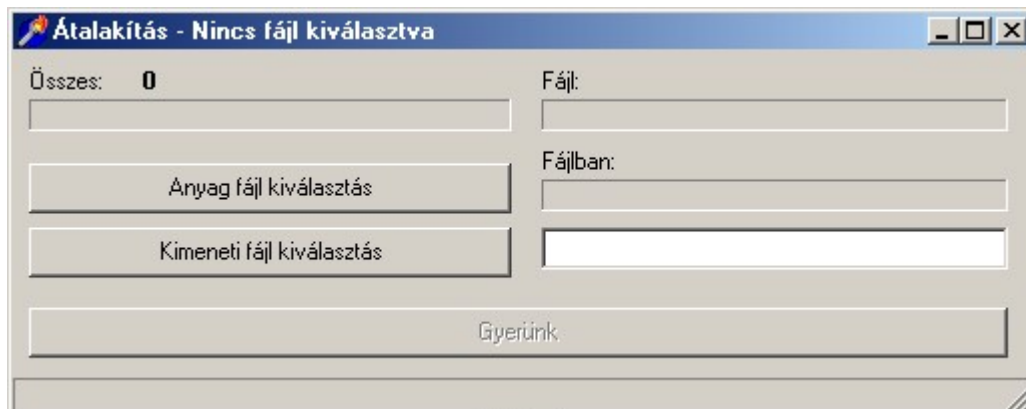
A célkitűzésekben megfogalmazott hengerléstechnológia optimalizáló program elkészítéséhez nem csak a megfelelő technológiai, fizikai elveket kell ismerni, hanem az elkészült program ellenőrzéséhez ismerni kell a tényleges üzemben mérhető – a technológiát leíró – adatokat is. 1999 év májusában a DUNAFERR Acélművek Kft rendelkezésemre bocsátotta az 1999. január 1. és 1999. április 30. közötti időszak Meleghengerműre vonatkozó adatait digitális formában.

5.1. Mérési adatok rendezése

Az adatbázis első megközelítésre kaotikusnak tűnt, mivel a kiértékelendő adatok 2 külön fájlban voltak és a fájlok mérete összességében meghaladta a 70 MB-ot. Ezért először a köztük lévő kapcsolatot kellett megtalálnom. A fájlok az alábbi adatbázist tartalmazták: az első az acélminőséget, a második információkat a technológiai lépésekről. Ésszerűnek tűnt számítógépes adatrendező program (5.1. ábra) létrehozása a probléma megoldására, amelyet a fájlok tartalmának megismerése után elkészítettem. Az acélminőséget és a technológiai lépéseket tartalmazó fájl közös adata a bugaszám volt, vagyis ez alapján az acélminőség és technológiai adatokat párosítani lehetett. A program az általam kitalált rendező algoritmust használta, vagyis az acélminőségeket tartalmazó fájlból kiemelte a bugaszámot és megkereste a hozzá tartozó bugaszám szerinti technológiai adatot.

Az elkészített adatbázis az alábbi adatokat tartalmazza tekercsenként:

- Adagszám
- Anyagminőség
- Szélesség
- Vastagság
- Gyártási idő
- Résméret
- Hengerlési erők
- Hengerek fordulatszám
- Hengerhajtó motorok áramfelvétel
- Végvágó ollónál mért hőmérséklet
- 1. és 2. állvány között mért hőmérséklet
- 6. állvány után mért hőmérséklet



5.1. ábra

Az adatátalakítást végző program kezelőfelülete

A program kezelése egyszerű, csak ki kell választanunk az „Anyag fájl kiválasztás” gomb segítségével, hogy milyen acélminőség-bugaszám adatbázist kívánunk kikerestetni az összes technológiai adatbázisból. Ezek után a „Kimeneti fájl kiválasztás” gomb segítségével megadhatjuk a kimeneti egyesített adatbázis fájlnevét. Megnyomva a „Gyerünk” gombot a program egyesíti a két adatbázist. Az adott időszakra vonatkozó adatbázis létrehozása a programnak 16 órájába tellett és az elkészült fájl több mint 12 MB terjedelmű lett. Az elkészült fájl Microsoft Excel kompatibilis, amely megkönnyíti az adatok további feldolgozását. [30, 31]

5.2. Adatbázis értékelés

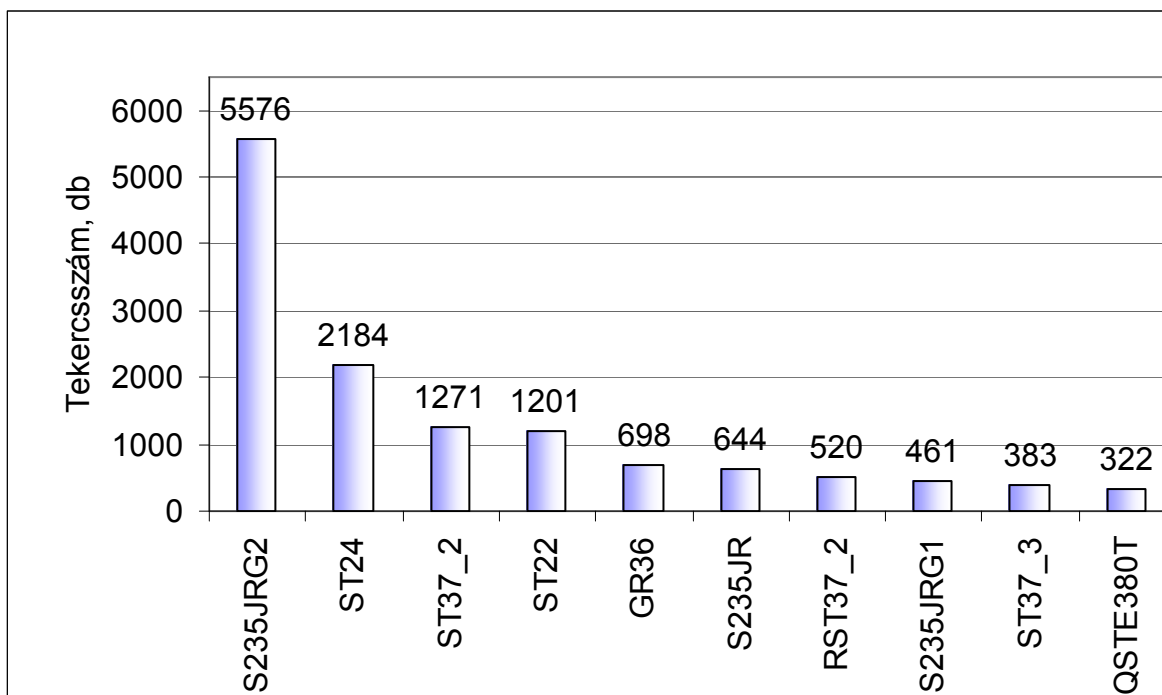
Az elkészült adatbázis 17554 db tekercs adatait tartalmazza, amelyből 17496 db felhasználható értékelésre. A felhasználhatatlan 58 db tekercshez a számítógép nem talált értékelhető technológiai adatokat. Az adatvesztés származhat a mérőrendszer pillanatnyi hibájából vagy hengermű üzemzavarából. Százalékosan nézve az adatvesztés csupán 0,33 %, amely a mérési adatok számát tekintve elhanyagolható. A 17496 db tekercs acélminőség szerinti eloszlását a 5.1. táblázat, az első 10 anyagminőség tekercsszám megoszlását pedig a 5.2 ábra tartalmazza .

5.1. táblázat

A 1999.01.01-1999.04.30 közötti időszakban a DUNAFERR Acélművek Kft.

Meleghengerműjében gyártott tekercsek acélminőség szerinti megoszlása

Anyagmin.	Tekercsek száma	Anyagmin.	Tekercsek száma	Anyagmin.	Tekercsek száma	Anyagmin.	Tekercsek száma
A38	2	QST37_3	9	46/40	35	EK4	142
P275NL1	2	QST52_3	9	DN1,8SI	37	S355JO	157
SPH265	2	S355	9	HII	42	HR4	162
FE	3	SPHC	9	FE430BKQ	43	S275JR	165
ST44_2	3	GR	10	RRST23	43	S355J2G3	185
FE430	4	X60	12	FE550D	46	ST52_3	187
E420D	5	DFHST14	13	EK2	48	SAE1008	209
STW	5	P355N	13	50A	50	43A	246
43F35	6	KL2D	15	S	51	FE510D1	263
FEE235BF	6	ST50_2	17	FEP05	56	S185	301
QSTE	6	RQST37_2	18	QSTE380	57	FE360B	309
S235JO	6	GRC	20	DHR52	58	QSTE380T	322
52D	7	QSTE380N	21	FE360D1	59	ST37_3	383
DM890P	7	C75CR	22	2C35	60	S235JRG1	461
P355NL1	7	A	23	UST37_2G	63	RST37_2	520
QSTE420T	7	S235J2G3	26	FE360	67	S235JR	644
S355JR	7	S355J2G4	26	S275J2G3	67	GR36	698
UST	7	EM	27	FE360BKQ	81	ST22	1201
A44B	8	UST37_2	30	FE430D1	90	ST37_2	1271
DE360NB	8	2C45	32	STW22	94	ST24	2184
52C	9	S275JRC	33	STW24	102	S235JRG2	5576
A34	9	DE360	34	L415MB	107		



5.2. ábra

Az „első 10 anyagminőség” tekeresszám szerinti megoszlása

A mérési adatok szelektálásánál a cél, hogy adott anyagminőségű acéltípusokból a legtöbb gyártott tekercset tartalmazót válasszuk ki. A fenti elv alapján kiválasztottam a 5.1. táblázatban piros színnel található anyagminőségeket, amelyek az összes az adott időszakban gyártott tekercs 58,48 %-t teszi ki. A kiválasztott négy típus az összes gyártott típusok csupán 4,6 %-a. A 5.2. táblázatban a kiválasztott acélminőségből gyártott tekercsek vastagság szerinti megoszlása látható.

5.2.táblázat

A kiválasztott acélminőségű tekercsek vastagság szerinti megoszlása

Vastagság, mm	Acélminőség			
	ST22	S235JGR2	ST24	ST37-2
1,35				105
1,5		106		1
1,6		16		87
1,69		10		
1,75		92		
1,8		20		162
1,85		321		36
1,9		24		

Vastagság, mm	Acélminőség			
	ST22	S235JGR2	ST24	ST37-2
2	331	130	1444	366
2,2		1		
2,25		10		
2,3	724		573	24
2,35				24
2,4		8		28
2,43		39		
2,5	78	31	27	55
2,55				12
2,65		6		
2,7	9			23
2,75		389		9
2,8	19	37	153	11
2,85		29		
2,9		154		24
2,93		282		20
3	15	211	60	115
3,2	160		156	9
3,3		10		
3,4		24	198	
3,43		5		
3,5	7			
3,55				12
3,7		296		
3,8		102		11
3,85		54		
3,9		169		
3,92		121		21
3,93		259		7
4	186	792	295	82
4,5	34			
4,8		122		30
4,85		39		
4,9		43		
4,91		76		28
4,92		212		13
5		238		23
5,8		84		17

Vastagság, mm	Acélminőség			
	ST22	S235JGR2	ST24	ST37-2
5,85		38		10
5,9		138		7
5,91		144		17
6		207		
6,9		17		
7,8		55		
7,85		23		
7,9		280		25
8		39		
8,89				7
9,75		35		
9,78		2		
9,82		39		
9,89		167		12
10		33		
11,75		7		
11,78		2		
11,82		8		
11,88		71		21
12		7		
14,75		51		
15		45		
40		2		

A 7.2. táblázatból kiderül, hogy az ST24 jelű acélból a 2 mm vastagságú tekercsből gyártották a legtöbb mennyiséget. Így a további vizsgálatra és az optimalizáló program ellenőrzésére az előbb említett anyagminőséget vihetjük tovább.

Az adatok efféle rendezése után 1444 db tekercs mérési adata áll rendelkezésünkre (A 1444 db adat az összes rendelkezésre álló adatmennyiség 8 %-a). Ezen adatmennyiség elég ahhoz, hogy biztonsággal megállapítsuk, hogy az optimalizáló program azonos beállítások mellett helyesen működik-e.

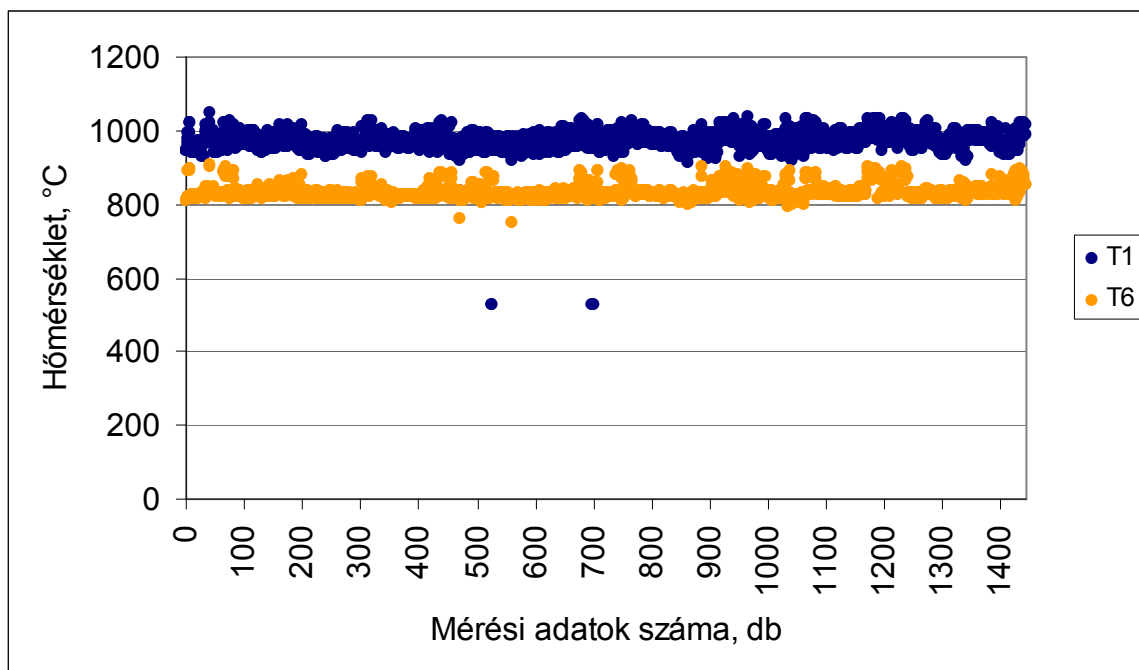
A tekercsenkénti adatokat meg kell vizsgálnunk abból a szempontból, hogy mely információkat tudjuk felhasználni a szoftver ellenőrzésére. Ha áttekintjük az adatsort kitűnik, hogy ellenőrzésre a mért erőket illetve hőmérsékleteket használhatjuk fel. Mivel nem ismerjük pontosan a hengerállványokban a mérések alatt használt munkahengerek átmérőit és a

hengerállványonkénti pontos magasságsökkenéseket, így a program működését megfelelőnek tekinthetjük, ha a hengerlési erőkhez tartozó számolt magasságsökkenések értékeinek átlagos eltérése $\pm 30\%$, a számolt hengerlési hőmérséklet értékek átlagos eltérése $\pm 10\%$ a mért értékek átlagához képest. A mért hengerlési hőmérsékletnek kisebb a szórása, ezért a választott szűkebb tartomány. A mért erők és hőmérsékletek átlagát a 5.3. táblázat mutatja be. A 5.3. – 5.9. ábra a mérési eredmények szórását diagramban ábrázolja az St24 anyagminőségű 2 mm szalag gyártása során. [9]

5.3. táblázat

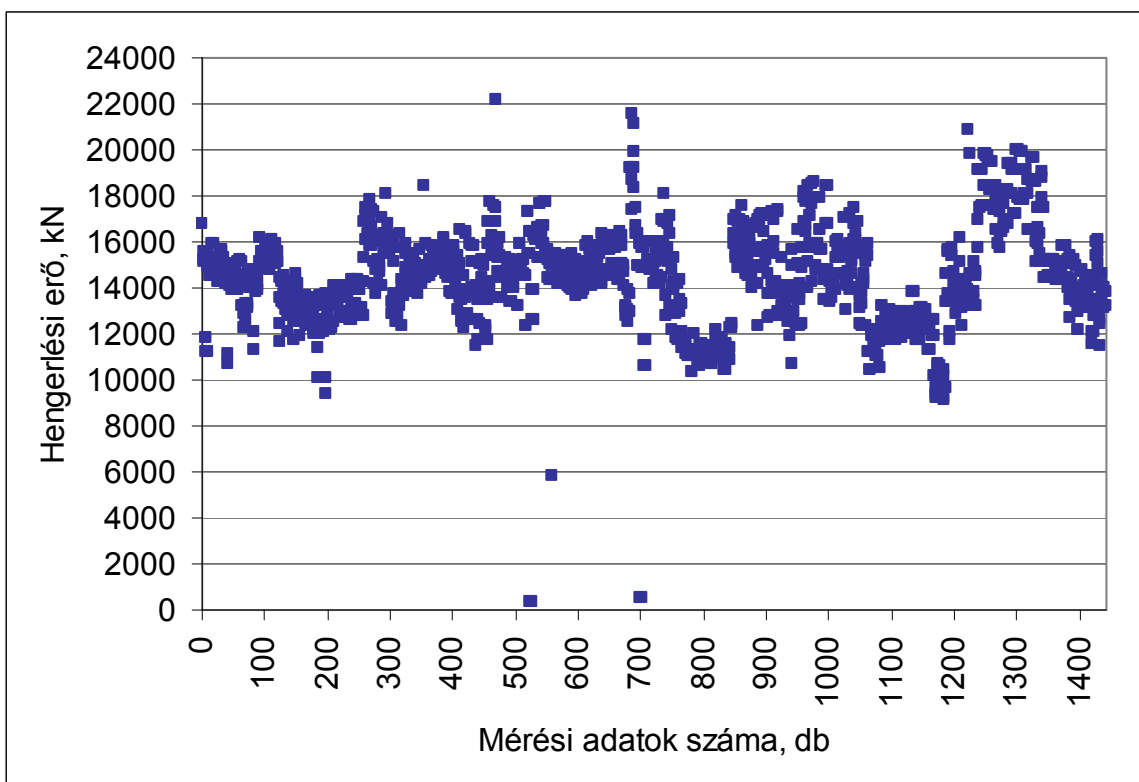
A mért erők és hőmérsékletek átlaga

Anyagminőség Mérési hely	St24
I. hengerállvány hengerlési erő	14447 kN ($R^2=0,0081$)
II. hengerállvány hengerlési erő	12896 kN ($R^2=0,0143$)
III. hengerállvány hengerlési erő	12885 kN ($R^2=0,006$)
IV. hengerállvány hengerlési erő	11028 kN ($R^2=0,007$)
V. hengerállvány hengerlési erő	10268 kN ($R^2=0,0032$)
VI. hengerállvány hengerlési erő	7330kN ($R^2=0,0107$)
Hőmérséklet I. hengerállvány után	971 °C ($R^2=0,0109$)
Hőmérséklet VI. hengerállvány után	833 °C ($R^2=0,0244$)



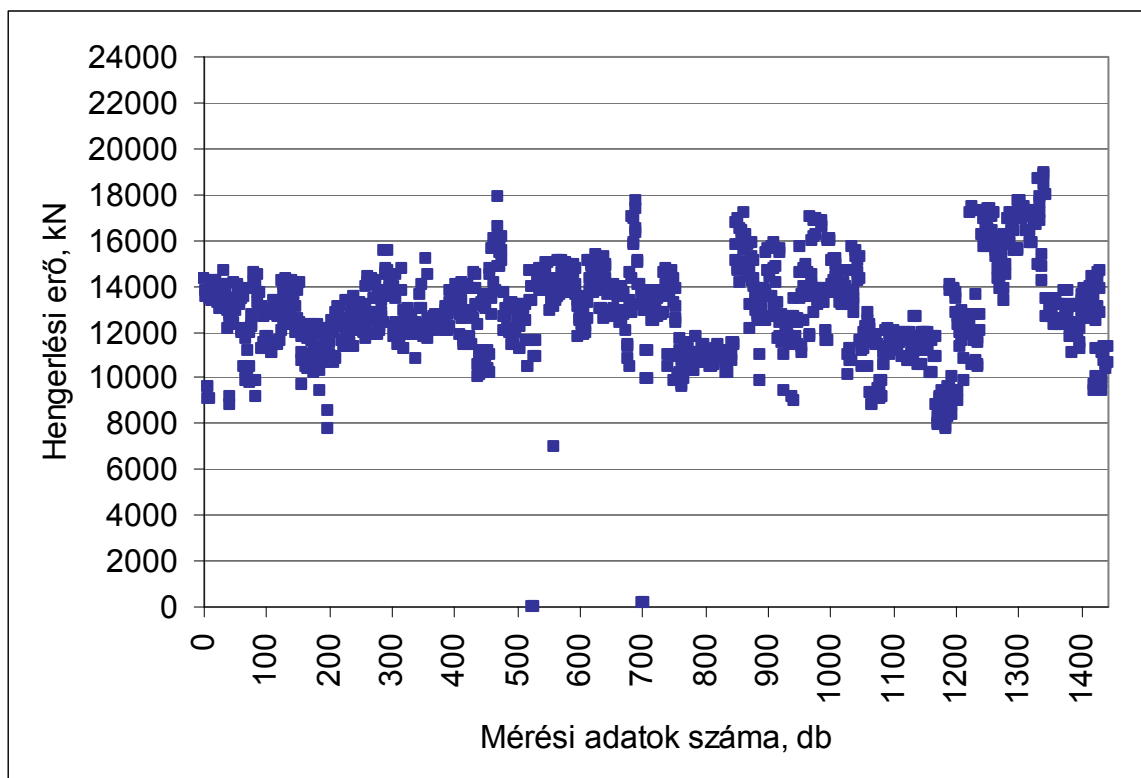
5.3. ábra

Az St24 anyagminőségű 2 mm vastagságú szalag gyártásánál a mért hőmérsékletek



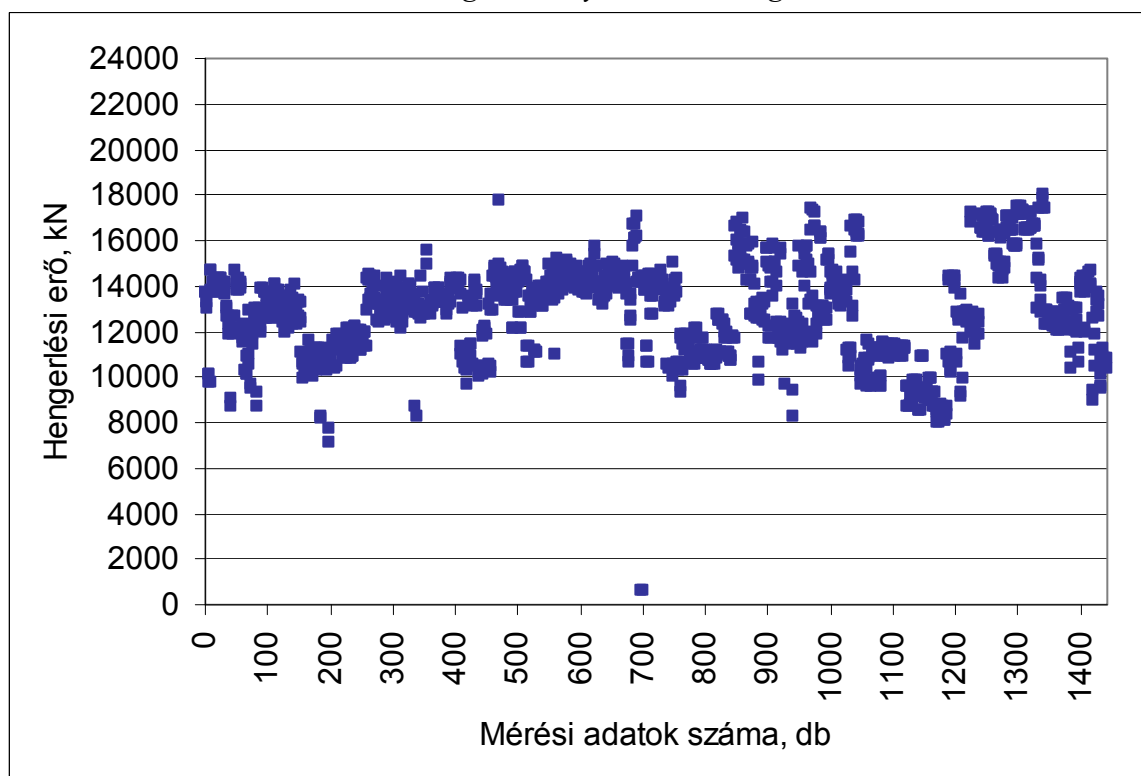
5.4. ábra

Az St24 anyagminőségű 2 mm vastagságú szalag gyártásánál az I. számú hengerállványban mért hengerlési erő



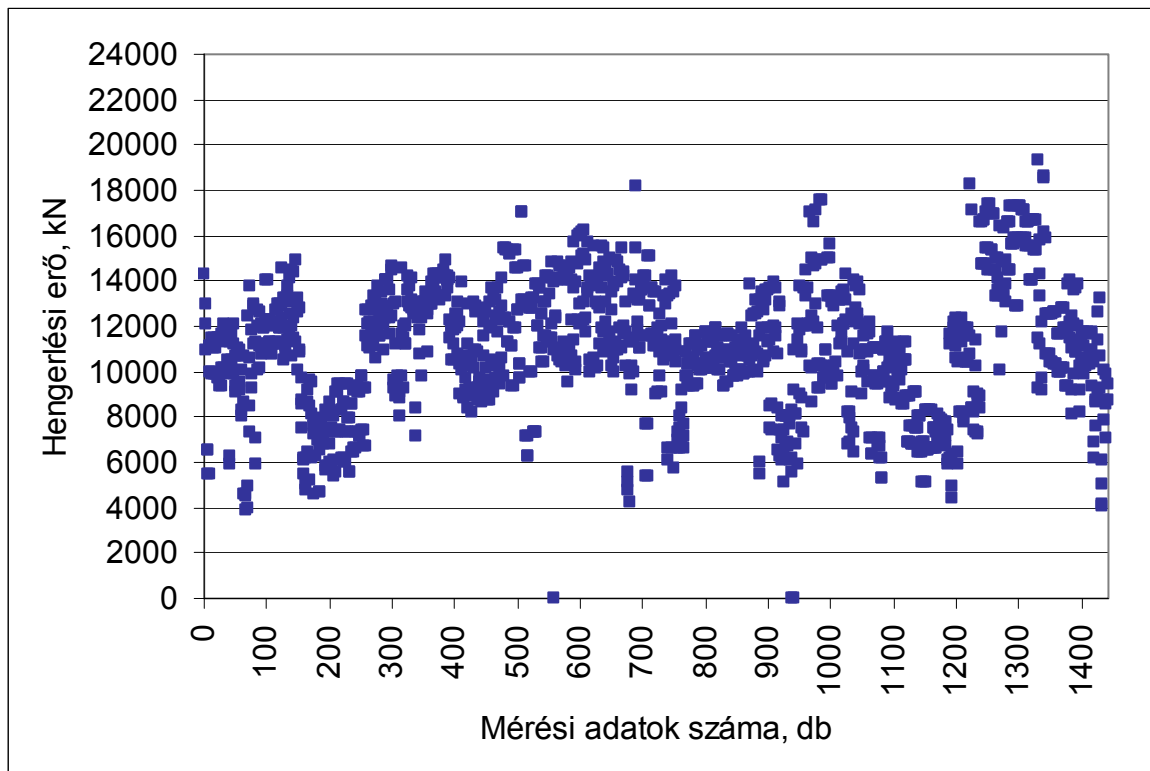
5.5. ábra

*Az St24 anyagminőségű 2 mm vastagságú szalag gyártásánál
az II. számú hengerállványban mért hengerlési erő*

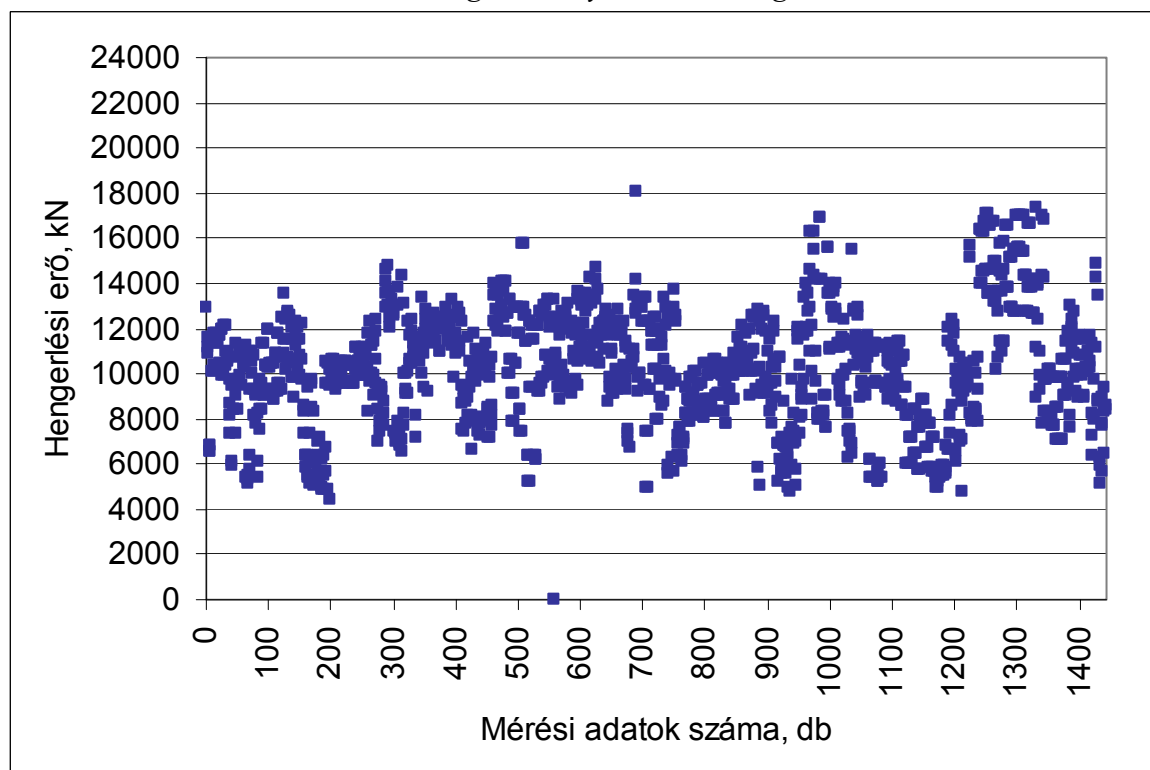


5.6. ábra

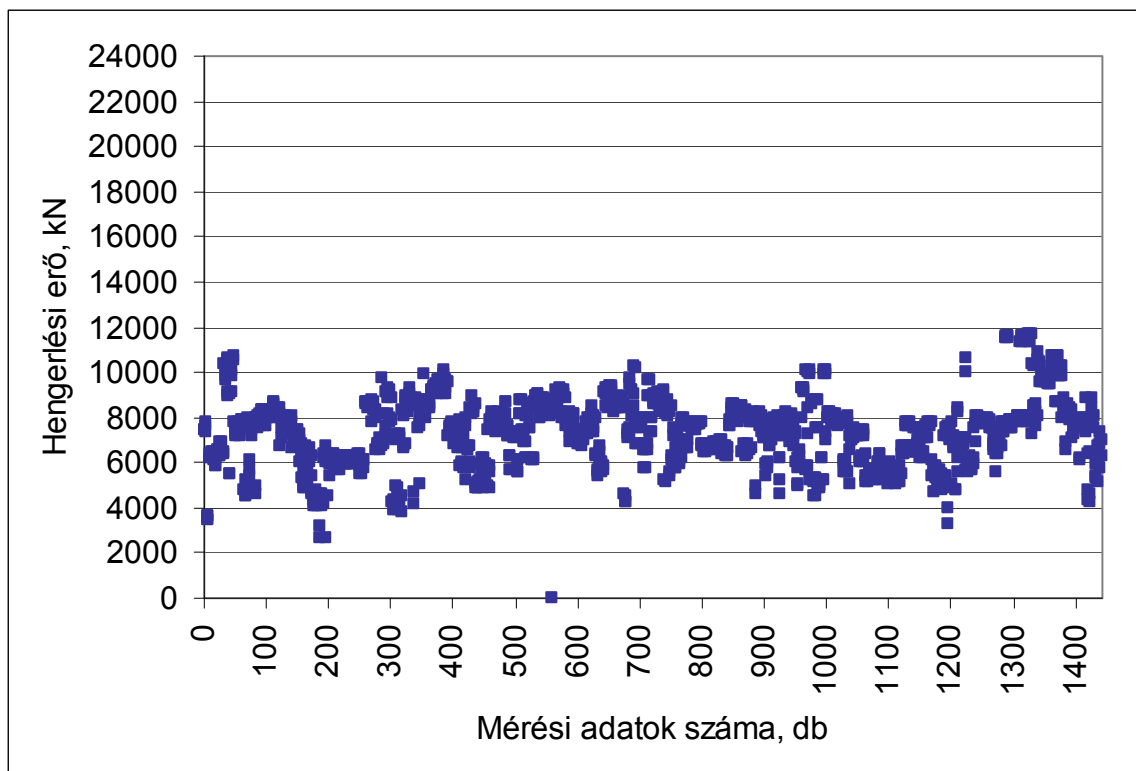
*Az St24 anyagminőségű 2 mm vastagságú szalag gyártásánál
az III. számú hengerállványban mért hengerlési erő*



5.7. ábra
Az St24 anyagminőségű 2 mm vastagságú szalag gyártásánál
az IV. számú hengerállványban mért hengerlési erő



5.8. ábra
Az St24 anyagminőségű 2 mm vastagságú szalag gyártásánál
az V. számú hengerállványban mért hengerlési erő



5.9. ábra
Az St24 anyagminőségű 2 mm vastagságú szalag gyártásánál
az VI. számú hengerállványban mért hengerlési erő

6. A KOMPLEX OPTIMALIZÁLÁST LEHETŐVÉ TEVŐ INTERAKTÍV SZÁMÍTÓGÉPES PROGRAM FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE

A következő fejezetben a számítógéppel támogatott modellezés lehetőségeit kívánom bemutatni a „Virtual HOTRolling Mill” fantázianevű programon keresztül. A számítógépes programmal virtuális meleghengerművet tudunk létrehozni, melynél feltételezzük, hogy a készsorba befutó előlemez vagy vékony bramma kívánt vastagságú, szélességű, hőmérsékletű.

6.1. Az optimalizáció számítógépes megvalósításának lehetőségei

A meleghengerlés optimalizációját két oldalról közelíthetjük meg, vagy a hengersorba első állványába bemenő [sebesség – vastagság – szélesség] paraméterhez kívánjuk meghatározni a hengersor utolsó állványából kimenő [sebesség – vastagság – szélesség] értékeket vagy fordítva, a kimeneti értékekhez kívánunk bemeneti paramétereket meghatározni. Mivel a kész szalag mechanikai tulajdonságait jelentősen befolyásolja a hengerlés utáni hűtés mértéke és a hűtés sebessége, célszerűnek tűnik, hogy az optimális kimeneti értékekhez keressünk optimális bementi paraméterek a hengersor gépészeti tulajdonságainak figyelembevételével.

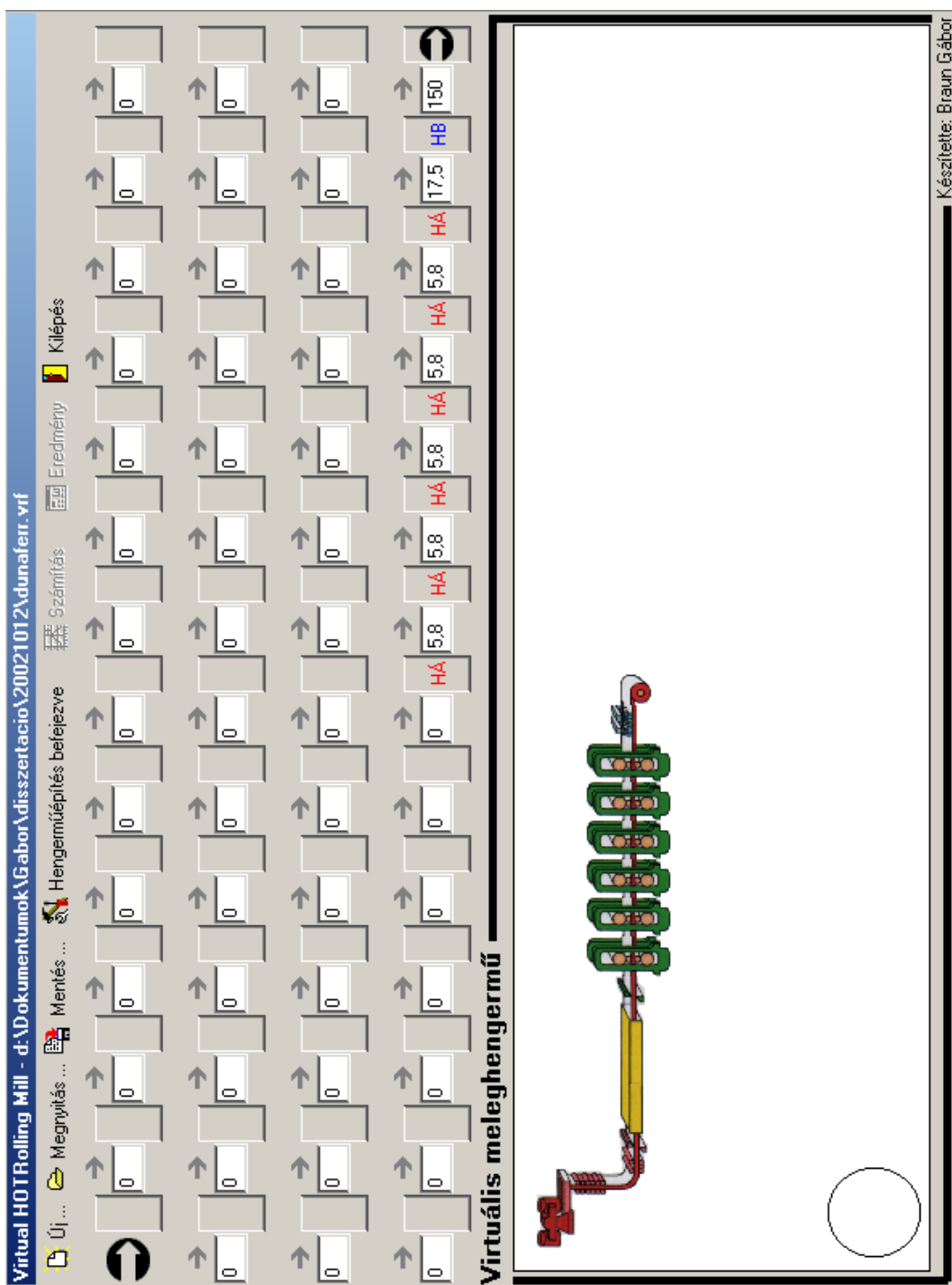
A bemeneti érték meghatározásához célszerű a számítógép segítségét igénybe vennünk. A használható számítástechnikai megoldásokat két csoportba oszthatjuk:

- neuronhálóval megvalósított optimalizálás
- hagyományos analitikai módszereken alapuló lefutó programozással megvalósított optimalizálás

Neuronhálóval megvalósított optimalizálás: amikor az optimalizáláshoz az idegrendszer működéséhez hasonlóan működő öntanuló rendszert használunk, amely az előzőleg betanított adatbázisból kiválasztja a kiinduló paraméterekhez a legkedvezőbb beállítási értékeket.

Hagyományos analitikai módszereken alapuló lefutó programozással megvalósított optimalizálás: a képlékenyalakításhoz tartozó képletek, számolási algoritmusok, törvényszerűségek és a gépészeti paraméterek figyelembevételével lefutó program a bemeneti értékek alapján meghatározza az optimális beállításokat.

Az általam elkészített „Virtual HOTRolling Mill” nevű program a „hagyományos lefutó programozással megvalósított optimalizálás” kategóriába sorolható. A program 32 bites operációs rendszer alá íródott Borland Delphi 6.0 programozási nyelvben (6.1.ábra).



6.1. ábra

A „Virtual HOTRolling Mill” program kezelőpanelje

6.2. Az acél szélesszalagok számítógéppel támogatott optimalizációjának fizikai elvei

A program bemeneti paraméterei, az anyagjellemzőkön és tulajdonságokon, valamint a gépészeti értékeken kívül, a [végsebesség – hőmérséklet – vastagság] értékek és a szűrásterv. Ezekhez a paraméterekhez kívánjuk meghatározni - a melegalakításhoz és hűtéshez tartozó algoritmusok felhasználásával és megfelelő iterálásával - azt az optimális első állvány előtti sebesség – hőmérséklet – vastagság értékeket, amelynél a legkisebb a felhasznált hűtővíz mennyisége. Így egyrészt megtudjuk, hogy milyen hőmérsékletűnek kell a brammának vagy előlemeznek lennie, másrészt megkapjuk, hogy a megadott szűrásterv kivitelezhető-e a hengerson és hogy a szalag lehűthető-e a hűtősonon a csévézési hőmérsékletre, harmadrészt megtudjuk a maximális bementi bramma illetve előlemez vastagságot.

A meleghengerlési technológia meghatározásához számos fizikai elvet illetve az ezekhez az elvekhez kapcsolódó számítási képletet, formulát kell felhasználnunk. A számításokhoz tartozó képleteket az előző fejezetekben már ismertettem.

A feladat a melegen hengerelt széles szalag első állvány előtti hőmérsékletének, sebességének, vastagságának és szélességének meghatározása a csévézési, a közbensőleg számolt adatok és a szűrásterv figyelembevételével.

A hengerson valamely hengerállványában egy adott időpontban fellépő hengerlési erő a benne futó szalagrész hőmérsékletétől jelentős mértékben függ. A hengerrésben futó szalag hőmérséklete azonban maga is függvénye az arra a szalagrészre és időpillanatra jellemző alakítástechnológiai jellemzőknek. Ezért minden egyes állványban egyszerre szükséges a hengerlés technológiai, mechanikai, valamint termodinamikai jellemzőit meghatározni.

A programozási nyelv használata megköveteli az adott fizikai képletek más szempontból való megközelítését. Ilyen fontos számítási elv a hengerlési hőmérséklet meghatározására vonatkozó képlet. Ha ki kívánjuk számítani a hengerállványba bemenő szalag hőmérsékletét, akkor látjuk, hogy a bementi hőmérséklet a kimeneti hőmérsékleten és egyéb paraméteren kívül mintegy önmagától is függ. Ezen probléma feloldására az egyenletet iterálni kell, vagyis a bementi hőmérsékletet változtatva és behelyettesítve két határ között meghatározhatjuk a közelítő végeredményt. A felhasznált képletet az alábbiak szerint kell átalakítani:

$$T_{be} = T_{ki} - \Delta T_{al} - \Delta T_{súrl} + \Delta T_{heng}$$

melybe az összefüggéseket behelyettesítve az alábbi eredményt kapjuk:

$$T_{be} = T_{ki} - \frac{1000\rho}{c \cdot \rho} \cdot (k_f - \sigma_{köz}) - \frac{10^6 \mu (1 - e^{-\varphi})}{c \cdot \rho \cdot b \cdot h_{ki}} \cdot F_{heng} + \frac{2u_{heng} \cdot l_d}{3600 \cdot c \cdot \rho \cdot v \cdot h_{ki}} (T_{sz} - T_{heng})$$

Az alábbi konstansokat ki lehet emelni az egyszerűsítés kedvéért:

$$K_1 = \frac{1000\rho}{c \cdot \rho}$$

$$K_2 = \frac{10^6 \mu (1 - e^{-\varphi})}{c \cdot \rho \cdot b \cdot h_{ki}}$$

$$K_3 = \frac{2u_{heng} \cdot l_d}{3600 \cdot c \cdot \rho \cdot v \cdot h_{ki}}$$

A konstansokat behelyettesítve:

$$T_{be} = T_{ki} - K_1 \cdot (k_f - \sigma_{köz}) - K_2 \cdot F_{heng} + K_3 \cdot (T_{sz} - T_{heng})$$

Az alábbi konstansokat kiemelve

$$K_4 = K_1 \cdot \sigma_{köz}$$

$$K_5 = K_3 \cdot T_{heng}$$

az alábbi összefüggést kapjuk:

$$T_{be} = T_{ki} - K_1 \cdot k_f - K_4 - K_5 \cdot F_{heng} + K_3 \cdot T_{sz} - K_5$$

Az alábbi konstansokat összevonva

$$K_6 = K_4 + K_5$$

az alábbi egyszerűbb összefüggést kapjuk:

$$T_{be} = T_{ki} - K_1 \cdot k_f - K_2 \cdot F_{heng} + K_3 \cdot T_{sz} - K_6$$

A k_f és F érték számítási képletének behelyettesítése után a

$$T_{be} = T_{ki} - K_1 \cdot (k_{f0} \cdot \exp(-m_1 T) \cdot A_2 \cdot \varphi^{m_2} \cdot A_3 \cdot \varphi^{m_3}) - K_2 \cdot$$

$$\left((k_{f0} \cdot \exp(-m_1 T) \cdot A_2 \cdot \varphi^{m_2} \cdot A_3 \cdot \varphi^{m_3}) \cdot \left(\frac{2b_1 - 0,35\Delta h}{2} \right) \cdot \sqrt{R\Delta h} \right) + K_3 \cdot T_{sz} - K_6$$

összefüggést kapjuk, majd kiemelve az alábbi konstansokat

$$K_7 = K_1 \cdot (k_{f0} \cdot A_2 \cdot \varphi^{m_2} \cdot A_3 \cdot \varphi^{m_3})$$

$$K_8 = B \cdot \left((k_{f0} \cdot A_2 \cdot \varphi^{m_2} \cdot A_3 \cdot \varphi^{m_3}) \cdot \left(\frac{2b_1 - 0,35\Delta h}{2} \right) \cdot \sqrt{R\Delta h} \right)$$

az alábbi konstansokkal egyszerűsített képletet kapjuk:

$$T_{be} = T_{ki} - K_1 \cdot K_7 \cdot \exp(-m_1 T_{be}) - K_2 \cdot K_8 \cdot \exp(-m_1 T_{be}) + K_3 \cdot \left(\frac{T_{be} + T_{ki}}{2} \right) - K_6$$

A programba beépített végső képlet az alábbi:

$$T_{be} = T_{ki} - ((K_1 \cdot K_7) - (K_2 \cdot K_8)) \cdot \exp(-m_1 T_{be}) + K_3 \cdot \left(\frac{T_{be} + T_{ki}}{2} \right) - K_6, \quad [^{\circ}\text{C}] \quad 6.1.$$

ahol

$K_1, K_2, K_3, K_6, K_7, K_8$: konstansok

T_{be} : bemeneti hőmérséklet

T_{ki} : kimeneti hőmérséklet

A fenti egyenlettel számított bementi hőmérsékletet akkor tekinthetjük megfelelőnek, ha az iterálás közben a két egymás utáni behelyettesítést követően számolt érték közötti különbség kevesebb mint 1°C .

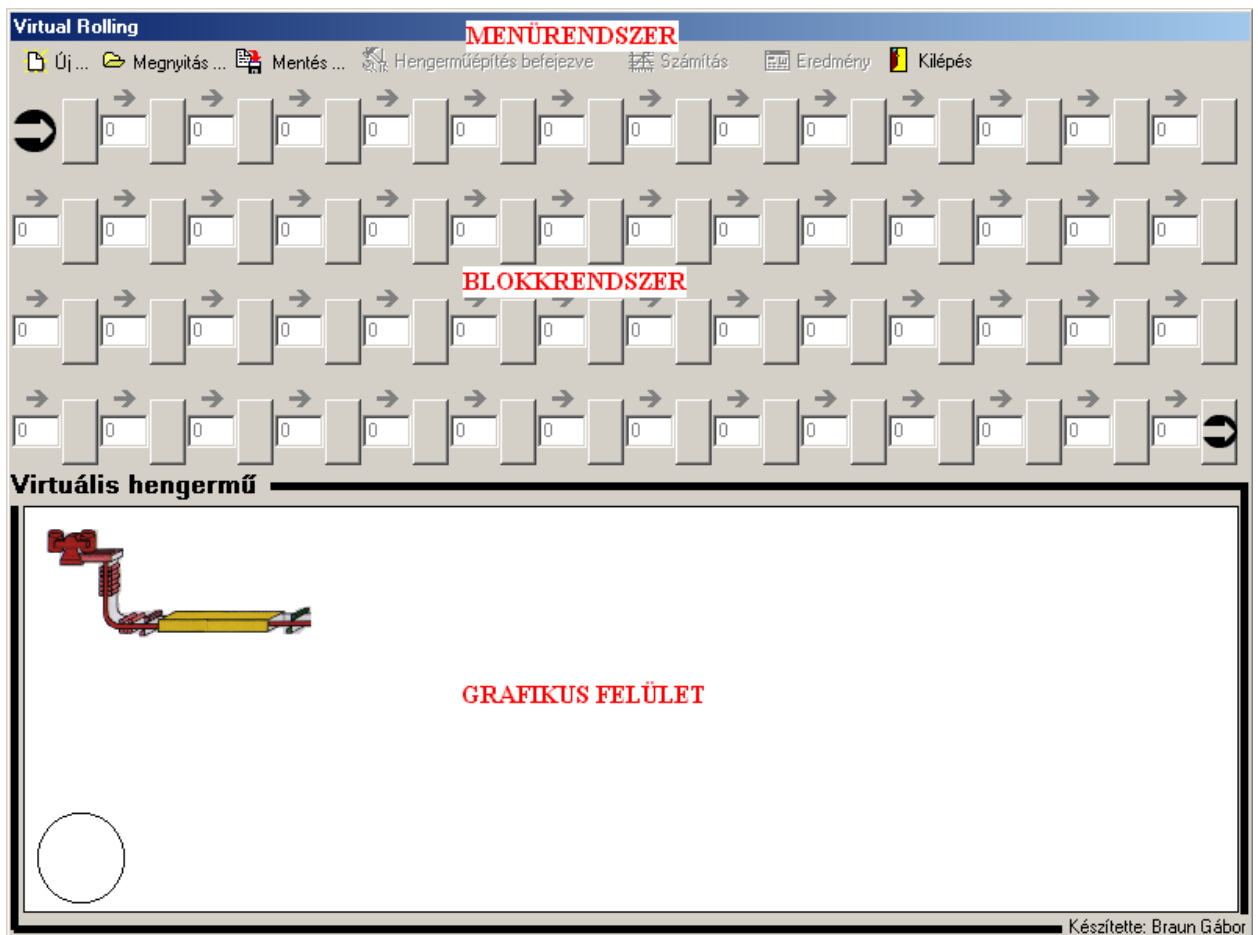
6.3. Acél szélesszalag termomechanikus hengerlésének optimalizációja

Ha figyelembe vesszük, hogy két kimenő hőmérséklet illetve sebesség érték között meg kívánjuk határozni az adott hengsors sebesség, erő, nyomaték, hőmérséklet értékeit, akkor nyilvánvalónak tűnik, hogy a többször iterált számításokhoz igénybe kell vennünk a számítógép és programozás technika által kínált lehetőségeket. Ennek szemléltetésére az alábbiakban a „Virtual HOTRolling Mill” nevű meleghengerléstechnológia modellező és optimalizáló programot kívánom bemutatni, amelyben tetszőleges gépészeti felépítésű meleghengerművet lehet létrehozni. A program csak acél széles szalag gyártástechnológiájának modellezésére alkalmazható!

6.3.1. A „Virtual HOTRolling Mill” optimalizáló program felépítése

A program indításnál egy hagyományos windows ablak (6.2. ábra) jelenik meg a képernyőn, amely tartalmazza a kezeléshez szükséges menürendszert, a virtuális meleghengermű összeállításához szükséges blokkrendszert és a virtuális meleghengermű vizuális megjelenítéséhez szükséges grafikus felületet.

A program használatát vagy új virtuális hengermű felépítésével vagy egy elmentett hengerműi telepítés megnyitásával kezdhetjük. Bármelyik lehetőséget is választjuk, először mindenképpen be kell állítanunk az „Alapadatokat”. E nélkül nem tudunk a „Blokkok” szerkesztésébe belekezdni.



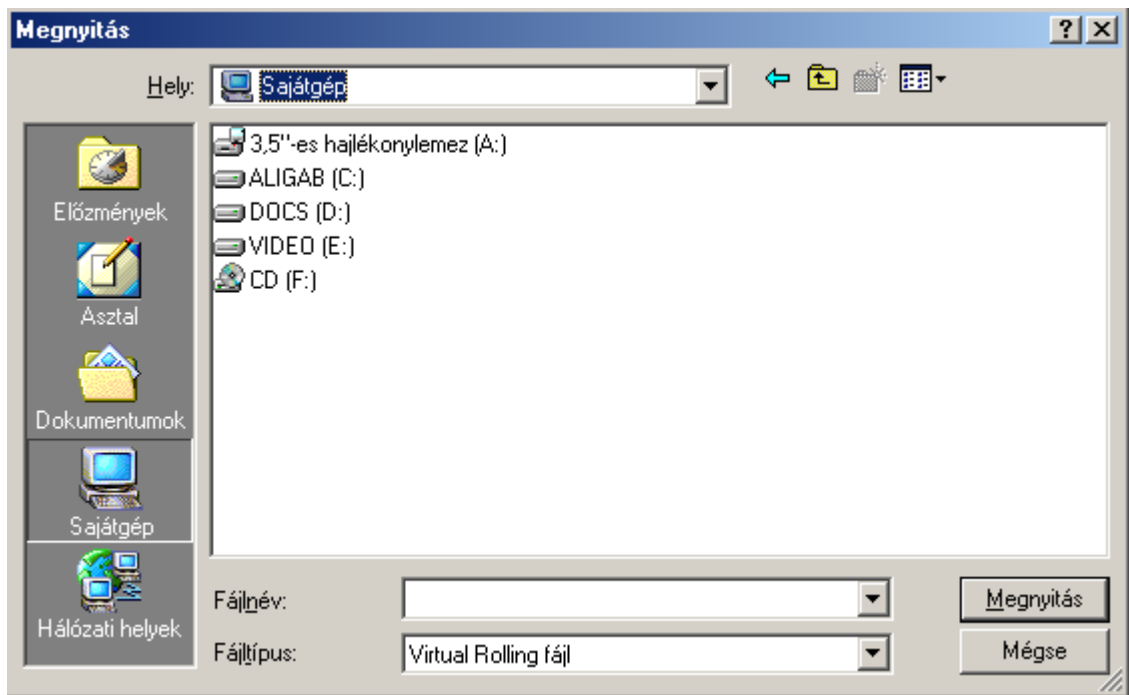
6.2. ábra

*A program kezelőfelületeoldal: 53
egy lehetséges összeállítás (telepítés) esetén*

6.3.1.1. A program menürendszere

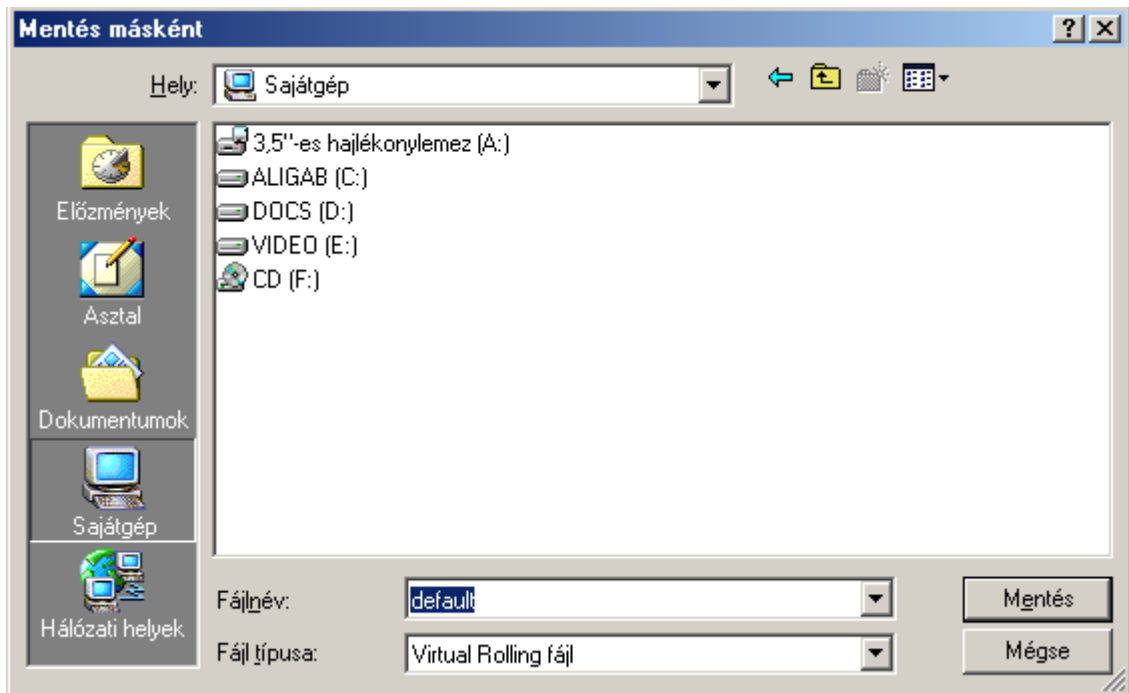
Új... : A menüpont használatával új virtuális meleghengerművet tudunk készíteni, a gomb megnyomására az összes beállított érték visszaáll eredeti állapotába.

Megnyitás... : A gomb megnyomására „Megnyitás” dialógusablak jelenik meg (6.3. ábra), melyből kiválasztható és betölthető az elmentett virtuális meleghengermű.



6.3. ábra
„Megnyitás” dialógus ablak

 **Mentés ...** : A gomb megnyomására „Mentés másként” dialógusablak (6.4 ábra) jelenik meg, amely használatával az összeszerkesztett virtuális meleghengermű elmenthető.



6.4 ábra
„Mentés másként” dialógus ablak



: A gomb megnyomásával a virtuális hengermű összeállításának befejezését jelzi a program felé és a grafikus képernyőn megjeleni az elkészült hengermű sematikus összeállítási rajza. Ezzel előkészül a program a számítások elvégzésére. Ha folytatni kívánja a hengermű szerkesztését, akkor az előző gomb helyén megjelenő



Hengerműépítés folytatás gombot kell megnyomni.



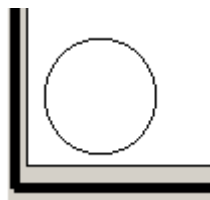
Számítás : A gomb megnyomásával megjeleni a „Számítás” dialógusablak (6.5.ábra). A számítások pillanatnyi állását az ablak bal alsó sarkában lévő kördiagramm (6.6. ábra) jelzi.

A képernyőképen a „Számítás” dialógusablak látható. Az ablak bal oldalán a „Számítási típusok” című csoportban hat radio gomb van: „Számolás”, „Számolás tartományban”, „Optimalizáció (1)”, „Optimalizáció (2)”, „Optimalizáció (3)”, „Optimalizáció (4)”, „Optimalizáció (5)” és „Optimalizáció (6)”. A „Számolás” gomb jelenleg kiválasztott. A jobb oldalon a kiválasztott típus leírása és a hozzá tartozó beállítások találhatók. A „Számolás” típusnál a „Számolás tartományban” opció van bejelölve, és a „T_opt” értéke 0 °C. Az „Optimalizáció(1)” leírása: „Kívánt csévéklési hőmérséklethez tartozó minimális hengerlési vég hőmérséklet”. Az „Optimalizáció(2)” leírása: „A felhasznált hűtővíz mennyiség minimalizálása”. Az „Optimalizáció(3)” leírása: „Maximális befutó vastagság meghatározása hőmérséklet-sebesség tartományban”. Az „Optimalizáció(4)” leírása: „Maximális befutó vastagság meghatározása”. Az „Optimalizáció(5)” leírása: „A hengerállványok egyenletes kiterhelése az erő és a nyomaték vonalán”. Az „Optimalizáció(6)” leírása: „Maximális befutó vastagság mellett a kívánt befutó hőmérséklettől való eltérés meghatározása hőmérséklet-sebesség tartományban”. Az ablak alján két gomb van: „Számítás” és „Mégsem”.

Számítási típusok	Számolás: Lefutó számítás
☒ Számolás	Számolás tartományban: Lefutó számítás megadott hőmérséklet-sebesség tartományban
☐ Számolás tartományban	Optimalizáció(1): Kívánt csévéklési hőmérséklethez tartozó minimális hengerlési vég hőmérséklet
☐ Optimalizáció (1)	T_opt: 0 °C
☐ Optimalizáció (2)	Optimalizáció(2): A felhasznált hűtővíz mennyiség minimalizálása
☐ Optimalizáció (3)	T_opt: 0 °C
☐ Optimalizáció (4)	Optimalizáció(3): Maximális befutó vastagság meghatározása hőmérséklet-sebesség tartományban
☐ Optimalizáció (5)	Optimalizáció(4): Maximális befutó vastagság meghatározása
☐ Optimalizáció (6)	Optimalizáció(5): A hengerállványok egyenletes kiterhelése az erő és a nyomaték vonalán
	Terhelési szint: 100 %
	Optimalizáció(6): Maximális befutó vastagság mellett a kívánt befutó hőmérséklettől való eltérés meghatározása hőmérséklet-sebesség tartományban
	T_opt: 0 °C

6.5. ábra

„Számítás” dialógusablak



6.6. ábra

Számolást jelző kördiagramm

A választható számítási típusok

Számítási típusok:

- *Számolás*: a számítást az összes hengerállvány és hűtőblokk működésével a gépészeti beállításokban megadott adatokkal végzi el a program,
- *Számolás tartományban* : a számítást az összes hengerállvány és hűtőblokk működésével a gépészeti beállításokban megadott adatokkal végzi el a program a kívánt hőmérséklet-sebesség tartományban,
- *Optimalizáció (1)*: Kívánt csévélési hőmérséklethez tartozó minimális hengerlési véghőmérséklet /T_opt: a minimális hengerlési véghőmérséklet °C-ban/ meghatározása,
- *Optimalizáció (2)*: A felhasznált hűtővíz mennyiség minimalizálása /T_opt: a kívánt hengerlési véghőmérséklet °C-ban/,
- *Optimalizáció (3)*: Maximális befutó vastagság meghatározása a megadott hőmérséklet-sebesség tartományban,
- *Optimalizáció (4)*: Maximális befutó vastagság meghatározása,
- *Optimalizáció (5)*: A hengerállványok egyenletes kiterhelése az erő és a nyomaték vonalán /Terhelési szint: A maximális terhelési szint adott mértékű kihasználása %-ban/,
- *Optimalizáció (6)*: Maximális befutó vastagság mellett a kívánt befutó hőmérséklettől való eltérés meghatározása a megadott hőmérséklet-sebesség tartományban /T_opt: a kívánt befutó hengerlési hőmérséklet °C-ban/.

A  Számítás gomb megnyomásával a program hozzáfér a dialógusablakban megadott beállítások alapján az értékek kiszámításához, a  Mégsem gomb benyomásával bármikor visszatérhetünk számítás nélkül a fő ablakhoz.

Amennyiben a program végzett a számításokkal, akkor a 6.6. ábra szerinti kördiagramm 100 %-ban fekete lesz és az  Eredmény gomb használata engedélyezett.

Eredmény : A gomb megnyomására a kiszámolt eredményeket tartalmazó dialogusablak (6.7. ábra) jelenik meg, ahol végigkövethetjük a táblázat használatával a kijött értékeket. A számolt paraméterek *.csv (Excel) formátumban lementhetők a Mentés ... gommbal, másrészt a teljes 4 dimenziós adatbázis elmenthető a Teljes adatbázis mentés ... gommbal. Grafikusan is megjeleníthetjük a tartományban számolt értékeket a Grafikus megjelenítés gommbal.

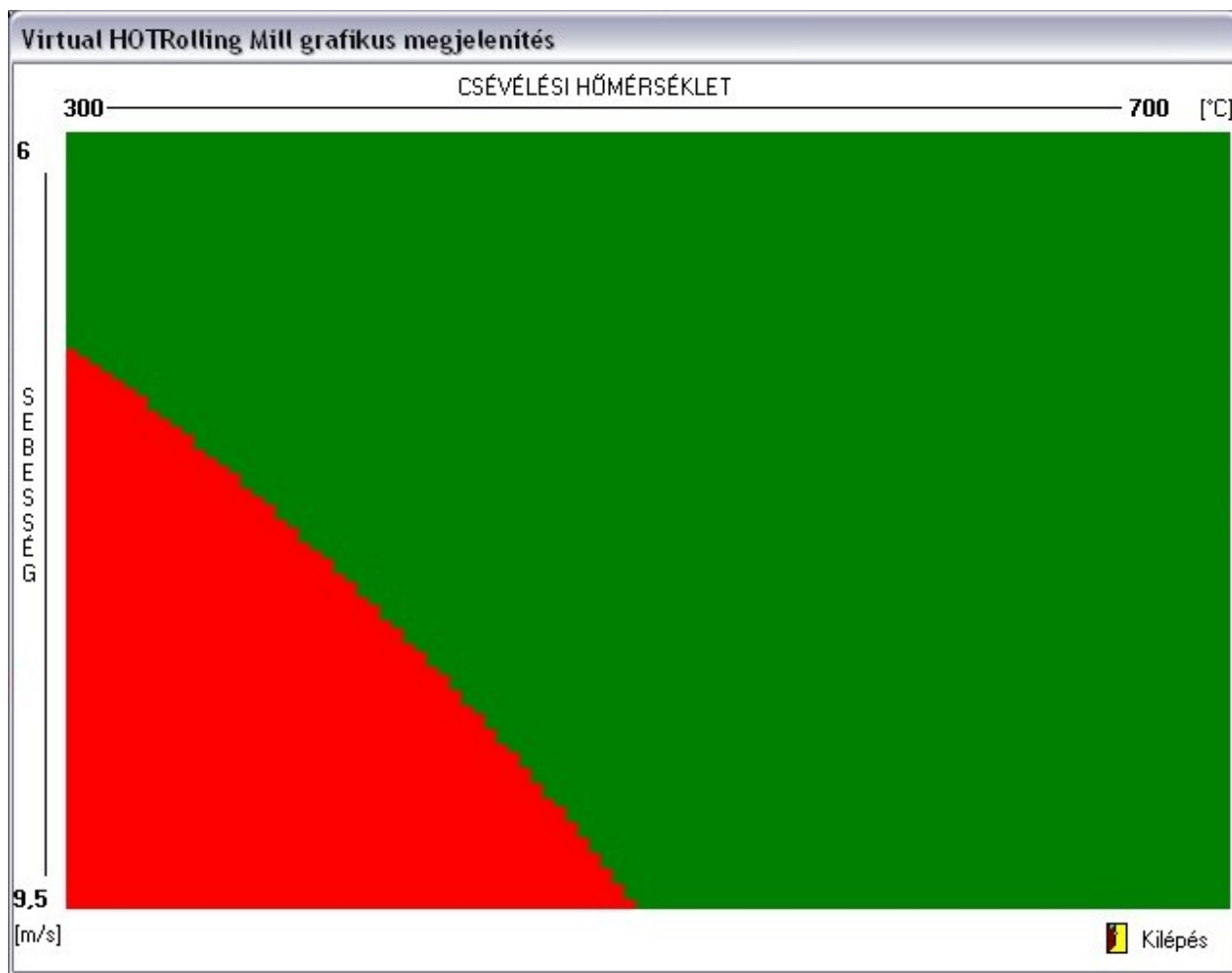
Virtual HOT Rolling Mill - Eredmény														
v[m/s]\T[°C]	800	802	804	806	808	810	812	814	816	818	820	822	824	826
7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.03	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.06	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.09	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.21	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.24	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.27	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.33	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

6.7. ábra

„Eredmény” dialogusablak

A 6.7. ábrán látható táblázatban a bemeneti [hőmérséklet – sebesség] minimum és maximum értékek közötti különbséget a program 100 egyenlő részre osztja és az osztás szerint lépteti a számolási értékeket. Jelen esetben a legkisebb hengerlési vég hőmérséklet 800 °C, ennek léptetése +2 °C. A kívánt legkisebb hengerlési végsebesség 7,0 m/s, ennek léptetése +0,03 m/s.

A 6.8. ábrán a program által kiszámolt és az optimalizáció típusától függő végeredmény jelenik meg grafikus formában.



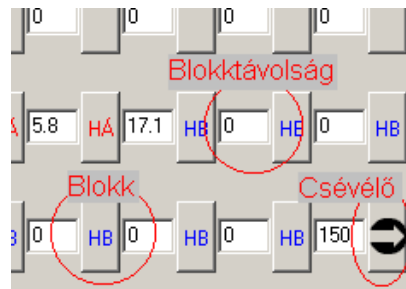
6.8. ábra
„Grafikus megjelenítés” dialógusablak



: A program használatának befejezése.

6.3.1.2. A számítási blokkrendszer használata

A blokkrendszer (6.9. ábra) felhasználásával tetszőleges virtuális meleg hengerművet tudunk felépíteni. Ha megnyomjuk az „☺” gombot, akkor az „Alapadatok” dialógusablak (6.10. ábrán), ha a „Blokk” gombot, akkor a „Blokk” dialógusablak (6.11. ábra) jelenik meg. A „Blokktávolság” mezőbe a két blokk közötti távolságot tudjuk megadni méterben. A blokkok lehetnek értelemszerűen vagy hengerállványok, vagy hűtőegységek.



6.9. ábra

„Eredmények” dialógusablak

Alapadatok	
ANYAGJELLEMZŐK	
Anyagtípus neve: St24	
k_{f0} , N/mm ²	94,5
A1	12,231
m1	0,00250
A2	1,494
m2	0,174
A3	0,726
m3	0,305
ρ kg/m ³	7800
c kJ/kg°C	0,84
C_s kJ/m ² h°C	8,521
SZÁMOLÁSI ALAPÉRTÉKEK	
$h_{\text{vég}}$, mm	2
$b_{\text{vég}}$, mm	1100
$v_{\text{vég_min}}$, m/s	7,3
$v_{\text{vég_max}}$, m/s	10
$T_{\text{vég_min}}$, °C	363
$T_{\text{vég_max}}$, °C	800
$T_{\text{köny}}$, °C	20
Kilépés	

6.10. ábra

„Alapadatok” dialógusablak

Blokk		Blokk	
Típus: Hengerállvány		Típus: Hűtőblokk	
Hengerállvány	Hűtőblokk	Hengerállvány	Hűtőblokk
d_h , mm	0,6	d_h , mm	
D_{heng} , mm	640	D_{heng} , mm	
v_{min} , m/s	3,18	v_{min} , m/s	
v_{max} , m/s	10,32	v_{max} , m/s	
T_{heng} , °C	300	T_{heng} , °C	
F_{max} , kN	11000	F_{max} , kN	
M_{mech} , kNm	690	M_{mech} , kNm	
$\delta_{\text{köz}}$, N/mm ²	0	$\delta_{\text{köz}}$, N/mm ²	
ξ	0,01	ξ	
u_{heng} , kJ/m ² h°C	21000	u_{heng} , kJ/m ² h°C	
F : A arány %		F : A arány %	
Kilépés		Kilépés	

6.11. ábra

„Blokk” dialógusablak

Az előző dialógusablakokban az alábbi paramétereket tudjuk beállítani, melyek a virtuális meleghengermű működéséhez elengedhetetlenül szükségesek:

„Alapadatok” dialógus ablak

$h_{\text{vég}}, \text{ m} :$	tekercselt szalag vastagsága
$b_{\text{vég}}, \text{ m} :$	tekercselt szalag szélessége
$v_{\text{végmin}}, \text{ m/s} :$	szalagtekercselés minimális sebessége
$v_{\text{végmax}}, \text{ m/s} :$	szalagtekercselés maximális sebessége
$T_{\text{végmin}}, ^\circ\text{C} :$	szalagtekercselés minimális hőmérséklete
$T_{\text{végmax}}, ^\circ\text{C} :$	szalagtekercselés maximális hőmérséklete
$T_{\text{körny}}, ^\circ\text{C} :$	környezeti hőmérséklet
Anyagtípus neve :	Hengerelt szalag anyagminősége
$k_{f0}, \text{ N/mm}^2 :$	A $T=1000\text{ }^\circ\text{C}$, a $\varphi=0,1$ és $\dot{\varphi}=10\text{ s}^{-1}$ értékhez tartozó alakítási szilárdság
$A_1 :$	Alakítási szilárdság tényező
$m_1 :$	Alakítási szilárdság tényező
$A_2 :$	Alakítási szilárdság tényező
$m_2 :$	Alakítási szilárdság tényező
$A_3 :$	Alakítási szilárdság tényező
$m_3 :$	Alakítási szilárdság tényező
$\rho, \text{ kg/m}^3 :$	Sűrűség
$c, \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} :$	Fajhő
$C_s, \text{ kJ/m}^2^\circ\text{C} :$	Felületi sugárzási szám

„Blok” dialógus ablak

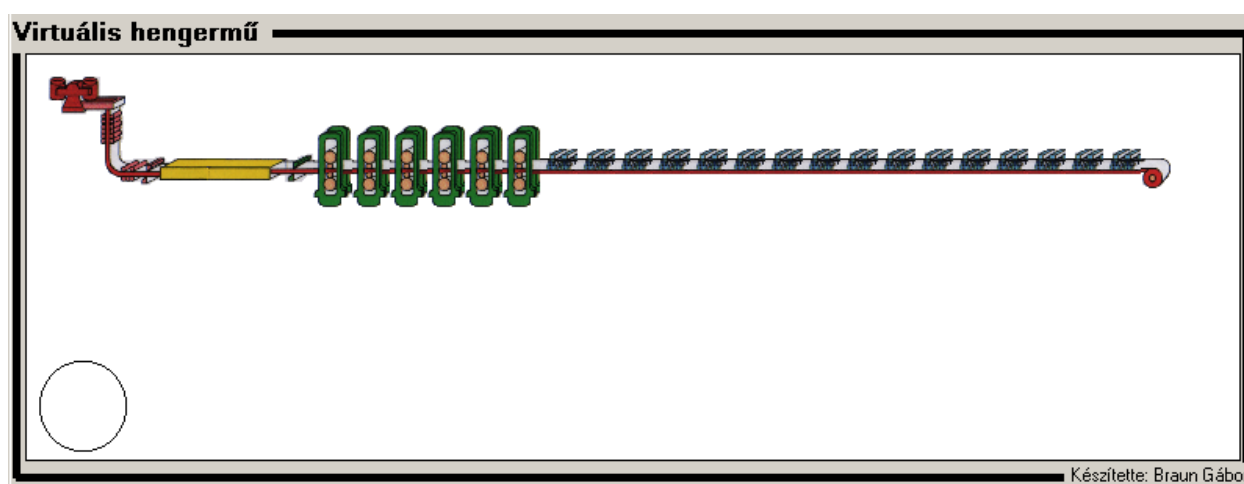
Típus :	Blokk típusa – „Hengerállvány” – „Hűtőblokk”
$\Delta h, \text{ m} :$	Magasságcsökkenés
$D_{\text{heng}}, \text{ m} :$	Munkahengerek átmérője
$v_{\text{min}}, \text{ m/s} :$	Gépészeti minimális munkahenger sebesség
$v_{\text{max}}, \text{ m/s} :$	Gépészeti maximális munkahenger sebesség
$T_{\text{heng}}, ^\circ\text{C} :$	Munkahenger hőmérséklete
$F_{\text{max}}, \text{ kN} :$	Maximális hengerlési erő

M_{mech} , kNm :	Maximális mechanikai nyomaték
$\sigma_{\text{köz}}$:	Közepes húzófeszültség
ξ :	Keletkezett súrlódási hőmennyiségek hengerekbe áramló hányada
u_{heng} :	A hengerelt darab és a munkahengerek közötti hőátadási tényező

Típus :	A hűtés típusa – laminális vagy permetező
P_L , m :	Két csősor közötti távolság
P_C , m :	Két szomszédos cső közötti távolság
$D_{\text{cső}}$, m :	A cső belső átmérője
ν , mm ² /s :	Kinematikai viszkozitás
V_{max} , m ³ /h :	Maximális óránkénti vízmennyiség
l_i , m :	Vízhűtőszakasz előtti léghűtés hossza
T_v , °C :	Hűtővíz hőmérséklete
n , db :	Hűtőcsősorok száma
F arány, % :	Felső hűtőblokkra jutó vízmennyiség
A arány, % :	Alsó hűtőblokkra jutó vízmennyiség

6.3.1.3. A grafikus felület használata

A „grafikus felületet” vizuális tájékoztatást ad a megtervezett virtuális hengermű (6.12. ábra) az életben elképzelhető felépítéséről.



6.12. ábra
„Grafikus felület”

A  Hengerműépítés befejezve gomb megnyomásával a képernyőn megjeleni a hengermű axonometrikus összeállítási rajza. Jelentősége abban rejlik, hogy a tervező lássa, miként épül fel a valóságban egy hengermű.

[35]

6.3.2. Az acél széles szalag gyártástechnológiájának számítógépes optimalizációja

A következő alfejezetben a „Virtual HOTRolling Mill” program tényleges használatára és ellenőrzésére kívánok példát bemutatni modellezve a DUNAFERR Dunai Vasmű meleghengerműjét a kiválasztott St24 anyagminősítésre (vastagság: 2 mm, szélesség: 1009 mm).

6.3.2.1. A „Virtual HOTRolling Mill” program számítási eredményeinek ellenőrzése

Ahhoz, hogy az elkészített programot megfelelő biztonsággal optimalizáláshoz felhasználhassuk, előbb ellenőrizni kell a működésének pontosságát és megfelelőségét. Ezt legkönnyebben a valós mérési eredményekkel való összehasonlítással tehetjük meg. Például számítógéppel modellezhetünk egy adott meleghengerművet és a kapott számított értékeket összevethetjük a mért értékekkel. Az eltérések figyelembevételével megállapíthatjuk, hogy a modell megfelelő pontossággal működik-e. A modell ellenőrzését két részre bontottam, először a hűtési technológia modell, majd a hengerlés technológia modell megvalósíthatóságát illetve használhatóságát mutatom be.

Hűtéstechnológia modell:

A hűtéstechnológiai modell ellenőrzéséhez nem sikerült saját mérési eredményeket beszerezni, így az ellenőrzéshez a Miskolci Egyetem Fémtechnológiai Tanszékének e tárgyban készített kutatási tevékenységéből származó mérési adatait használtam fel.[3] A hűtősor alapbeállításai az alábbiak:

Szalag sebessége: **9,5 m/s,**

Szalag csévélési hőmérséklete: **338 °C,**

Szalag vastagsága: **2 mm**

Szalag anyagminősége: **RSt 52**

Az általam számolt és a tanszék által mért adatokat a 6.1. táblázat tartalmazza.

6.1. táblázat

A hűtési adatbázisból származó és a programmal számított adatok összehasonlítása

Megnevezés	Mérési adatok			Számolt értékek		
	T _{be} , °C	T _{ki} , °C	dT, °C	T _{be} , °C	T _{ki} , °C	dT, °C
Kimenet	338,7	0,0		338,0	0,0	
Levegő	349,4	338,7	10,7	345,5	338,0	7,5
Hűtőblokk	360,9	349,4	11,5	357,9	345,5	12,4
Hűtőblokk	372,4	360,9	11,5	370,2	357,9	12,3
Hűtőblokk	401,8	372,4	29,4	401,8	370,2	31,6
Hűtőblokk	431,2	401,8	29,4	433,4	401,8	31,6
Hűtőblokk	512,6	431,2	81,4	488,4	433,4	55,0
Levegő	542,0	512,6	29,4	489,0	488,4	0,6
Hűtőblokk	571,4	542,0	29,4	520,6	489,0	31,6
Hűtőblokk	600,8	571,4	29,4	552,1	520,6	31,6
Hűtőblokk	630,2	600,8	29,4	583,7	552,1	31,6
Hűtőblokk	659,6	630,2	29,4	615,3	583,7	31,6
Hűtőblokk	689,0	659,6	29,4	646,9	615,3	31,6
Hűtőblokk	718,5	689,0	29,5	678,5	646,9	31,6
Hűtőblokk	747,9	718,5	29,4	710,1	678,5	31,6
Hűtőblokk	777,3	747,9	29,4	741,6	710,1	31,6
Hűtőblokk	806,7	777,3	29,4	773,2	741,6	31,6
Hűtőblokk	818,2	806,7	11,5	785,6	773,2	12,4
Hűtőblokk	829,7	818,2	11,5	807,1	785,6	21,5
Levegő	852,0	829,7	22,3	816,1	807,1	9,0
Bemenet	0,0	852,0		0,0	816,1	

A táblázatból kiderül, hogy a mért és számolt értékek egymástól való eltérése -4,3%, tehát belesik a kívánt ±10 %-os hibasávba.

Hengerlés technológia modell:

A program ellenőrzéséhez az 5. fejezetben részletezett okok miatt az St24 anyagminőségű acélszalag adatai választottam. Az üzemi mérésekkel való összehasonlításnál nagy figyelmet kell fordítanunk arra, hogy a mért érték elképzelhető-e a valóságban. A mért részméreteket, mivel a hengerállványok működésük során rugalmas alakváltozást szenvednek, az alábbi képlet segítségével átalakítottam:

$$h_i = h_{0i} + \frac{F_i - F_0}{C_{Ai}}, \quad [\text{mm}] \quad 6.2.$$

ahol h_{0i} a kormánypadon beállított rés értéke

F_i az adott állványban mért erő [kN]

F_0 a hengerrés nullázáshoz alkalmazott előfeszítő erő [kN]

C_{Ai} az adott állvány rugóállandója [kN/mm]

A hengerállványok rugóállandóit a 6.2. táblázat mutatja.

6.2. táblázat

	C_{Aib} [kN/mm]	F_0 [kN]
I. hengerállvány	4256	4500
II. hengerállvány	4242	4500
III. hengerállvány	4683	4500
IV. hengerállvány	4216	5000
V. hengerállvány	4387	5000
VI. hengerállvány	4583	5000

A tényleges résméreték kiszámolása után meghatároztam a hengerállványonkénti magasságcsökkenéseket, majd állványonként átlagoltam az adatokat. A kapott értékekkel modelleztem a meleghengerművet. A beállított értékeket a 6.3. táblázat, a kapott eredményeket pedig a 6.4. táblázat foglalja össze.

6.3. táblázat

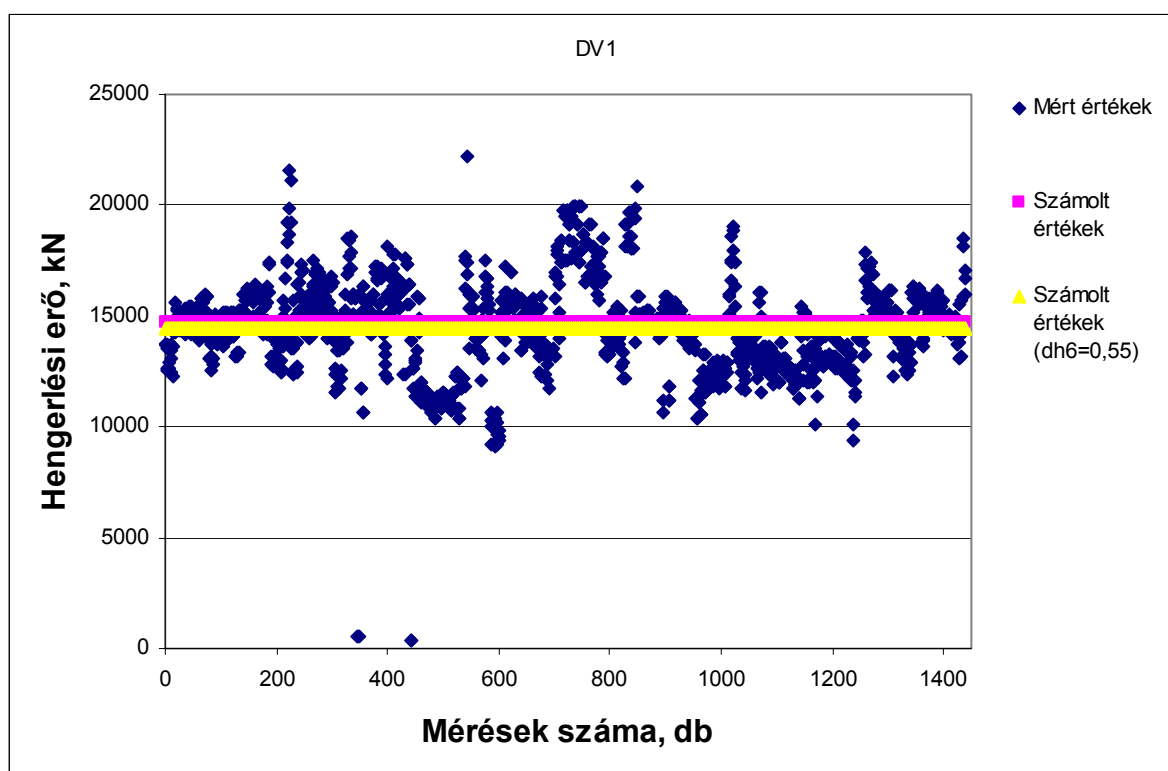
Anyagminőség	St24	
	Mért	Beállított
Vastagság [mm]	1,49	1,49
Szélesség [mm]	1009	1009
T_6 [°C]	833	833
v_6 [m/s]	7,62	7,62

6.4. táblázat

Henger- állvány	Mért értékek		Számolt értékek		Számolt értékek ($\Delta h_6=0,55$)	
	Magasság- csökkenés [mm]	Hengerlési erő [kN]	Hengerlési erő [kN]	Mért értéktől való eltérés [%]	Hengerlési erő [kN]	Mért értéktől való eltérés [%]
I.	14,41	14447	14734	1	14436	1
II.	5,81	12896	11387	12	11447	12
III.	2,90	12885	10343	20	10806	17
IV.	1,36	11028	8091	27	8840	20
V.	0,90	10268	8043	22	9275	10
VI.	1,10	7330	14469	97	7914	7

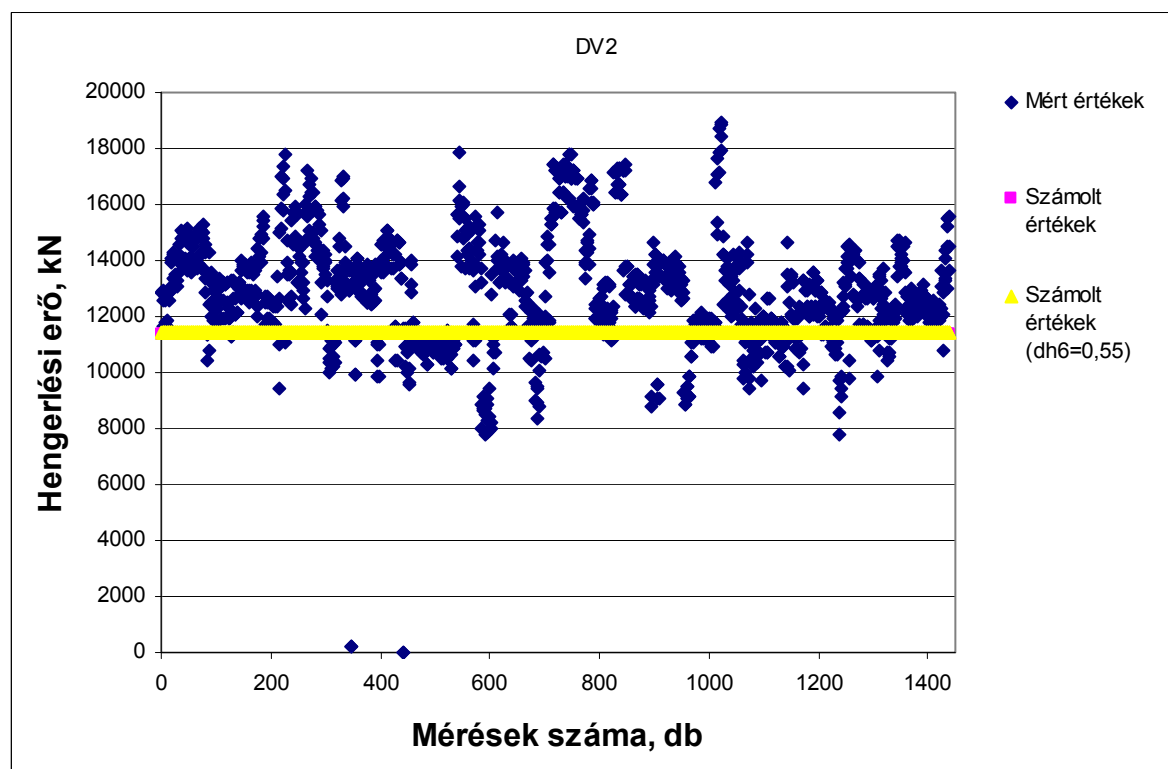
A 6.3. táblázatból kitűnik, hogy a megadott 2 mm-es szalag vastagsággal szemben a mért átlagos vastagság 1,49 mm, viszont 0,51 mm vastagságbeli átlagos eltérés elfogadhatatlan a gyártás folyamán. A 6.4 táblázatból kiderül, hogy a hatodik állvány hengerrés értékében mérési hiba van, mivel a mért résmérethez tartozó számolt hengerlési erő duplája a mért hengerlési erőnek. Ha a hatodik állványban létrejövő magasságcsökkenést 0,55 mm-re (vagyis a mért felére) csökkentjük, akkor 2 mm közelében lesz a kifutó tényleges vastagság, vagyis a számolt és mért értékek eltérései elfogadható mértékre csökkennek. A változtatás után a kiszámolt értékekből látszik, hogy az eltérés nagysága az 5. fejezetben meghatározott és elfogadható küszöbértéken belül található. A 6.13.-6.18. ábrákon a mért és a számolt hengerlési erők viszonyát mutatom be. A 6.1., 6.3. illetve 6.4. táblázat adatait áttanulmányozva levonható az a következtethetés, hogy **az**

általam készített „Virtual HOTRolling Mill” program használatával jó közelítéssel modellezhető egy adott kialakítású meleghengermű. [11][12]



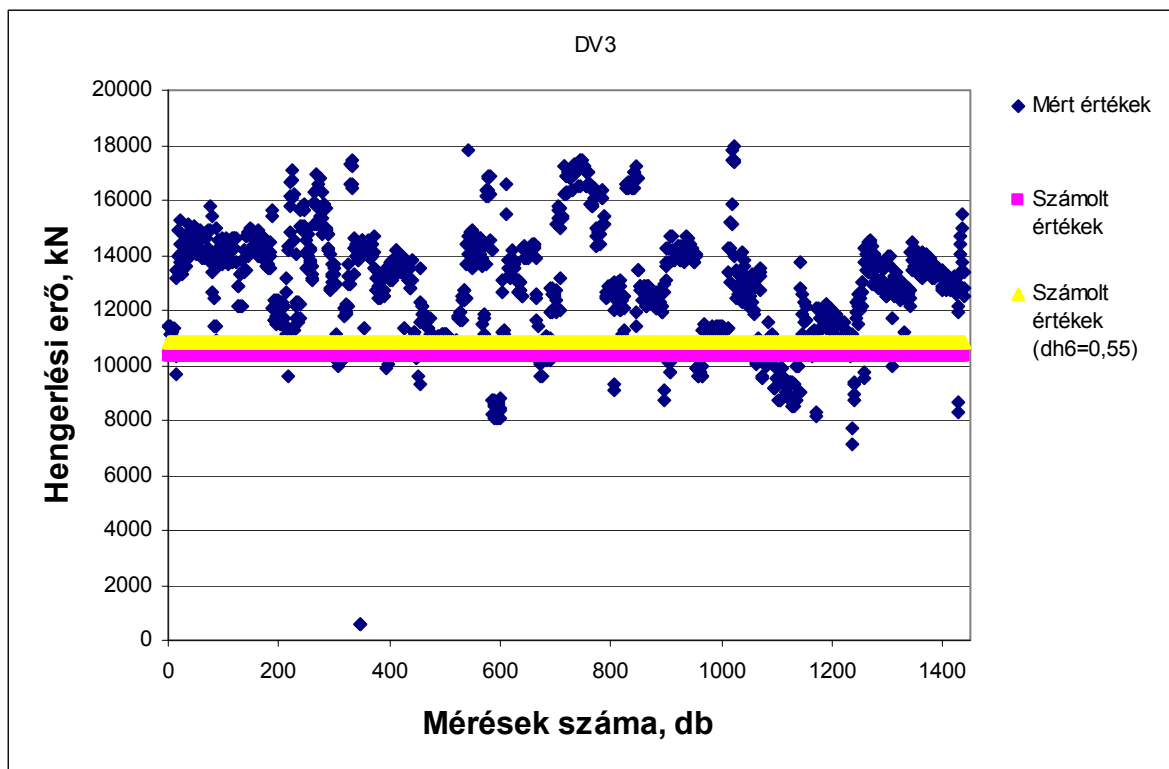
6.13. ábra

Az I. hengerállványnál mért illetve számolt hengerlési erők összehasonlítása



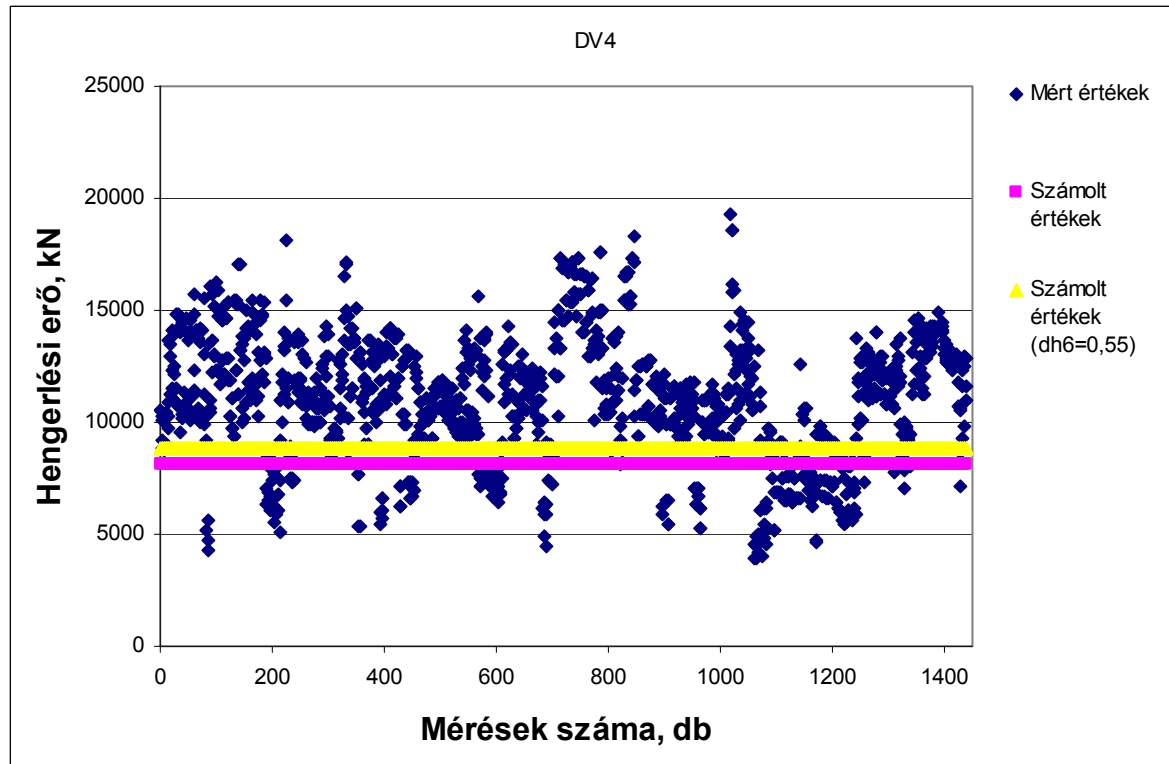
6.14. ábra

Az II. hengerállványnál mért illetve számolt hengerlési erők összehasonlítása



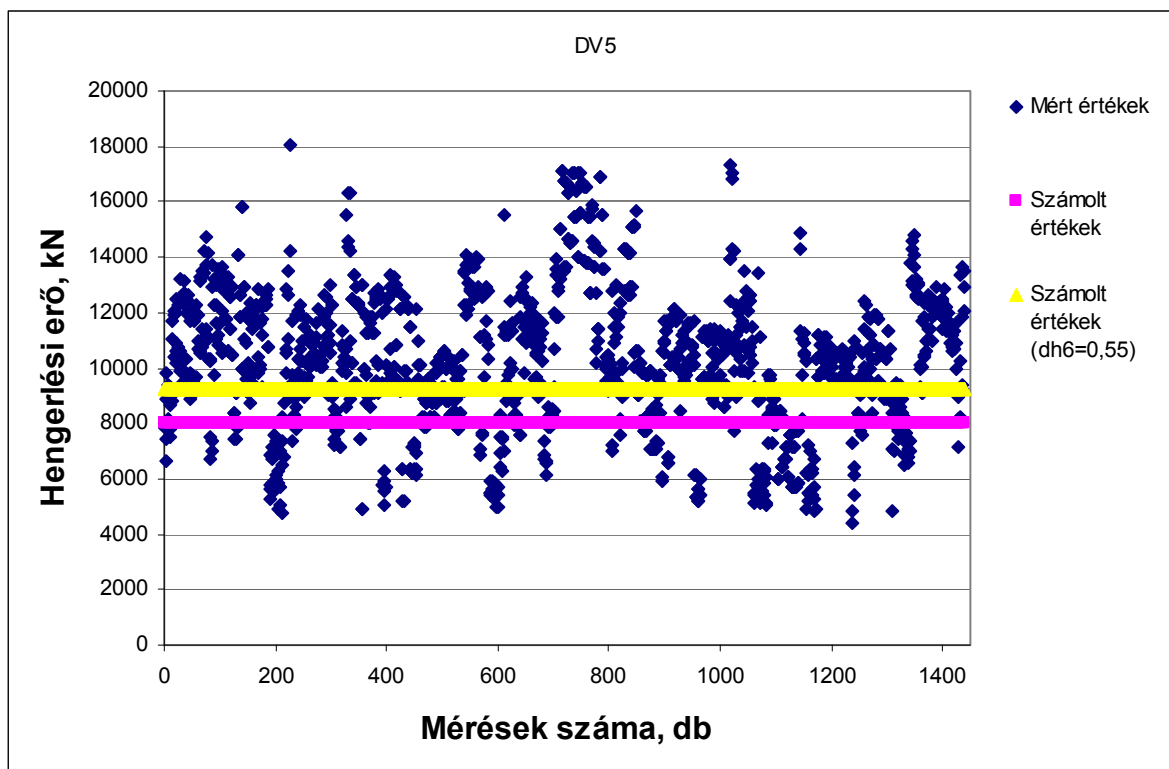
6.15. ábra

Az III. hengerállványnál mért illetve számolt hengerlési erők összehasonlítása



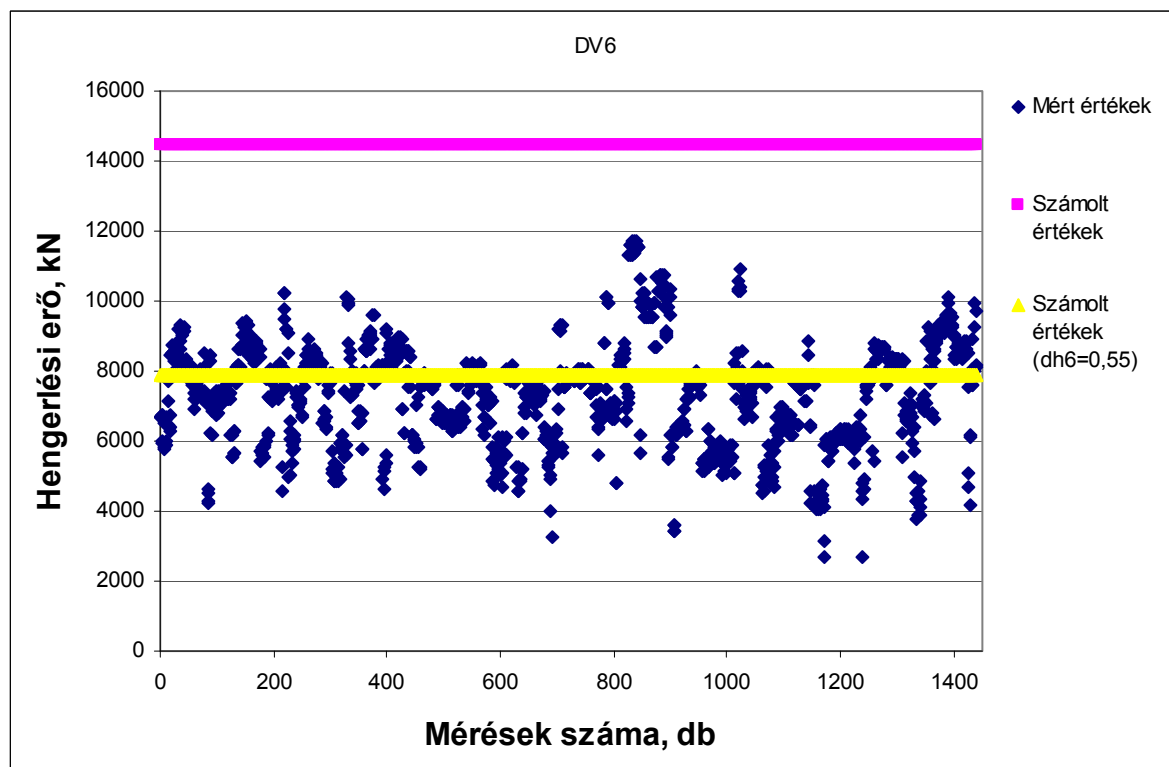
6.16. ábra

Az IV. hengerállványnál mért illetve számolt hengerlési erők összehasonlítása



6.17. ábra

Az V. hengerállványnál mért illetve számolt hengerlési erők összehasonlítása



6.18. ábra

Az VI. hengerállványnál mért illetve számolt hengerlési erők összehasonlítása

6.3.2.2. Gyártástechnológia optimalizálás

Az alábbi alfejezetben a program használatának néhány lehetőségét kívánom bemutatni az alábbi optimalizálási lehetőségek kiválasztásával, amelyek:

- A kívánt csévélési hőmérséklethez tartozó minimális hengerlési véghőmérsékletek meghatározása,
- A felhasznált hűtővíz mennyiségének minimalizálása,
- Kívánt izzítási- illetve vékonybramma kiindulási- hőmérséklet meghatározása,
- Maximális befutó vastagság meghatározása,
- A hengerállványok egyenletes kiterhelése az erő és a nyomaték vonalán,
- A maximális óraterjesztmény kihasználása,
- Minimális fajlagos energiafelhasználás meghatározása,
- Minimális fajlagos energiaköltség meghatározása.

A számolási tartomány értékei a virtuális hengermű optimalizációjánál az alábbiak voltak:

- Anyagminőség: **St24**
- Szalagvastagság: **2 mm**
- Szalag szélesség: **1009 mm**
- Környezeti hőmérséklet: **20 °C**
- Csévélési hőmérséklet minimum: **300 °C**
- Csévélési hőmérséklet maximuma: **700 °C**
- Végsebesség minimum: **5,8 m/s**
- Végsebesség maximum: **9,5 m/s**
- Szűrásterv:

Állvány	Magasságcsökkenés [mm]	Kifutó vastagság [mm]
I.	14,41	13,51
II.	5,80	7,71
III.	2,90	4,81
IV.	1,36	3,45
V.	0,90	2,55
VI.	0,55	2,00

A kívánt csévélési hőmérséklethez tartozó minimális hengerlési véghőmérsékletek meghatározása

Az optimalizációt adott hűtősoron vizsgálhatjuk. A célnak megjelölt minimális hengerlési véghőmérsékleten jelen esetben az A_{r3} hőmérsékletéhez közeli értéket tekintjük. Az optimalizáció futtatásánál T_{opt} hőmérsékletnek 850 °C állítottam be. Az optimalizáció végeredménye, hogy adott csévélési hőmérséklet-sebesség tartomány pontjaihoz a számítógépes program kiszámolja maximális hűtővíz felhasználás mellett az utolsó állvány után kifutó szalag hőmérsékletének eltérését az optimális kifutó hőmérséklettől ($T_{opt} - T_{ki}$). Az eredmény a 6.19. ábrán látható.



6.19. ábra

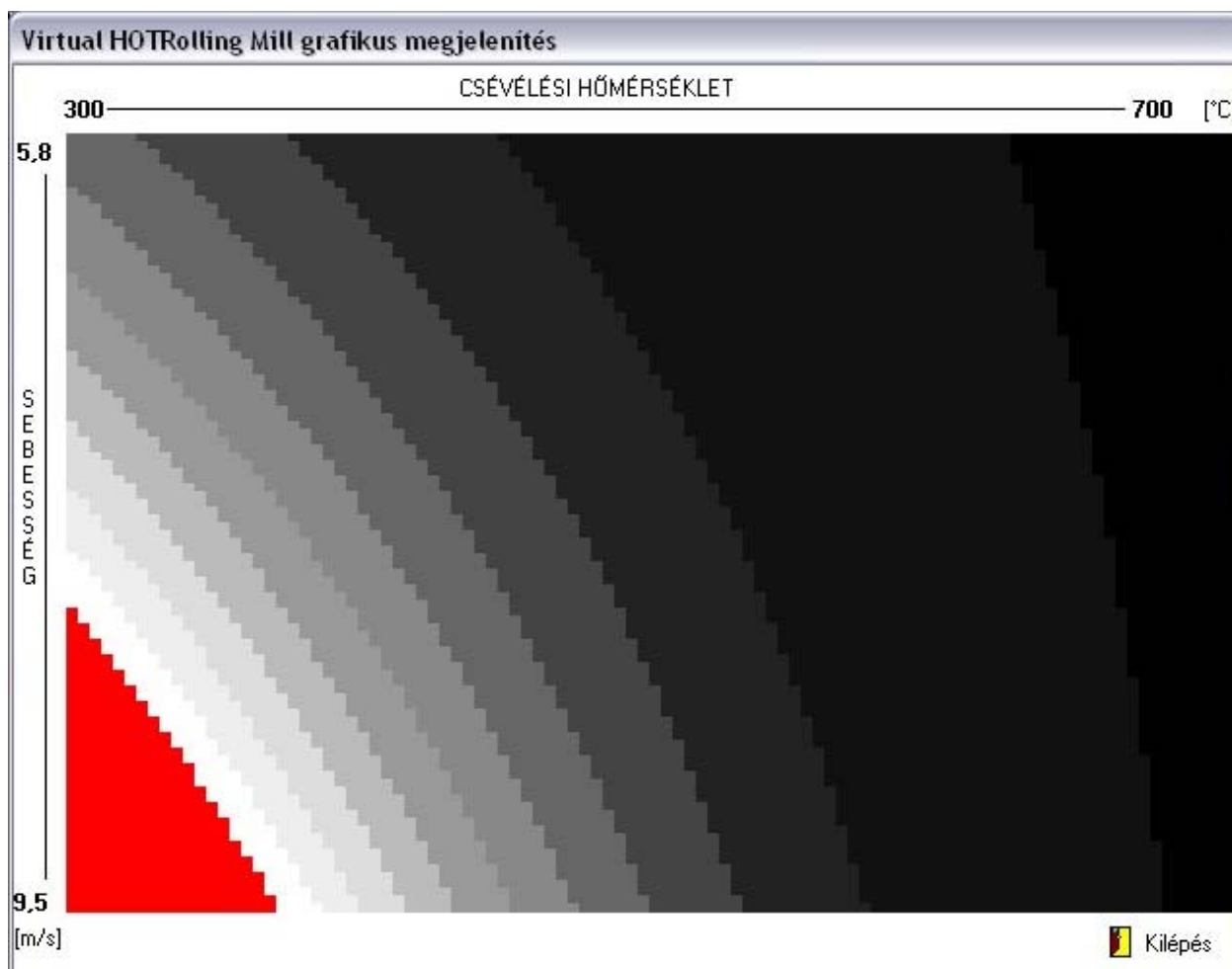
Az ábrán a színek az alábbi hőmérséklet eltérés értékeket jelentenek:

Eltérés érték [°C]	Jelölő szín
50<	Piros
11 << 49	Rózsaszín
-10 – 10	Zöld
-49 >> -11	Világos kék
-50>	Sötét kék

Az 6.19. ábrán az optimális értékek a zöld sávban találhatóak, ahol a hengerlési véghőmérséklet 840-860 °C között van.

A felhasznált hűtővíz mennyiségének minimalizálása

Az optimalizációt adott hűtősoron vizsgálhatjuk. A cél, hogy meghatározzuk azt a minimális vízmennyiséget egy csévélési hőmérséklet-sebesség tartomány pontjaiban, amely elegendő ahhoz, hogy az acél szalag a kívánt és megadott (T_{opt}) hengerlési véghőmérsékletről a csévézési hőmérsékletre hűljön. Az optimalizáció futtatásánál T_{opt} hőmérsékletnek 850 °C állítottam be. Az eredmény a 6.20. ábrán látható.



6.20. ábra

Az ábrán a piros színnel jelölt részben a szalag maximális hűtővízmennyiséggel sem hűthető le a csévélési hőmérsékletre, fehér színtől a feketéig a 100% felhasznált hűtővízmennyiségtől a 0% hűtővízmennyiségig terjedő sávok a szürkességi foktól függők.

Kívánt izzítási- illetve vékonybramma kiindulási- hőmérséklet meghatározása

Az optimalizációt adott kialakítású hengersorra vonatkozóan vizsgálhatjuk. A cél, a kívánt hengersor bemeneti hőmérsékletének meghatározása, amely jelen esetben a minimális bemeneti hőmérséklet. A program meghatározza, hogy adott hőmérséklet-sebesség tartományban hol vannak azok a pontok, ahol az adott hengerléstechnológia kivitelezhető a hengerállványok maradó károsodása illetve túlterhelése nélkül. A minimális izzítási- illetve vékonybramma kiindulási- hőmérsékletet ott találjuk, ahol minimális az utolsó állvány utáni kimenő hőmérséklet. Az eredmény a 6.21. ábrán látható.



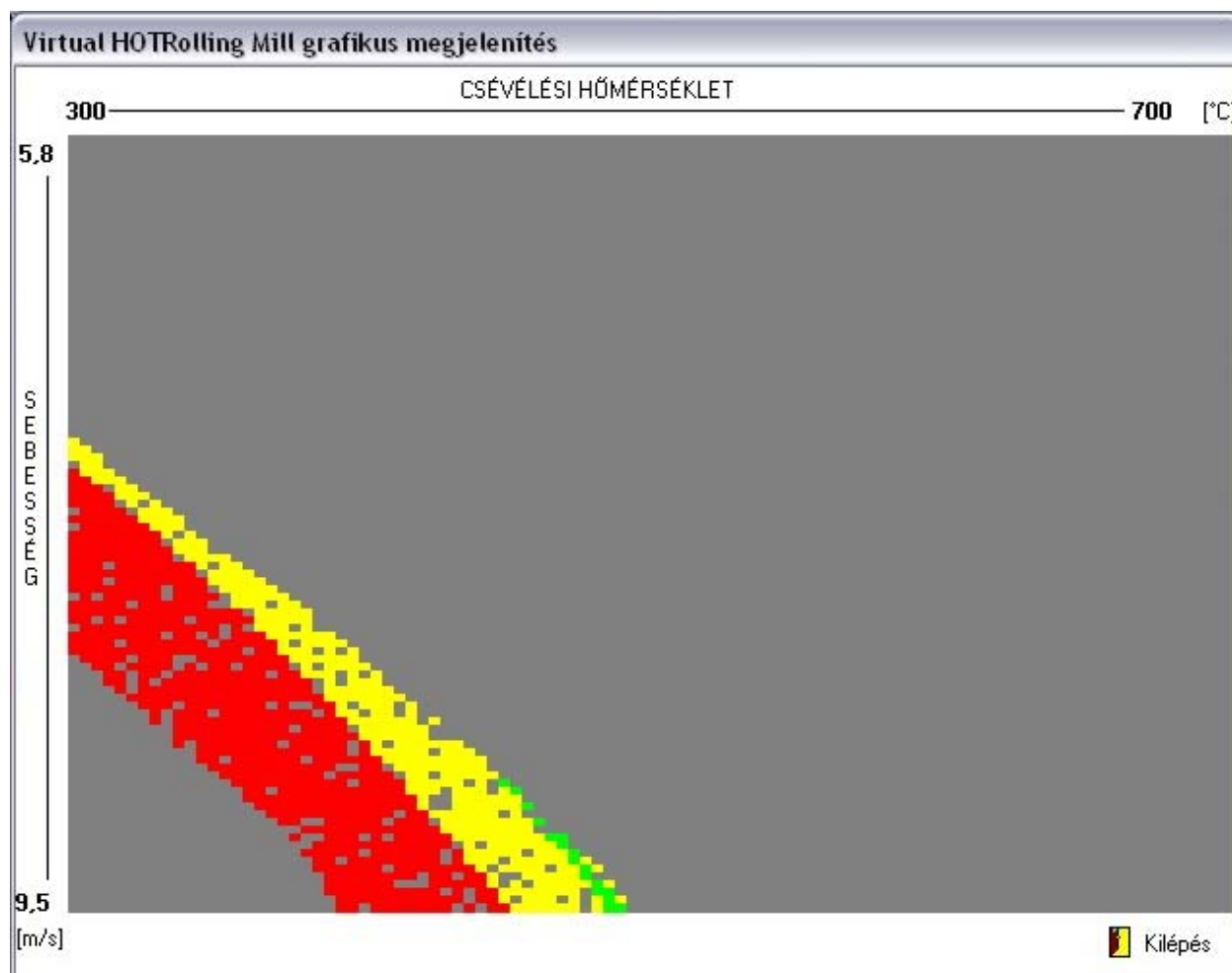
6.21. ábra

Az adott hengerléstechnológia a zöld tartományban igen, a piros tartományban nem kivitelezhető. Ennek oka, hogy a program a hengerléstechnológia megvalósíthatóságának vizsgálatánál minden egyes kiinduló csévélési hőmérséklet-sebesség értékkel való számításnál

figyelembe veszi a virtuális hengermű gépészeti és mechanikai korlátait. A technológiák kivitelezhetőségének határát egyrészt a befogási és folytonossági feltétel (egyenes határvonal), másrészt az ébredő maximális erő és nyomaték (görbe határvonal) határozza meg.

Maximális befutó vastagság meghatározása

Az optimalizációt adott kialakítású hengersorra vonatkozóan vizsgálhatjuk. A cél, hogy meghatározzuk a maximális hengerlési erő illetve nyomaték figyelembevételével a maximális bemenő vastagságot. Az eredmény a 6.22. ábrán látható.



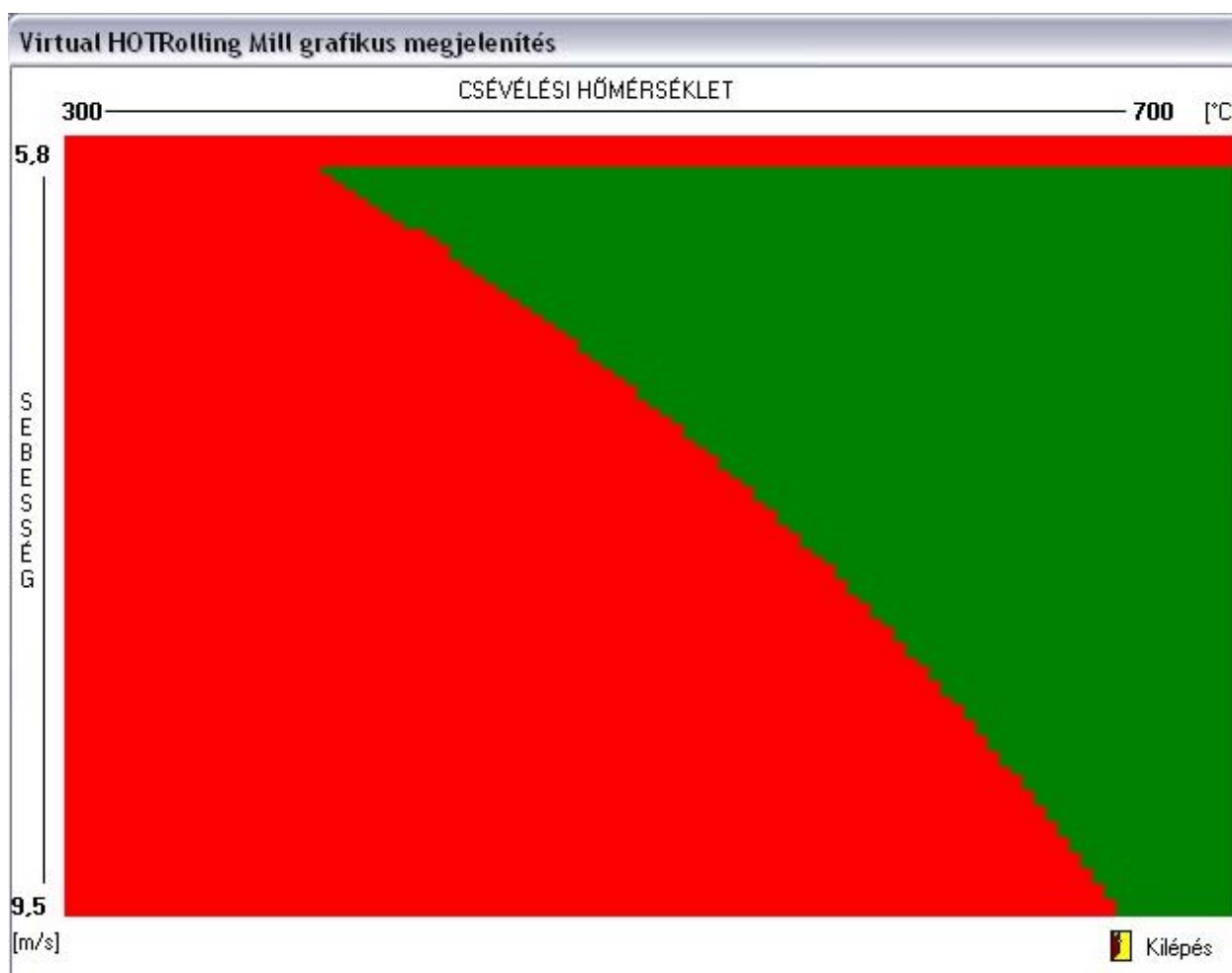
6.22. ábra

Maximális vastagság [mm]	Jelölő szín
(Gépészeti okokból kivitelezhetetlen)	Szürke
-28	Piros
29-39	Sárga
40-50	Világos zöld
51-	Sötét zöld

Az 6.22. ábrán látszik, hogy nincs sötét zöld szín. Ez azt jelenti, hogy az adott beállításokkal csak 50 mm-nél kisebb maximális bemenő vastagság lehetséges.

A hengerállványok egyenletes kiterhelése az erő és a nyomaték vonalán

Az optimalizációt adott kialakítású hengersorra vonatkoztathatjuk. A cél, a hengerállványok egyenletes kiterhelése, vagyis ez által a hengersor gépészeti elemei élettartalmának befolyásolása. Bemeneti paraméterként meg kell adni, hogy a maximális terhelés hány százaléka legyen a megengedett, jelen futtatásnál terhelési szintnek 50%-ot állítottam be. A program meghatározza, hogy adott hőmérséklet-sebesség tartományban hol vannak azok a pontok, ahol az adott hengerléstechnológia kivitelezhető. Az eredmény a 6.23. ábrán látható.



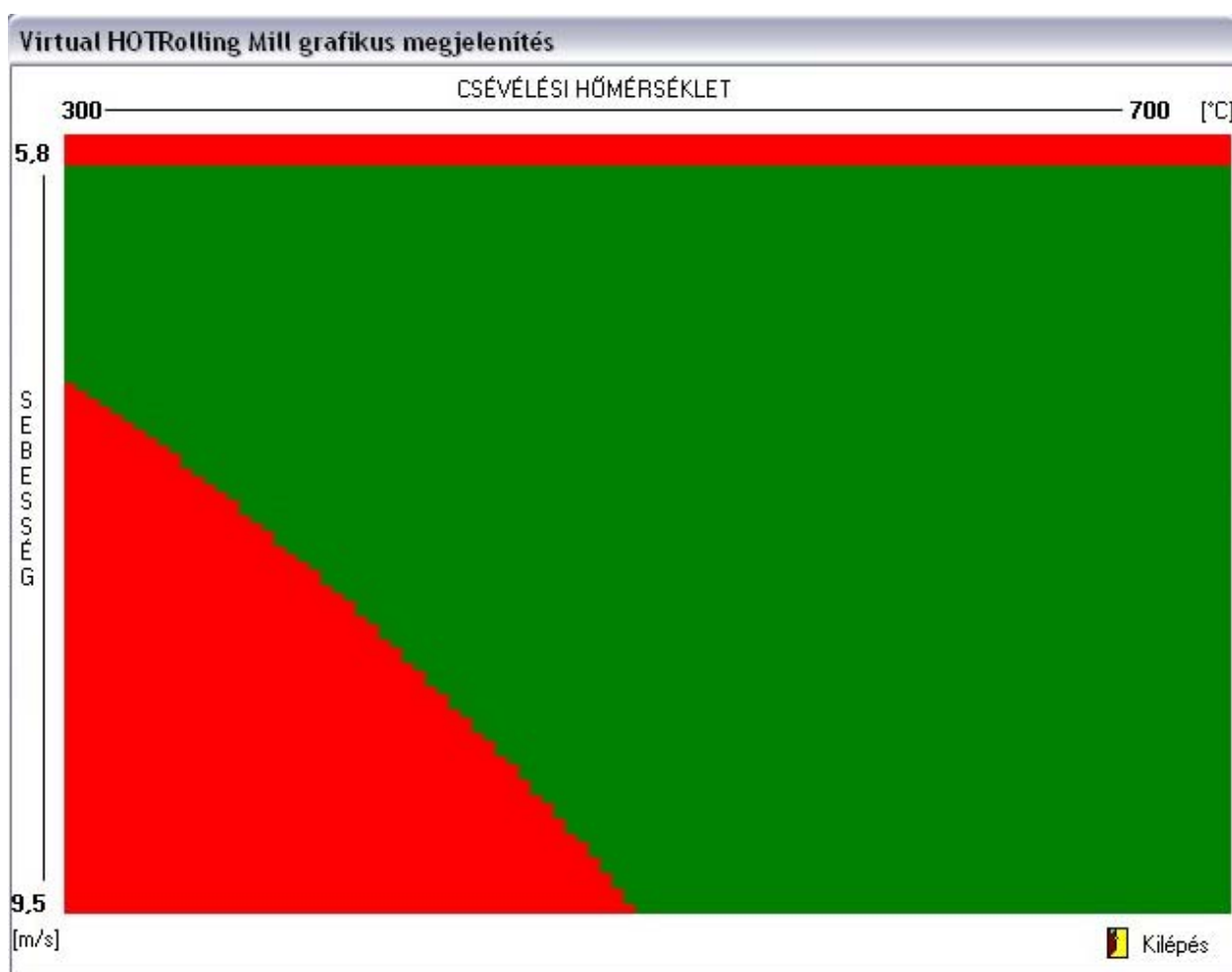
6.23. ábra

Az adott hengerléstechnológia a zöld tartományban igen, a piros tartományban nem kivitelezhető. Ennek oka, hogy a program a hengerléstechnológia megvalósíthatóságának vizsgálatánál minden egyes kiinduló csévéelési hőmérséklet-sebesség értékkel való számításnál figyelembe veszi a virtuális hengermű gépészeti és mechanikai korlátait. A technológiák kivitelezhetőségének határát egyrészt a befogási és folytonossági feltétel (egyenes határvonal),

másrészt az ébredő maximális erő és nyomaték (görbe határvonal) határozza meg. Ha a 6.24. és a 6.21. ábrát megvizsgáljuk látszik, hogy azonos beállítások mellett és a maximális terhelés csökkentésével a kivitelezhető hengerléstechnológiák száma csökken.

A maximális óraterjesztmény kihasználása

Az optimalizációt adott kialakítású hengersorra vonatkozóan vizsgálhatjuk. A cél, a kívánt hengersor maximális óraterjesztményének meghatározása, amely az a pont, ahol a kívánt csévélési hőmérséklethez tartozó csévélési sebesség maximális. A program meghatározza, hogy adott hőmérséklet-sebesség tartományban hol vannak azok a pontok, ahol az adott hengerléstechnológia kivitelezhető a hengerállványok maradó károsodása nélkül. Az eredmény a 6.24. ábrán látható.

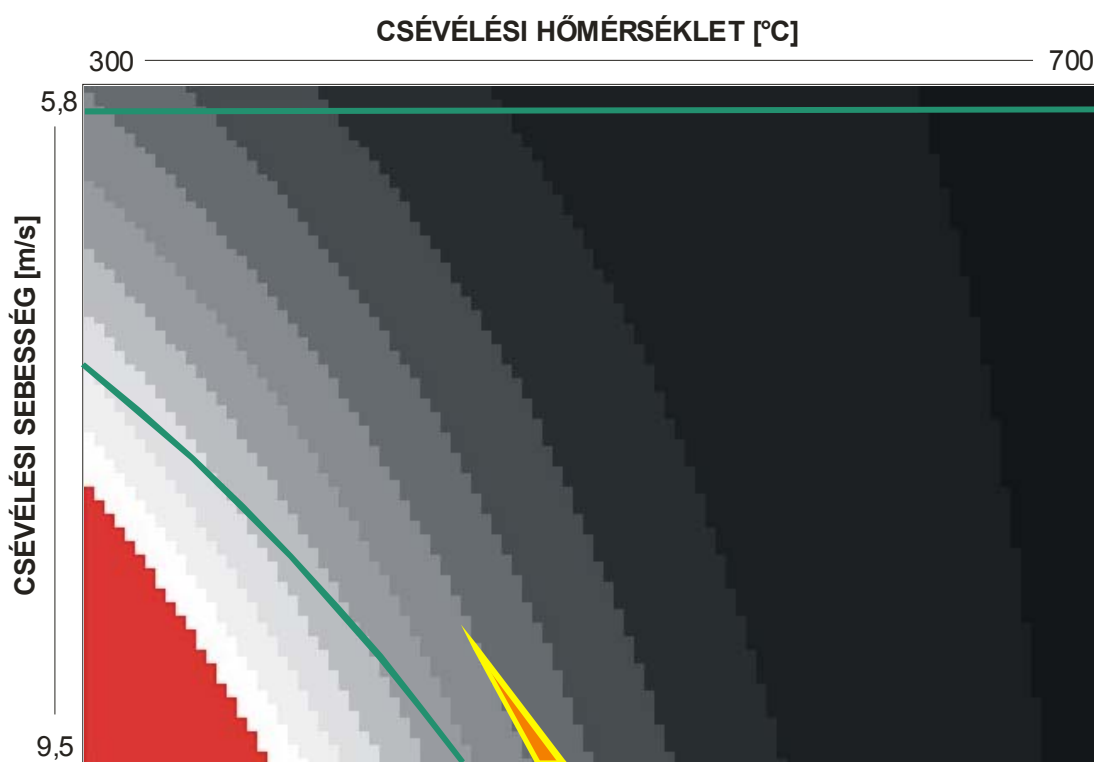


6.24. ábra

Az adott hengerléstechnológia a zöld tartományban kivitelezhető, a piros nem kivitelezhető adott hőmérséklet-sebesség érték tartományban.

A „Minimális fajlagos energiafelhasználás meghatározása” és „Minimális fajlagos energiaköltség meghatározása” optimalizációs típusokat a Miskolci Egyetem Fémtechnológiai Tanszék munkatársai már kidolgozták, [5] így ezzel nem, csak az általam megfogalmazott új lehetőségekkel kívántam foglalkozni.

Az elvégzett számítások eredményei természetesen nem csak önmagukban használhatóak fel, hanem - mivel az optimalizációkat azonos tartományban végeztük el - egymásra fektetve közösen is alkalmazhatóak. Például, ha meg akarjuk határozni azt a tartományt, ahol minimális a vízfelhasználás, maximális a befutó előlemez vastagsága és kivitelezhető a technológia, akkor nem kell mást tennünk, csak a 6.20., 6.21. és a 6.22. ábrát egymásra fektetnünk. Az eredmény a 6.25. ábrán látható, a zöld görbéken belül kivitelezhető az adott hengerléstechnológia, a sárga görbéken belül maximális a befutó előlemez vastagsága, a piros színnel jelölt részben a szalag maximális hűtővízmennyiséggel sem hűthető le a csévélési hőmérsékletre, fehér színtől a feketéig a 100% felhasznált hűtővízmennyiségtől a 0% hűtővízmennyiségig terjedő sávok a szürkeségi foktól függőek, a narancssárga tartományban találhatóak a kívánt optimális értékek.



6.25. ábra

6.3.2.3. A „Virtual HOTRolling Mill” program jelentősége

A modellező programok jelentőségét több oldalról közelíthetjük meg, de a legfontosabb a felhasználhatóság. Hol és mire használható a „Virtual HOTRolling Mill” program?

- Az oktatásban segít a hengerléstechnológiával kapcsolatos alapelvek, sajátosságok megismerésében. A hallgatók „saját építésű” meleghengerművekben tervezhetnek technológiákat és végezhetnek szimulációkat, melyekből következtetéseket vonhatnak le akár a különféle anyagok viselkedésére vagy adott beállítások kivitelezhetőségére.
- A tudományos kutatásban nagyobb pénzügyi befektetés nélkül lehet modellezni adott meleghengerművet. Kísérletezni lehet a különféle bemeneti, gépészeti és egyéb paraméterek változtatásával anélkül, hogy bármiféle üzemelő hengerműben hibát követnének el és ezzel termeléskiesést okoznánk. A modellezés során kapott eredményekből új, általános alapelveket lehet levonni.
- Az iparban, kisebb átalakítással, mint szakértői rendszert lehet alkalmazni. A program gyorsasága lehetővé teszi, hogy akár minden egyes szalagtekercsre anyagminőségtől és mérettől függően meg lehessen tervezni a betartandó optimális hengerlési illetve hűtési technológiát.

A fentiekből levonható az a végkövetkeztetés, hogy az általam megalkotott „Virtual HOTRolling Mill” program nem öncélú: Felhasználása a jövőben új távlatokat nyithat meg az oktatás, az ipari hengerléstechnológia optimalizáció illetve a képlékenyalakítási kutatások területén.

7. LEVONT KÖVETKEZTETÉSEK

Az alakítástechnológia fizikai és mechanikai alapelveinek valamint a számítástechnika korszerű módszereinek felhasználásával elkészíthetők olyan optimalizáló algoritmusok, amelyek alkalmasak egy úgynevezett „virtuális meleghengermű” létrehozására és ezen keresztül a meleghengerlés tényleges modellezésére.

A meleghengerlési technológia tervezését és optimalizálását - javaslatom szerint - nem a technológiai sorrend elejétől célszerű kezdeni, hanem a sorrend végétől, vagyis attól a ponttól, hogy a szalagot feltekercselik, hiszen felhasználási szempontból a végtermék tulajdonságai a lényegesek. A végtermék felcsévélte tekercs, ami a tekercsképzésből és a tekercsben való lassú lehűlésből következően – anyagminőségként különböző, de - viszonylag szűk hőmérsékletközt jelent. A csévéelési hőmérséklet felső határát a hajlítással együtt járó igen kismértékű melegalakítás utáni szemcsedurvulás elkerülésének, a tekercsmenetek összetapadásának megakadályozása, míg az alsó korlát a nagy csévéelési nyomatékszükséglet, a visszamaradó rugalmas feszültség elkerülésének a feltételei definiálják. A fentiekből következik az alábbi tézis:

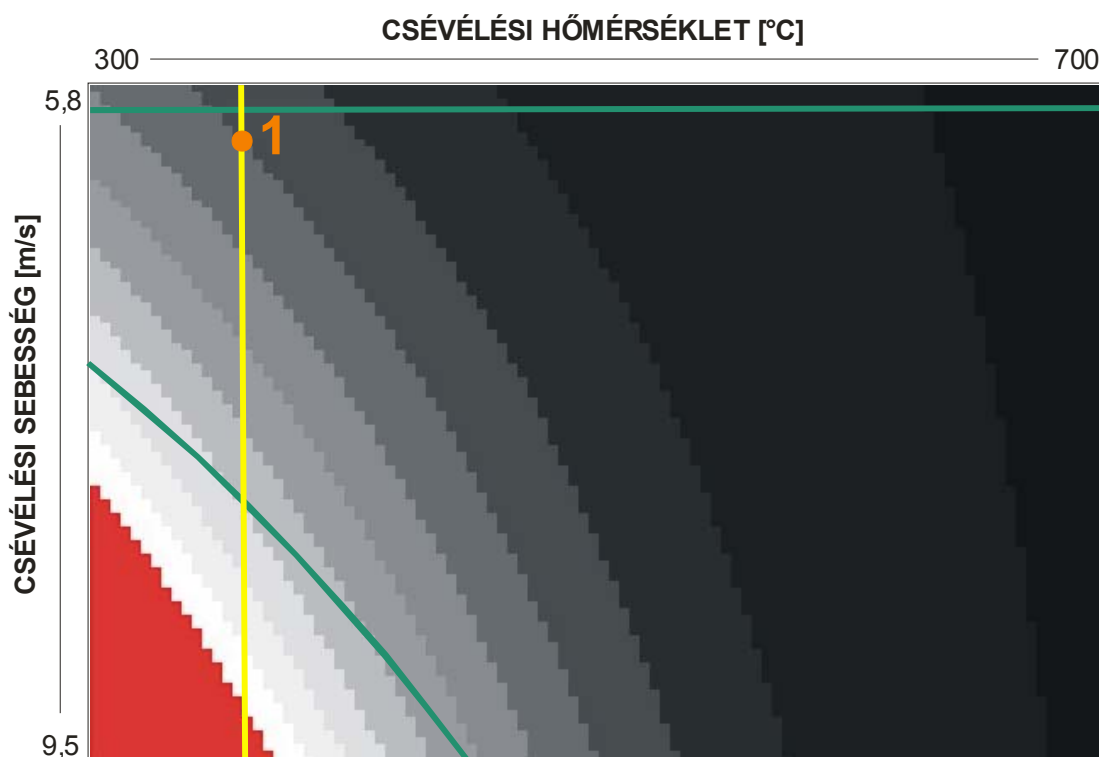
1. *Meleghengerlésnél az utolsó alakításban a darab hőmérséklete elvileg az újrakristályosodási hőmérséklettel (A_{r3} hőmérséklet) kell, hogy egyenlő legyen. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a tényleges hőmérsékletet ennél csak kevéssel nagyobbra célszerű tervezni. A melegalakítás szempontjából minimálisnak tekintett A_{r3} hőmérséklet jelenti ugyanis azt, hogy a lehűlő darab szemcsedurvulása a lehető legkisebb lesz. A meleghengerlési technológia tervezésének tehát elsődleges kiindulópontja az, hogy az utolsó alakítás kívánt fenti hőmérséklete biztosítva legyen. E rendező elv alá kell és tudom az általam kialakított algoritmus segítségével rendelni valamennyi hengerléstechnológiai paramétert*

A finomszemcsés szerkezet elérése érdekében a hengerlés utáni hűlést is szabályozni kell. A lehűlési sebességnek alsó és felső korlátja van. Az alsó korlátot – azonos számú kristályosodási középpont esetén - a szemcsedurvulás elkerülése határozza meg, a felső korlátot pedig a martenzit képződés megakadályozása. A megállapításból következő tézis:

2. *Meleghengerlés után a hűtési sebesség egy célfüggvény szerinti optimauma a két határ között ott található, ahol a hűtővíz felhasználása minimális. A hűtővíz mennyiségét a „gyorshűtés” sebessége is befolyásolja. Ez utóbbit elsősorban az anyagminőség szabja meg (például az ötvözetlen szénacélok esetében ez általában max. 200-300 °C/s). Adott anyagminőség (ami az A_{r3} -at meghatározza) és adott keresztmetszet esetén a vízfelhasználás minimumát meghatározó legfontosabb paraméter a darab átfutási sebessége, ami megegyezik az*

utolsó alakítás (szűrés) sebességével. A disszertációban kialakított modell alkalmas a minimális vízfelhasználáshoz tartozó hengerléstechnológiai paraméterek megtervezésére.

3. A hengerlési végsebesség meghatározza a hengersor óráteljesítményét is. A hűtési kapacitás és a megengedett lehűlési sebesség ismeretében kidolgoztam a hengerlési véghőmérséklet olyan megállapítását, amely mellett a késztermék lehűlési sebessége azonos a második tézisben meghatározott és optimális szemnagyságot eredményező hűtési sebességgel. Az ehhez a hőmérséklethez tartozó hengerlési sebesség és az A_{r3} véghőmérséklethez tartozó sebesség között megállapítottam a hengersor maximális óráteljesítményt jelentő sebesség értékét is.



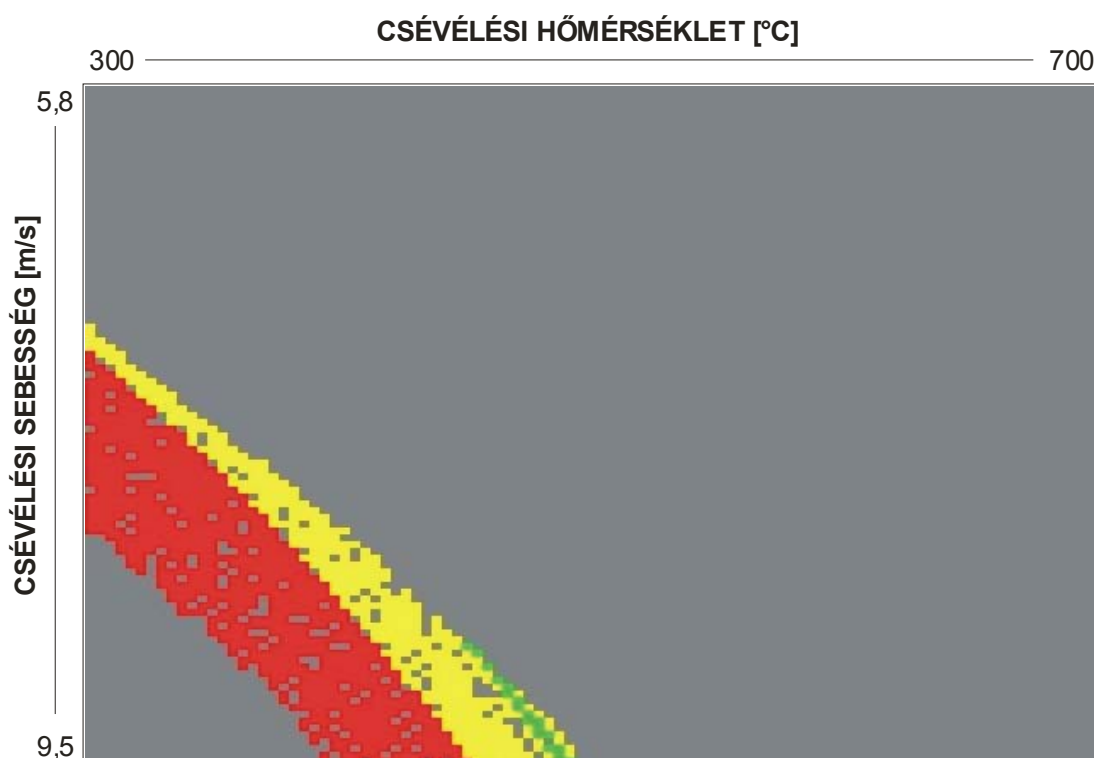
7.1. ábra

A 7.1. ábrán a piros színnel jelölt részben a szalag maximális hűtővízmennyiséggel sem hűthető le a csévélési hőmérsékletre, fehér színtől a feketéig a 100% felhasznált hűtővízmennyiségtől a 0% hűtővízmennyiségig terjedő sávok a szürkeségi foktól függők. Az adott hengerléstechnológiát csak a zöld görbéken belüli tartományban lehet kivitelezni! Az 1. pontban a kívánt csévélési hőmérsékletre (melyet a sárga függőleges vonal jelképez) minimális vízfelhasználás és maximális óráteljesítmény tartozik.

A hengerlési véghőmérséklet (ideális esetben ennek optimális értékét a harmadik tétel szerint kapjuk) beállítására több lehetőség adódik. Ezek: a hengerlési kezdőhőmérséklet (az izzítás

vég hőmérséklete) megválasztása, a hengerlési sebesség-szint (és ezen keresztül az utolsó alakítás sebességének) megválasztása, a technológia, azaz szűrásterv kialakítása, valamint az esetleges közbelső darab-hűtés beiktatása. Ezek közül a paraméterek közül a hengerlési kezdő hőmérséklet energetikai szempont szerinti optimumát már meghatározták [3]. Az értekezésemben a korszerű öntvehengerlési elvekkel összhangban lévő úgynevezett „vékonybramma” maximális vastagságát határoztam meg és ezzel összefüggésben a gépi berendezés kiterhelését optimalizáltam.

4. Adott telepítésű hengersonor esetén meghatároztam azt a maximális magasságcsökkenés-sort (azaz a szűrástervet), ami valamennyi hengerállvány „leggyengébb” gépelemében mind az erő, mind a nyomaték vonalán egyenletes igénybevételt jelent. Az igénybevételi szint tetszés szerint megválasztható a tönkremenetelt jelentő maximális érték százalékában. Az így kapott szűrásterv eredményezi a alkalmazható befutó brammavastagság maximumát.

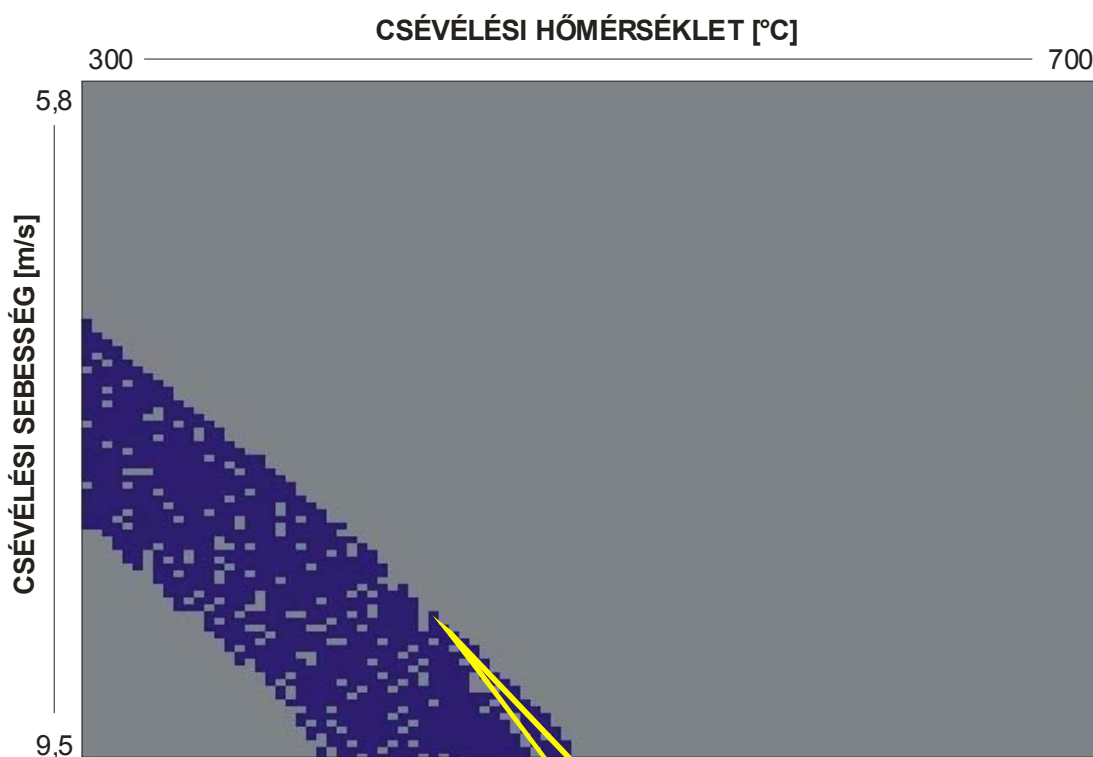


7.2. ábra

A 7.2. ábrán a szürke pontokban nem kivitelezhető a hegerléstechnológia a hengersonor gépészeti korlátai miatt. A vörös pontokba a maximális befutó vékonybramma illetve előlemez vastagság 1-28 mm között, a sárga pontokban 29-39 mm között, a világoszöld pontokban 40-50 mm között van.

A szúrásterv eredménye a befutó vékony bramma hőmérséklete is, amelyet vagy elfogadunk, vagy az izzítási és hűntartási lehetőségek illetve az energetikailag kapható optimális érték figyelemvételével módosíthatunk. Természetesen ez azt jelenti, hogy ebben az esetben az előző téziseim eredményeként kapott és a hengersor optimumát jelentő hengerléstechnológiai paraméterek is megváltoztatandók, illetve az optimalizációt újra el kell végezni egy olyan iterációs kör beiktatásával, amelyik a kívánt kezdőhőmérsékletet eredményezi.

5. *Kidolgoztam a hengerállványonkénti maximális magasságcsökkenések meghatározására alkalmas módszert, amely az izzítási és hűntartási lehetőségek figyelembe vétele esetén megadja a kívánt befutó hőmérséklethez tartozó maximális befutó vastagságot.*



7.3. ábra

A 7.3. ábrán a szürke pontokban nem kivitelezhető a hegerléstechnológia a hengersor gépészeti korlátai miatt. A kék pontokban minimális a kívánt izzítási illetve hűntartási hőmérséklettől való eltérés. A sárga területen belül maximális a befutó vékonybramma illetve előlemez vastagsága.

8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Dr. Kiss Ervin: Képlékenyalakítás elmélete (Tankönyvkiadó, Budapest, 1987)
- [2] Dr. Verő József – Dr. Káldor Mihály : Fémten (Tankönyvkiadó, Budapest, 1973)
- [3] A DUNAFERR Acélművek Kft. Meleghengersorában a szabályozott hőmérsékletvezetésű hengerlés technológiájának kidolgozása (Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem Kohógéptan- és Képlékenyalakítási Tanszék, Miskolc, 1995)
- [4] Myake Y. és társai: Device and System for Controlled Cooling for Hot Strip Mill (Transaction ISIJ, Vol. 20. 1980., p. 496-503.)
- [5] A fajlagos energiafelhasználás szempontjából optimalizált profilhengerlési technológiák kialakítása(Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem Kohógéptan- és Képlékenyalakítási Tanszék, Miskolc, 1983)
- [6] A DV meleghengersorán gyártott széles szalag vastagságeltéréseinek meghatározása (Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem Kohógéptan- és Képlékenyalakítási Tanszék, Miskolc, 1988)
- [7] Dr. Kiss Ervin – Dr. Voith Márton: Kohógéptan (Tankönyvkiadó, Budapest, 1974)
- [8] Verő J. – Káldor M.: Vasötvözetek fémtena. Műszaki Kiadó, Budapest, 1971
- [9] Óvári Antal: Vaskohászattani kézikönyv (Műszaki Könyvkiadó 1985)
- [10] Jonas, J.J: Az acél meleghengerlésének három jellemző hőmérséklete és kísérleti úton való meghatározásuk (Bányászati és kohászati lapok Kohászat, Bányászati és kohászati lapok. Kohászat, ISSN 0005-5670127 évf. 6. szám, 1994)
- [11] Hensel – Spittel: Kraft- und Arbeitsbedraf bildsamer Formgebungsverfahren (VEB Deutscher Verlag 1978)
- [12] A DUNAFERR Acélművek Kft meleghengerműjében a folyamatosan öntött buga vastagság változtatásának lehetőségei (Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem Kohógéptan- és Képlékenyalakítási Tanszék, Miskolc, 1995)
- [13] LKM NAC hengermű finomsori technológiájának inteifizikálása (Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem Kohógéptan- és Képlékenyalakítási Tanszék, Miskolc, 1982)
- [14] A Dunai Vasmű szélesszalagsorának számítógépes komplex optimalizálási rendszere (Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem Kohógéptan- és Képlékenyalakítási Tanszék, Miskolc, 1975)
- [15] A DV folytatólagos készsorának komplex hengerléstechnológiai vizsgálata (Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem Kohógéptan- és Képlékenyalakítási Tanszék, Miskolc, 1972)

- [16] Gulyás József: A meleghengerlés folyamatának felügyeleti rendszere a méretpontosság és hengerfelhasználás alapján (Bányászati és kohászati lapok. Kohászat, ISSN 0005-5670 1994. (127. évf.) 3-4. sz. 109-112. old.)
- [17] Gulyás József, Reisz Gyula: Kis C-tartalmú lemezacélok alakítási szilárdságának meghatározása az Ar3 és az Ar1 átalakulási hőmérséklettartományban (Bányászati és kohászati lapok. Kohászat, ISSN 0005-5670 2000. (133. évf.) 6-7. sz. 260-263. old.)
- [18] Cser L., Korhonen, A. S., Gulyás J., Reisz Gy., Myllykoski, P. T.: Új módszerek a meleghengerlési folyamatok elemzésében és a folyamatkövetésben (Bányászati és kohászati lapok. Kohászat, ISSN 0005-5670 2000. (133. évf.) 1. sz. 6-11. old.)
- [19] Siwecki, T.: The Influence of Processing Route and Nitrogen Content on Microstructure and Precipitation Hardening in Vanadium Microalloyed HSLA-Steels. Proc. Met. Soc. AIME: Thermomech. Proc. Microalloyed Austenite. 1982. p. 163.
- [20] Korchynsky M. – Wille P.: Acciai Saldabili di elevata resistenza per tondo per cemento armato con aggiunta di vanadio e azoto. Metall. Ital. 1984 64(11) p. 484.
- [21] Houghton D.C.: Characterisation of Carbinitides in Ti Bearing HSLA Steels. Proc. Met. Soc. AIME: Thermomech. Proc. Microalloyed Austenite. 1982. p. 267.
- [22] Kalmikov N.V.: Konsztruktivnaja prognoszty thermomechanicseszkij uproszennoj armaturnoj sztalij 20Cr-Mn-Si2. Sztal 1984. 11. p. 70.
- [23] Goczal J.: Zastosowanie obróbki z wykorzystaniem ciepła walcowania w produkcji prętów ze stali krzemowo-manganowych do betonu sprężonego. Wiad. Hutnicze 1984. p. 314.
- [24] Beagles, A.E. – Hewitt, E.C. – Mizban, S.I.: Szélesabroncs-hengerművek termikus modellezése. BKL Kohászat, 126. évf. (1993) 4- 8. old.
- [25] Lontai Attila – Bánhegyesi Attila – Kokas Tibor: Az 1700 mm-es félfolytatólagos melegszalagsor fejlesztése. BKL Kohászat, 133. évf. (2000) 352 - 356. old.
- [26] Samaras, N.S. : Novel Control Structure for Runout Table Coiling Temperature Control. Steel Technology, 2001. 55 – 59. old.
- [27] Evans, J.F. – Roebuck, D. – Watkins, H.R.: Numerical Modelling of Hot Strip Mill Runout Table Coiling. Iron and Steel Engineer, 1993. 50 – 55. old.
- [28] Paul, S.K. – Kumar, R. – Gupta, R. – Mahapatra, S.K.: Control of Coiling Temperature through Data Mining at Data Steel. Steel Times International, 2001. 33 – 34. old.
- [29] Kirsch, H.J. – Flüß, P. – Schütz, W. – Streisselberger, A.: Neue Eigenschaftskombinationen an Grobblech durch den beschleunigten Kühlprozess. Stahl und Eisen, 119. évf. (1999) 37 – 65. old.

- [30] Braun Gábor – Dr. Grega Oszkár – Győri Mária: A brammavastagság csökkentésének hengerléstechnológiai alternatívái (MicroCad 1999 Metallurgia szekció kiadvány pp. 35-40)
- [31] Braun Gábor: Hengerlési paraméterek optimalizációja acél lapostermékek gyártásánál (Anyagok Világa – Független Elektronikus Szakmai Folyóirat I. évf. 2. Szám 2000. április)
- [32] Dr. Grega Oszkár - Győri Mária - Dr. Zsámbók Dénes - Králik Gyula: Szélesszalaggyártó acélöntő-hengerlő technológiák (DUNAFERR Műszaki Gazdasági Közlemények 1998/1.)
- [33] Dr. Grega Oszkár - Győri Mária - Dr. Zsámbók Dénes - Králik Gyula: Szélesszalaggyártó acélöntő-hengerlő technológiák (DUNAFERR Műszaki Gazdasági Közlemények 1998/2.)
- [34] Dr. Grega Oszkár – Győri Mária: Az acéllemezgyártás fejlesztési lehetőségei (Nyersvas- és acélgyártó konferencia, Balatonszéplak 1998. május 8-10.)
- [35] Marco Cantú: Delphi 3.0 Mesteri szinten (Kiskapu Kiadó, 1998)

9. TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

Előadások

Gábor Braun - Oszkár Grega – Mária Győri: The effect of ingot-thickness decreasing on the rolling technology (MicroCad 1999)

Braun Gábor – Dr. Grega Oszkár – Győri Mária: A brammavastagság csökkentésének hengerléstechnológiai vonzatai (Jubileumi Konferencia 1999.)

Braun Gábor: Technológiai paraméterek optimalizálása lapostermékek meleghengerlésénél (Doktorandusz Fórum 1999.)

Gábor Braun: Optimalization of roling parameters in production of flat rolled products (MicroCad 2000)

Braun Gábor: Acél lapostermékek hengerlési paramétereinek számítógépes optimalizációja (Anyag- és Kohómérnöki Kar Tudományos Ülésszaka 2000)

Braun Gábor : Hengerlési paraméterek számítógépes optimalizációja acél lapostermékek gyártásánál (Doktorandusz Fórum 2000)

Oszkár Grega – Mária Győri – Gábor Braun: Criteria of marketable range of products in steel sheet producing (MicroCad 2001)

Gábor Braun – Oszkár Grega: Parameters of rolling optimalization by flat products with computer (MicroCad 2001)

Folyóiratcikkek

Braun Gábor: Hengerlési paraméterek optimalizációja acél lapostermékek gyártásánál (Anyagok Világa – Független Elektronikus Szakmai Folyóirat I. évf. 2. Szám 2000. április)

Braun Gábor – Dr. Voith Márton: Acél szélesszalag meleghengerlési technológiájának számítógépes optimalizációja (Anyagok Világa – Független Elektronikus Szakmai Folyóirat III. évf. 2. Szám 2002. december)

Braun Gábor – Dr. Voith Márton: Kapcsolatok az acélok meleghengerlése és hűtése között (Anyagok Világa – Független Elektronikus Szakmai Folyóirat IV. évf. 1. Szám 2003. március Megjelenés alatt)

Braun Gábor – Dr. Voith Márton: Virtuális meleghengermű (BKL 2003 Megjelenés alatt)

ÖSSZEFOGLALÁS

A célkitűzésekben megfogalmazott hengerléstechnológia optimalizáló program elkészítéséhez nem csak a megfelelő technológiai, fizikai elveket kell ismerni, hanem az elkészült program ellenőrzéséhez ismerni kell a tényleges üzemben mérhető – a technológiát leíró – adatokat is. Az adatbázis első megközelítésre kaotikusnak tűnt, mivel a kiértékelendő adatok 2 külön fájlban voltak és a fájlok mérete összességében meghaladta a 70 MB-ot. Ezért először a köztük lévő kapcsolatot találtam meg. A fájlok az alábbi adatbázist tartalmazták: az első az acélminőséget, a második információkat a technológiai lépésekről. Számítógépes adatrendező programot hoztam létre a probléma megoldására. Az acélminőséget és a technológiai lépéseket tartalmazó fájl közös adata a bugaszám volt, vagyis ez alapján az acélminőség és technológiai adatokat párosítottam. A program az általam kitalált rendező algoritmust használja, vagyis az acélminőségeket tartalmazó fájlból kiemeli a bugaszámot és megkeresi a hozzá tartozó bugaszám szerinti technológiai adatot. Az elkészült adatbázisból kiválasztottam az St24 jelű anyagminőségű 2 mm vastagságú szalagot az ellenőrzéshez, mivel ehhez volt a legtöbb mérési adat.

A meleghengerlés optimalizációját két oldalról közelíthetjük meg, vagy a szalag a hengersorba első állványába bemenő sebesség – vastagság - szélesség paraméterhez kívánjuk meghatározni a hengersor utolsó állványából kimenő sebesség – vastagság – szélesség értékeket vagy fordítva, a kimeneti értékekhez kívánunk bemeneti paramétereket meghatározni. Mivel a kész szalag mechanikai tulajdonságait jelentősen befolyásolja a hengerlés utáni hűtés mértéke és a hűtés sebessége, célszerűnek tűnik, hogy az optimális kimeneti értékekhez keressünk optimális bementi paraméterek a hengersor gépészeti tulajdonságainak figyelembevételével. Az általam elkészített „Virtual HOTRolling Mill” nevű program a fent említett elven működik és a hagyományos lefutó programozással megvalósított optimalizálás kategóriába sorolható. A program 32 bites operációs rendszer alá íródott Borland Delphi 6.0 programozási nyelven. Bemeneti paraméterei, az anyagjellemzőkön és tulajdonságokon, a gépészeti értékeken kívül, a vég sebesség – hőmérséklet – vastagság érték és a szúrásterv. Ezekhez a paraméterekhez határoztam meg- a melegalakításhoz és hűtéshez tartozó algoritmusok felhasználásával, megfelelő iterálásával és az optimalizációs elvek figyelembe vételével – az ismeretlen értékeket. A szoftver által számolt és a mért paraméterek összehasonlítása után kiderült, hogy az eltérés a magasságcsökkenések tekintetében $\pm 30\%$, a hőmérséklet tekintetében $\pm 10\%$ hibasávon belül van, ami azt jelenti, a **„Virtual HOTRolling Mill” program használatával jó közelítéssel modellezhető tetszőleges kialakítású meleghengermű.** A program, csak acél széles szalag gyártástechnológiájának modellezésére alkalmazható!

Az optimalizációhoz az alábbi, általam megalkotott elveket használtam:

- A kívánt csévélési hőmérséklethez tartozó minimális hengerlési véghőmérsékletek meghatározása,
- A felhasznált hűtővíz mennyiségének minimalizálása,
- Kívánt izzítási- illetve vékonybramma kiindulási- hőmérséklet meghatározása,
- Maximális befutó vastagság meghatározása,
- A hengerállványok egyenletes kiterhelése az erő és a nyomaték vonalán,
- Az óráteljesítmény maximális kihasználása.

A kutatásaim során újfajta szemléletmód illetve egy széles körben felhasználható számítógépes program került kifejlesztésre.

A program felhasználási területei az alábbiak:

- Az oktatásban segít a hengerléstechnológiával kapcsolatos alapelvek, sajátosságok megismerésében. A hallgatók „saját építésű” meleghengerművekben tervezhetnek technológiákat és végezhetnek szimulációkat, melyekből következtetéseket vonhatnak le akár a különféle anyagok viselkedésére vagy adott beállítások kivitelezhetőségére.
- A tudományos kutatásban nagyobb pénzügyi befektetés nélkül lehet modellezni adott meleghengerművet. Kísérletezni lehet a különféle bemeneti, gépészeti és egyéb paraméterek változtatásával anélkül, hogy bármiféle üzemelő hengerműben hibát követnének el és ezzel termelésekiesést okoznánk. A modellezés során kapott eredményekből új, általános alapelveket lehet levonni.
- Az iparban, kisebb átalakítással, mint szakértői rendszert lehet alkalmazni. A program gyorsasága lehetővé teszi, hogy akár minden egyes szalagtekercsre anyagminőségtől és mérettől függően meg lehessen tervezni a betartandó optimális hengerlési illetve hűtési technológiát.

A fentiekből levonható az a végkövetkeztetés, hogy az általam megalkotott „Virtual HOTRolling Mill” program nem öncélú: Felhasználása a jövőben új távlatokat nyithat meg az oktatás, az ipari hengerléstechnológia optimalizáció illetve a képlékenyalakítási kutatások területén.

RÉSUMÉ

We have to know the measuring data beyond the physical principle and formule, if we would like to do a hot rolling optimalization software. My measuring database was a little bit disordered, because the data was in two large files (~70MB), that is way I had to find the link between the files. The first file include the datas of steel quality, the second file include the datas of technological. The common data was the bramma number. I wrote a dataorder sotfware which combine the belonging together datas. I selected the St24 (thickness: 2 mm) steel quality from the new database, because it had the most number of data.

I approached the hot rolling optimailzation from the end of technolgy, because the most important thing is in the manufacturing process the quality of sheet. I wanted to search the optimum input to the optimum output. My software „Virtual HOTRolling Mill” can meet the requirements. I developed it in Borland Delphi 6.0 under 32 bit operation system. The input parameters are the material feature and property, the mechanical caracteristic and the pricking plan.

I calculated the output parameters to this parameters. If we compare the counted and measure datas, then the difference is $\pm 30\%$ by decrease of the height, $\pm 10\%$ by the temperature.

We have to draw the conclusion, we can modell the hot rolling process very good with the „Virtual HOTRolling Mill” software.

I used this type of principle to the optimalization :

- Determination of the minimum hot rolling aimspeed,
- Determination of the minimum quantity of cooling water,
- Determination of the optimum heat start temperature,
- Determination of the maximum enter height,
- Determination of the hot rolling stand equal loan of power,
- Determination of the maximum capacity.

We can use this this software in the :

- education at the University,
- scientific research at the Research and Development Center,
- industry like a advisory system.

MELLÉKLET

A mellékelt CDROM-on az alábbi fájlok találhatóak:

VHRM.exe	A "Virtual HOTRolling Mill" program indítófájlja
Dunaferr.vrf	A DUNAFERR meleghengerműjének modellje
Dunaferr_hutes.vrf	A DUNAFERR meleghengermű hűtősorának modellje
Osszes.xls	A teljes mérési adatbázist tartalmazó fájl
St24_2.xls	Az St24 anyagminőséghez tartozó mért és számolt adatok
Statisztika.xls	A kiválasztott anyagminőségekhez tartozó mérési adatbázist tartalmazó fájl
6_19abra.csv	A 6.19. ábrához tartozó adatbázis
6_20abra.csv	A 6.20. ábrához tartozó adatbázis
6_21abra.csv	A 6.21. ábrához tartozó adatbázis
6_22abra.csv	A 6.22. ábrához tartozó adatbázis
6_23abra.csv	A 6.23. ábrához tartozó adatbázis
Phd_disszertacio.doc	Ph.D. dolgozat digitális formában
Phd_disszertacio_elolap.doc	Ph.D. dolgozat előlap digitális formában
Phd_disszertacio_tf.doc	Tézisfüzet digitális formában
Phd_disszertacio_tf_el.doc	Tézisfüzet előlap digitális formában