



Dr. Gulyás József - Dr. Horváth Ákos - Illés Péter - Dr. Farkas Péter

ACÉLOK HENGERLÉSE

Miskolci Egyetem
2013

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujszechenyiterv.gov.hu
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Dr. Gulyás József
műsz. tud. dokt.
professor emeritus

Dr. Horváth Ákos
dr. univ.
főtanácsos

Illés Péter
okl. kohómérnök
osztályvezető

Dr. Farkas Péter
dr. univ.
ny. főisk. docens

ACÉLOK HENGERLÉSE

A digitális tananyag a TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0071 számú, *Kompetencia alapú, korszerű, digitális komplex tananyagmodulok létrehozása és on-line hozzáférésük megvalósítása fémtechnológiához kapcsolódó felsőfokú műszaki képzési területeken* című projekt keretében készült

Lektorálta:

Dr. Marczis Gáborné
PhD.
ny. ügyvezető igazgató

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	3
ELŐSZÓ.....	5
1. A hengerlés alapfogalmai.....	6
1.1. Képlékeny alakítás	6
1.2. Meleg-, illetve hidegalakítás	7
1.3. A hengerlés fogalma.....	7
2. A hengerlés elméleti alapjai	8
2.1. Elemi hengerlés	8
2.2. A hengerelt darab méretváltozásai	8
2.3. Nyomott ív, nyomott felület	10
2.4. Befogási szög, befogás feltétele, áthúzási feltétel.....	11
2.5. Szélesedés jelensége elemi hengerlésnél.....	13
2.6. Súrlódás a hengerrésben.....	14
2.7. Hengerlés sebességviszonyai	15
3. Az acél viselkedése a hengerrésben	17
3.1. Az acél mikroszerkezetében végbemenő folyamat meleg hengerléskor.....	17
3.2. Feszültségállapot a hengerelt darabban.....	18
3.3. Finomabb szemcséket eredményező mechanizmusok	21
4. A hengerlés energetikai viszonyai.....	21
4.1. Hengerléskor fellépő erő	21
4.2. Hengerlési nyomaték.....	22
4.3. A hengerlés teljesítmény-szükséglete	24
5. Hosszútermékek hengerlésének technológiája.....	24
5.1. Üreges hengerek	24
5.1.1. Nyitott és zártüreg	26
5.1.2. Az üregek oldalferdesége	26
5.2. Az üregtöltés	26
5.3. A hengerek közepes dolgozó átmérője.....	27
5.4. Hengerüregek csoportosítása.....	29
6. A hengerlési technológia hengereinek kialakítása	29
6.1. Szekrényüreg	29
6.2. Négyzet és rauta üreg, a négyzet-rauta üreg sor.....	30
6.3. Ovál üreg, a négyzet-ovál és kör-ovál üreg sor.....	31
7. Hengersorok	33
7.1. Hengerállványok	33
7.2. Egytengelyes sorok	34
7.3. Cikcakk sorok.....	36
7.4. Folytatólagos sorok	36
8. Lapos termékek hengerlése	37
9. Lapos termékek felosztása a felhasználási cél alapján.....	38
10. Lapos termékek gyártásának általános technológiája	40
11. Lapos termékek meleghengerlése	51
11.1. Durvalemezek meleghengerlése.....	51
11.1.1. Durvalemez hengersorok felépítése	51
11.1.2. A durvalemez gyártási folyamata.....	51
11.2. Szélesszalagok meleghengerlése.....	53
11.2.1. Folyamatosan öntött brammák előnyújtása előlemezé.....	54
11.2.2. Készrehengerlés technológiája	55

11.2.3. Hőmérséklet szabályozás a készsoron és a kifutó görgősoron a csévélig.....	58
11.2.4. A melegen hengerelt szalag méreteltérése	59
11.2.5. Melegen hengerelt szélesszalagok szelvényalakjának a szabályozása.....	62
11.2.6. A hengerelt darab hőmérsékletváltozása.....	65
11.2.7. Alakítás erőszükséglete	68
11.2.8. Újrakristályosodás meleghengerlés alatt	69
12. Szélesszalagok hideghengerlése.....	72
12.1. A szélesszalagok hideghengerlésének általános sémája	72
12.2. A melegen hengerelt szalag revétlenítése, pácolás	73
12.3. Hideghengerlés.....	76
12.3.1. Hideghengersorok munkamódszere	76
12.3.2. Hűtő- és kenőanyagok szerepe hideghengerléskor	77
12.3.3. Az 1750-es reverzáló hengersor főbb műszaki adatai és a szabályozási rendszere	78
12.3.4. Reverzáló hengersor szűrősterve	79
12.3.5. Hengerlési erő meghatározása.....	80
12.3.6. A hullámképződés mechanizmusa hideghengerlésnél	83
12.3.7. A minimálisan hengerelhető szalagvastagság elmélete.....	88
12.3.8. Hidegen hengerelt szalagok hőkezelése harangkemencében és áthúzó kemencében	89
12.3.10. Kikészítés, egyengetés, húzvaegyengetés	94
13. Fontosabb acélminőségek meleg- és hideghengerlésének technológiája.....	96
13.1. A feldolgozóipar követelményei	96
13.2. Lágycélok meleg- és hideghengerlése	98
13.3. Szerkezeti acélok, mikroötvözött acélok meleg- és hideghengerlése	99
13.4. Korszerű nagyszilárdságú acélminőségek – lakkbeégetéssel keményedő BH acélok, többesfázisú acélok, TRIP és martenzites acélok.....	107
13.4.1. BH – Bake hardening – lakkbeégetéssel keményedő acélok	107
13.4.2. DP és TRIP többes fázisú acélok és martenzites acélok	109
13.5. Elektrotechnikai acélok	112
13.5.1. A nem irányított szemcsés szerkezetű dinamószalagok gyártása	113
13.5.2. Ötvözött irányított szemcsés szerkezetű elektrotechnikai acélok – transzformátor acélok – gyártási lehetősége	115
13.6. Felületbevonás alapanyagai.....	117
13.6.1. Szalag tűzi horganyzás anyagminőségei	117
13.6.2. Elektrolitikus fémbevonások alapanyagai.....	118
13.6.3. Zománcozás.....	118
13.6.4. Acélminőségek tűzi mártó horganyzáshoz.....	120
Irodalomjegyzék.....	122
TESZTFELADATOK	Hiba! A könyvjelző nem létezik.

ELŐSZÓ

Az acél az ipari forradalomtól kezdődően napjainkig valamennyi ipari tevékenység legolcsóbb, és legnagyobb tömegben alkalmazott alapanyaga, mely még belátható jövőben is az marad. A technika gyors fejlődése megköveteli, hogy ez a fontos alapanyag folyamatosan képes legyen az ipar egyre növekvő igényeit maradéktalanul kielégíteni. Ezt a követelményt mind a termék előállításának, mind az acél tulajdonságainak folyamatos fejlesztésével képes kielégíteni. Ezt a feltételt a műszaki tudományok alapján nyugvó újabb ismeretek széleskörű alkalmazása biztosítja. Természetesen az elméleti összefüggések mellett az empirikus – gyakorlati – módszerek továbbra is – mint a teória igazsága bizonyításának „sine qua non”ja továbbra is jelen van. Az acéltermékek előállításának egyik igen fontos fázisa a képlékeny alakítás, ezen belül elsősorban a meleg-, és hideghengerlés, valamint az ehhez közvetlenül kapcsolódó további -, kikészítés, felületbevonás, darabolás, stb. –részműveletek korunk technikájának rohamos fejlődésével szinkron haladjanak.

1. A hengerlés alapfogalmai

1.1. Képlékeny alakítás

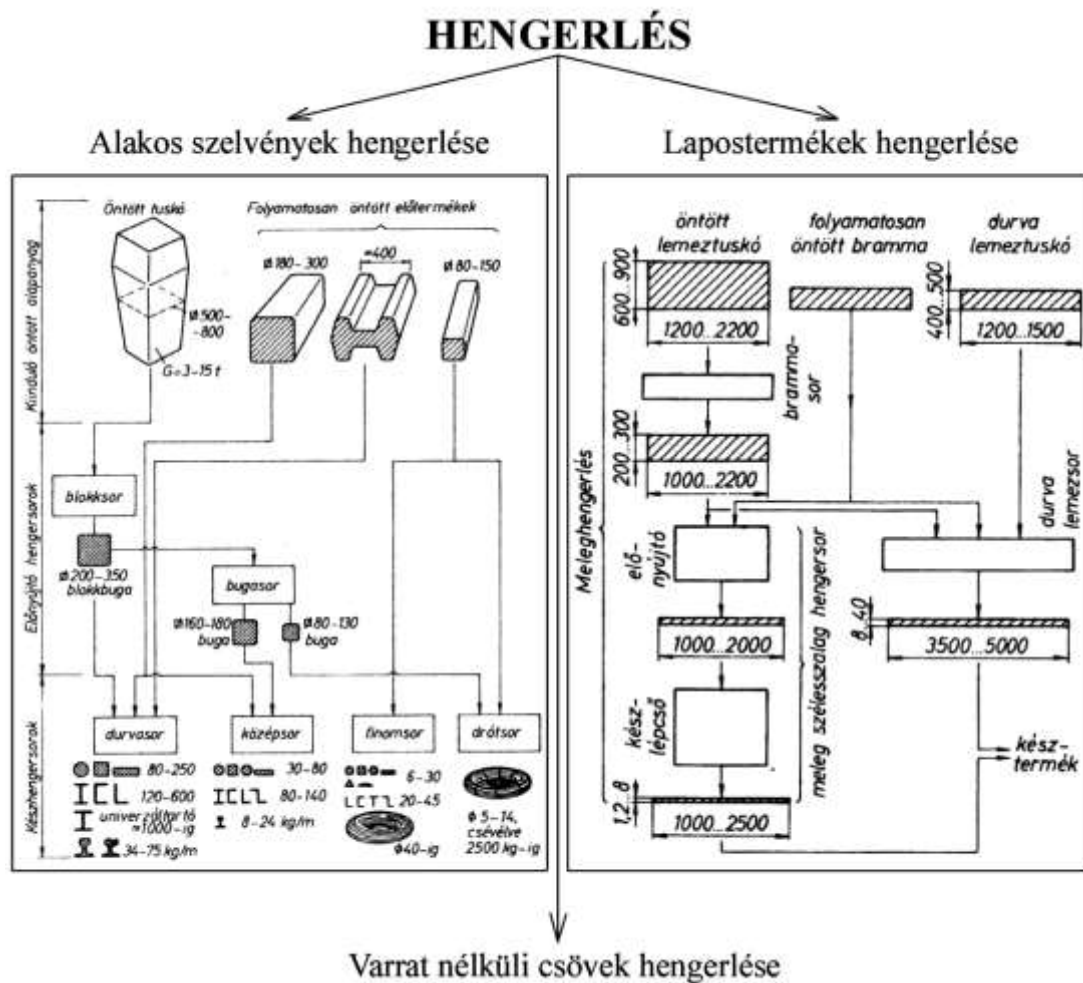
A fémek képlékeny alakítása olyan gyártási módszer, amellyel egy szilárd fémes test alakját egy geometriailag meghatározott más alakra változtatjuk úgy, hogy közben a test tömege változatlan marad és az anyagfolytonosság nem szakad meg. Az ipari alakadásra jellemző a viszonylag nagymértékű alakváltozás, amely feltételezi az alakított fém képlékenységet.

Képlékenység az anyagok olyan tulajdonsága, hogy az alakjuk megfelelő nagyságú külső terhelés hatására maradandóan megváltoztatható. A képlékeny alakításokat foglalja össze az 1.1. táblázat.

1.1. táblázat Képlékeny alakítási eljárások

KÉPLÉKENY ALAKÍTÁSOK				
Kovácsolás	Hengerlés	Sajtolás	Húzás	Egyéb
Szabadon alakító kovácsolás	Alakos szelvények (hosszútermékek) hengerlése	Rúdsajtolás (ídomok, profilok)	Huzalhúzás	Egyengetés
Süllyesztékes kovácsolás	Lapostermékek (szalagok, táblalemezek) hengerlése	Csősaajtolás (üreges szelvények)	Rúdhúzás	Hajlítás
	Varrat nélküli csövek hengerlése		Csőhúzás	Mélyhúzás

A hengerlés jellege, valamint a késztermék szerinti felosztás látható az 1.1. ábrán.



1.1. ábra A hengerelt termékek felosztása

Mint az az ábrából látszik hengerléssel nem csak lapostermékek állíthatók elő, hanem különböző méretű alakos szelvények, rudak, drótok, de varrat nélküli csöveket is lehet készíteni.

1.2. Meleg-, illetve hidegalakítás

A melegalakítás és hidegalakítás fogalmát az újrakristályosodási hőmérsékletek alapján definiáljuk. Ha az alakított darab hőmérséklete az újrakristályosodási hőmérsékletnél kisebb, akkor hidegalakításról, ha nagyobb, akkor melegalakításról beszélünk.

1.3. A hengerlés fogalma

Hengerlés alatt a fémeknek hideg, vagy meleg állapotában forgó hengerekkel történő olyan megmunkálását értjük, amelynek során az anyag előírt mértékű maradószerű - alakváltozást szenved. Ez az alakváltozás az anyag belső mikroszerkezetének változásával jár, amelynek következtében az alakított fém tulajdonságai megváltoznak. Ezért lényegesen különbözik a fémek alakjának forgácsolással történő megmunkálástól, mivel ez utóbbi művelet során csak a termék alakja változik a belső tulajdonságok lényeges változása nélkül.

2. A hengerlés elméleti alapjai

2.1. Elemi hengerlés

A hengerlést folyamatos nyújtókovácsolásként is szokás emlegetni. A hengerlés a gyártott termékek, illetve a hengerek alakja szerint két, jól elkülöníthető eljárásra osztható:

- elemi hengerlés,
- üregben való hengerlés.

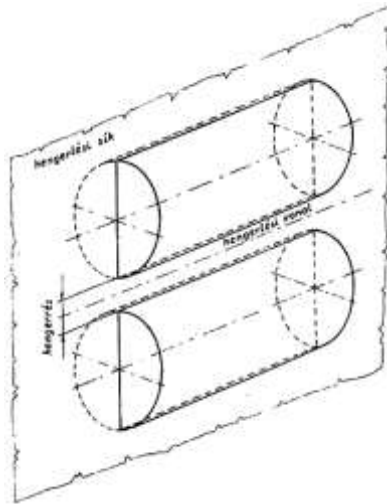
Elemi hengerlésnél az alakítást végző szerszámok geometriai szempontból hengerek és a munkadarab keresztmetszete a hengerlés végrehajtása előtt is és utána is téglalap. Az elemi hengerlés lényegében a lapostermékek (lemezek, szalagok) hengerlését jelenti.

Üregben való hengerlésnél, az „összeforduló” hengerek közötti térész (üreg), amelybe beszúrnák a hengerelni kívánt darabot, az alsó és a felső hengerben lévő körbefutó mélyedésekből alakul ki. Üreges hengerléssel rúd- és idomacél termékek gyárthatók.

Elemi és üregben való hengerléskor a hengerek tengelye párhuzamos. A két párhuzamos hengertengely által meghatározott síkot **hengerlési síknak** nevezzük.

A hengerlési síkban, a két azonos átmérőjű henger tengelyétől egyenlő távolságban helyezkedik el a **hengerlési vonal**. A két hengerpalást egymáshoz legközelebb eső alkotója közötti távolság a **hengerrés**. (2.1. ábra)

Szúrásnak nevezzük a munkadarab egyszeri áthaladását a hengerek között. A kívánt végső szelvényt, illetve méretet több szúrással alakítják ki. A darabnak a hengerek közötti összes áthaladásának számát **szúrásszámnak** nevezzük.

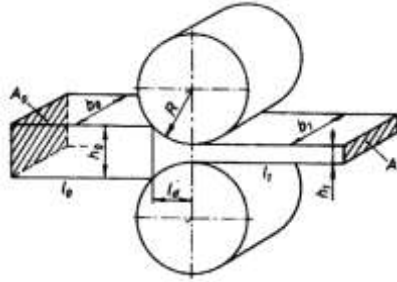


2.1.ábra A hengerlési sík, a hengerlési vonal és a hengerrés

2.2. A hengerelt darab méretváltozásai

A hengerlés olyan folyamatos képlékenyalakító művelet, melynek során a munkadarab magassága (vastagsága) csökken, míg szélessége és hosszúsága nő.

A 2.2. ábrán az elemi hengerlés vázlatát láthatjuk, feltüntetve a hengerelt darab méreteit.



2.2.ábra A hengerelt darab méretváltozásai

Szűrés előtti méretek:	magasság h_0	szélesség b_0	hosszúság l_0
Szűrés utáni méretek:	magasság h_1	szélesség b_1	hosszúság l_1

A magasság és a szélesség szorzatából kapjuk a szűrés előtti (A_0) és a szűrés utáni (A_1) keresztmetszetet.

Magasságcsökkenés

A darab magasságcsökkenése hengerléskor a szűrés előtti és szűrés utáni magasság (vastagság) különbsége.

Abszolút magasságcsökkenés:
$$\Delta h = h_0 - h_1 \text{ (mm)} \quad (1.1.)$$

Relatív (fajlagos) magasságcsökkenés:
$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} \text{ (-)} \quad (1.2.)$$

Százalékban kifejezve:
$$\varepsilon_{h(\%)} = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (1.3.)$$

Szélesedés

A szélesedés a szűrés utáni és szűrés előtti szélesség különbsége.

$$\Delta b = b_1 - b_0 \text{ (mm)} \quad (1.4.)$$

Fogyás

A darab hengerlési síkkal párhuzamos keresztmetszete a szűrés előtt, illetve után:

$$A_0 = h_0 \cdot b_0 \text{ (mm}^2\text{)}, \quad A_1 = h_1 \cdot b_1 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (1.5.) \quad (1.6.)$$

A két keresztmetszet különbsége a keresztmetszet-csökkenés, vagy másképpen fogyás, a hengerlést jellemző egyik legfontosabb adat.

Abszolút fogyás:
$$\Delta A = A_0 - A_1 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (1.7.)$$

Relatív (fajlagos) fogyás:
$$\varepsilon_{A(\%)} = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (1.8.)$$

Megnyúlás

A megnyúlás a hengerelt darab hosszúságnövekedése az alakítás során.

Abszolút megnyúlás:
$$\Delta l = l_1 - l_0 \text{ (mm)} \quad (1.9.)$$

Relatív (fajlagos) megnyúlás:
$$\varepsilon_{l(\%) } = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (1.10.)$$

Nyújtási tényező

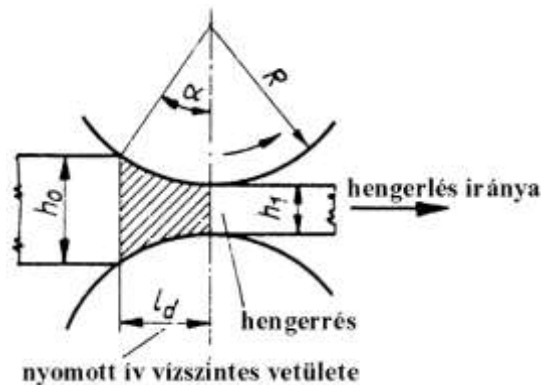
A hengerelt darab szúrásokénti meghosszabbodásának mértékét fejezi ki:

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} \text{ (-)} > 1 \quad (1.11.)$$

A λ értéke mindig nagyobb 1-nél, hiszen a szúrás keresztmetszet-csökkenést, ezáltal meghosszabbodást eredményez.

2.3. Nyomott ív, nyomott felület

A nyomott ív tulajdonképpen a munkadarab és a hengerek érintkezési íve. Elnevezése onnan ered, hogy hengerlés közben a munkadarab nyomást fejt ki a hengerekre (és viszont), és ez a nyomás a három test (a munkadarab és a két henger) érintkezési ívében, a nyomott íveken érvényesül. A számításoknál ennek az érintkezési ívnek a vízszintes vetületét használják (2.3. ábra).



2.3. ábra A nyomott ív

Ezt a vízszintes szakaszt l_d -vel jelöljük, kiszámítása a magasság csökkenés és a hengersugár ismeretében:

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} \text{ (mm)}, \quad (2.1.)$$

ahol l_d a nyomott ív hossza (mm),
 R a henger sugara (mm),
 Δh a magasságcsökkenés (mm).

Ez az összefüggés nem deformálódott hengerek esetén érvényes. Valóságban a hengerek munka közben belapulnak, a nyomott ív megnő. Ez azt eredményezi, hogy a kihengerelt szalag vastagsága nagyobb lesz a beállított hengerrésnél.

A nyomott felület a nyomott ív fogalmából értelemszerűen adódik, tehát a darab és a hengerek érintkezési felülete. A nyomott ív és a közepes darabszélesség szorzataként számítható:

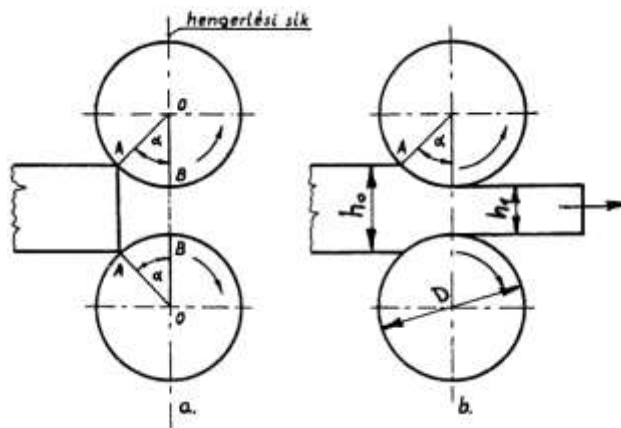
$$A_d = l_d \cdot b_k \text{ (mm}^2\text{)}, \quad (2.2.)$$

ahol A_d nyomott felület (mm^2),
 b_k a darab közepes szélessége (mm),
 l_d nyomott ív (mm).

2.4. Befogási szög, befogás feltétele, áthúzási feltétel

A hengerlési folyamat a befogással kezdődik. Befogásnak nevezzük azt a folyamatot, amikor a hajtott hengerek maguk közé behúzzák a munkadarabot (2.4. ábra)..

A befogás végén látható, hogy a munkadarab a nyomott ív mentén érintkezik a hengerek palástjával. A nyomott ív két pontja (A és B), valamint a henger középpontja által meghatározott szöget befogási szögnek nevezzük. **A befogási szög nem más, mint a nyomott ívhez tartozó középponti szög.**



2.4. ábra A befogási szög

A hengerlésnél arra törekednek, hogy minél nagyobb nyomásokkal és így minél kevesebb szűrőszámmal ériék el a végső szelvény méretet. Azonban egy adott hengerátmérőnél a magasságcsökkentésnek (a befogási szög növelésének) határt szab a henger és a darab között fellépő súrlódás mértéke.

A hengerlendő darabokat csak akkor képesek a hengerek behúzni, ha a befogási szög tangense kisebb, mint a súrlódási tényező. Ez a befogás feltétele, vagyis

$$\operatorname{tg} \alpha < \mu \quad (2.3.)$$

ahol μ (-) a súrlódási tényező.

A befogás tehát akkor megy könnyen végbe, ha nagy a súrlódási tényező, és ha kicsi a befogási szög.

A hengerlés geometriai viszonyaiból meghatározható az a maximális magasságcsökkenés, melyet egy adott szűrásban el lehet érni.

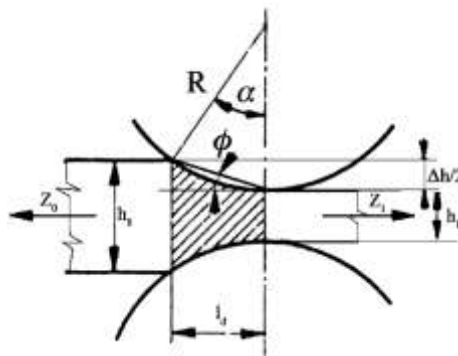
$$R = R \cdot \cos \alpha + \frac{\Delta h}{2} \Rightarrow \Delta h = D(1 - \cos \alpha) \text{ (mm)} \quad (2.4.) \text{ (2.5.)}$$

vagyis

$$\Delta h_{max} = D(1 - \cos \alpha_{max}) \text{ (mm)}, \quad (2.6.)$$

ahol D a hengerátmérő (mm),
 α a befogási szög,
 Δh a magasságcsökkenés (mm).

Akkor, amikor a hengerelt darab a hengerek között van, lehetséges olyan körülményt elérni, amikor a súrlódó erő kisebb lesz, mint az alakítóerő vízszintes irányú összetevője. Vagyis egy bizonyos geometriai feltételkor elérhető az az eset, amikor a darab megcsúszik a hengerek között. A befogási feltételhez hasonlóan meghatározható az áthúzás feltétele és meghatározható az a maximális magasságcsökkenés, aminél a hengerelt darab még biztonsággal áthalad a hengerek között (2.5. ábra).



2.5. ábra Az áthúzás feltétele

A hengerlendő darabokat csak akkor képesek a hengerek átjuttatni a hengerrésen, ha a befogási szöghöz tartozó magasságcsökkenési szög (φ , $\varphi = \alpha/2$) tangense kisebb, mint a súrlódási tényező. Ez az áthúzás feltétele, vagyis

$$\operatorname{tg} \varphi < \mu \quad (2.7.)$$

ahol μ (-) a súrlódási tényező.

Ebből a feltételből és a geometriai viszonyokból meghatározható az a maximális magasságcsökkenés, melyet egy adott szúrában el lehet érni.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta h}{2} \cdot \frac{1}{l_d} \Rightarrow \Delta h = \mu \cdot 2 \cdot l_d \text{ (mm)} \quad (2.8.) \text{ (2.9.)}$$

vagyis

$$\Delta h_{max} = \mu \cdot 2 \cdot l_d \text{ (mm)} \quad (2.10.)$$

Hideghengerlésnél gyakran használnak feszítést hengerléskor, melynek az a hatása, hogy csökken a hengerlési erő. Pontosabb meghatározására később térünk ki. Feszítéssel történő hengerléskor az áthúzás feltételénél a következő feltételnek is meg kell felelni:

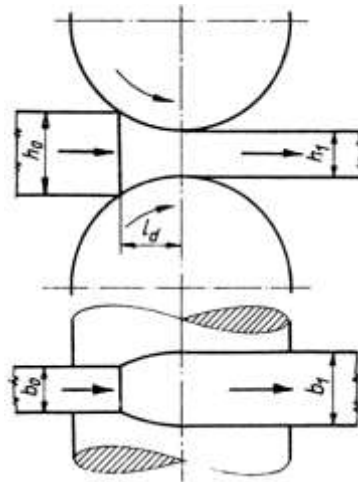
$$Z_0 < z_1 + \mu \cdot 2 \cdot l_d \quad (2.11.)$$

ahol Z_0 a fékezőerő (N),
 Z_1 a húzóerő (N).

2.5. Szélesedés jelensége elemi hengerlésnél

Hengerlés közben a darab magassága csökken, szélessége pedig növekszik. Szélesedésnek a darab szélességének növekedését nevezzük.

Szabad szélesedésről beszélünk, ha a szélesség növekedését külső körülmény nem akadályozza. Elemi hengerlésnél szabad szélesedésről beszélhetünk. A szélesedésről mutat elméleti sémát a 2.6. ábra.



2.6. ábra Szabad szélesedés hengerléskor

A szélesedés kiszámítása:

Abszolút szélesedés $\Delta b = b_1 - b_0$ (mm), (2.12.)

Relatív szélesedés: $\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_1} = \frac{b_1 - b_0}{b_1}$ (-), (2.13.)

Százalékban kifejezve: $\varepsilon_{b(\%)} = \frac{\Delta b}{b_1} \cdot 100 = \frac{b_1 - b_0}{b_1} \cdot 100$ (%). (2.14.)

A szélesedés számszerű megadása a szélességek mérésével viszonylag nehézkes, mivel a hengerek közül kijövő darab oldalfelületei általában domborúak.

A szélesedés ismerete, hengerlés előtti számítása előnyújtó soroknál igen fontos. Mivel a szélesedést nagyon sok körülmény befolyásolja, a szélesedés mértékének meghatározására használatos képletek is többé-kevésbé bonyolultak. Mi csak a legegyszerűbbeket nézzük meg.

Azt, hogy egy szúrásban mekkora a szélesedés, leginkább a geometriai viszonyok határozzák meg, így:

- a magasságcsökkenés (Δh),
- a hengerelt darab szélessége (b_0),
- a hengerátmérő (D_h).

Ezen kívül hatással van még rá a súrlódási tényező, a hőmérséklet, a hengerlési sebesség és az anyagminőség.

A szélesedés meghatározása a következőképpen történhet:

Geuze (Göz)-féle képlet:
$$\Delta b = 0,35 \cdot \Delta h \text{ (mm)}, \quad (2.15.)$$

Siebel (Zibel) szerint:
$$\Delta b = 0,35 \cdot l_d \cdot \frac{\Delta h}{h_0} \text{ (mm)}, \quad (2.16.)$$

Tapasztalatok alapján elmondható, hogy a szélesedés a szúrásonkénti magasságcsökkenéstől függ leginkább, s megközelítőleg a magasságcsökkenés 1/3-ával egyenlő.

$$\Delta b = \frac{\Delta h}{3} = \frac{h_0 - h_1}{3} \text{ (mm)}, \quad (2.17.)$$

Ha szélesebb a hengerlésre kerülő anyag, akkor a szélesedés során nagy mennyiségű anyagnak kell oldalirányban elcsúszni, ilyenkor az anyag inkább a hengerlés irányában áramlik és azonos magasságcsökkenés esetében kisebb szélesedést kapunk. Kisebb átmérőjű hengerek azonos magasságcsökkenés esetén jobban nyújtanak és kevésbé szélesítenek. Minél nagyobb a hengerátmérő, annál nagyobb a szélesedés.

A súrlódási tényezővel kapcsolatban egyértelműen megállapítható, hogy ha nagyobb a súrlódási tényező, akkor nagyobb a szélesedés is. Maga a szélesedés tehát függ mindazoktól a tényezőktől, amelyekről a súrlódási tényező függ. (hengerlési hőmérséklet, hengerlési sebesség, stb.)

Nagyobb hengerlési sebességnél kisebb, lassú hengerlésnél nagyobb a darab szélesedése.

Kisebb hőmérsékletű darab jobban szélesedik, mint a nagyobb hőmérsékletű.

Szalagok hideghengerlésénél a szélesedés elhanyagolhatóan kicsi ($\Delta b = 0$). A szélesedésnek elemi hengerlésnél csak előnyújtó-sorokon van jelentősége.

2.6. Súrlódás a hengerrésben

A hengerléskor, mint láttuk, a befogás feltételének tárgyalásakor nagy szerepe van a súrlódásnak. A súrlódás teszi egyáltalán lehetővé, hogy a hengerek a darabot befogják. A súrlódás jelensége nélkül a hengerlés elképzelhető sem lenne. A befogás és áthúzás szempontjából a minél nagyobb súrlódási tényező a kedvező.

A súrlódás összes többi velejárója a hengerlés területén is káros. Ha nő a súrlódás az érintkező felületeken, akkor nagyobb lesz a fajlagos hengerlési nyomás. Ez általában nem kívánatos, mert több energiát kell befektetni a hengerlés folyamatába.

Fontos tényező az is, hogy a súrlódás hatására kopik a hengerek felülete, ami káros hatással van a hengerelt darabok méretpontosságára és felületminőségére.

2.7. Hengerlés sebességviszonyai

Hengerlési sebesség

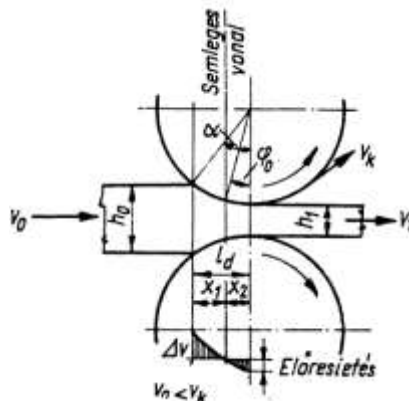
A gyakorlatban nagyon lényeges fogalom a *hengerlés sebessége*, a *hengereket elhagyó darab sebessége*. Ez közel megegyezik a hengerek kerületi sebességeivel, gyakorlati számításainknál ezzel számolunk a hengerátmérő és a fordulatszám ismeretében:

$$v_k = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60} \text{ (m/s)}, \quad (2.18.)$$

ahol D hengerátmérő (m),
 n fordulatszám (l/perc).

A tapasztalat azt mutatta, hogy a hengerrésből kifutó darab sebessége (v_1) nagyobb, mint a hengerek kerületi sebessége (v_k). A hengerrésben tehát a nyomott ív mentén változóak a sebességi viszonyok, a darab és a henger sebessége nem a hengerlési síkban egyeznek meg, hanem a hengerlési sík előtt, azzal párhuzamos, a nyomott ívet metsző síkban. Azt a síkot, amely magában foglalja azt a pontot, amelyben a hengerek és a darab érintkező pontjainak vízszintes irányú sebessége megegyezik, **semleges síknak**, vetületét **semleges vonalnak** nevezzük. A semleges sík és a nyomott ív metszéspontjához tartozó φ (fi) szög a semleges szög. A korábban megismert szélesedés a semleges síkig teljesen végbemegy, a semleges sík és a hengerlési sík között a darab már nem szélesedik.

A hengerlés irányában a semleges síktól a belépési oldal felé eső tartományban a darab sebessége kisebb, mint a hengerek sebessége. Ezt a jelenséget a darab **visszamaradásának** nevezzük. A semleges síktól a kilépési oldal felé eső tartományban a darab sebessége nagyobb, mint a henger sebessége (2.7. ábra). Ezt a jelenséget nevezzük **előresietésnek**.



2.7. ábra Előresietés, semleges vonal

Alakváltozási sebesség

Az **alakváltozási sebesség** az időegység alatt végbement relatív alakváltozás. Legtöbb alakítóműveletnél a szerszámok mozgási sebességéből számítható. Hengerléskor a darab magasságsökkenése a nyomott ív elfordulása alatt megy végbe. Az alakváltozási sebesség (w) hengerléskor a következő összefüggésből számítható:

$$w = \frac{\varepsilon_h}{t} = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot \frac{l}{t} \quad (I/s), \quad (2.19.)$$

$$t = \frac{l_d}{v_k} \quad (s), \quad (2.20.)$$

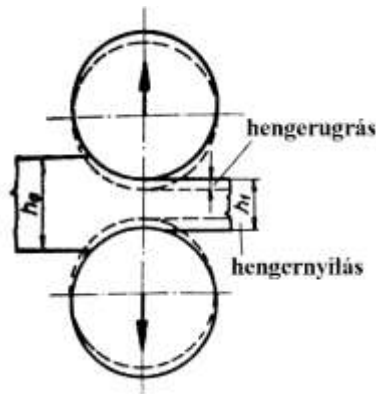
$$w = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot \frac{v_k}{l_d} \quad (I/s), \quad (2.21.)$$

ahol t nyomott ív elfordulásának ideje (s),
 Δh magasságsökkenés (mm),
 h_0 szűrés előtti darabmagasság (mm),
 v_k hengerek kerületi sebessége (m/s),
 l_d nyomott ív (mm).

Hengerrés

Az együtt dolgozó hengerek felületei közötti távolságot **hengerrésnek** nevezzük.

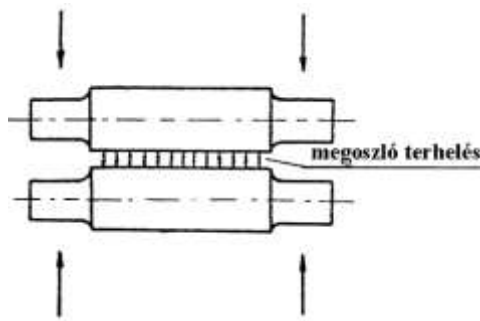
A darab beszűrésakor a hengerekre ható erők következtében az erő hatásvonalába eső szerkezetek (hengerek, csapágyak, állítóorsó, hengerállvány) rugalmas alakváltozást szenvednek, az előre beállított hengerrés nagyobb lesz. A hengerrés megnövekedését a darab beszűrésakor **hengerugrásnak** nevezzük. A valóságban tehát a hengerek közül kifutó darab vastagsága a hengerugrás mértékével nagyobb lesz, mint amekkora az előre beállított hengerrés volt (2.8. ábra).



2.8. ábra Hengerrés és a hengerugrás

A hengeralak, hengerrésalak

A hengerek két végükön csapágyazva vannak, ezért egy-egy henger valamilyen megoszló terheléssel terhelt, körkeresztmetszetű kéttámaszú tartónak fogható fel. (2.9. ábra)



2.9. ábra A hengerek terhelése

Bármilyen nagy a hengerek keresztmetszete, a terhelés hatására a **hengerek meghajlanak**. A hengerek alakja nem csak a terhelés hatására változik, hanem a hengerek felmelegedéséből adódó átmérő-, illetve domborodás változással is számolni kell. A hengeralakra és résalakra a henger kopása is erősen befolyással van.

Mindezek következménye, hogy a hengerek egymáshoz képesti távolsága nem lesz azonos a henger testhossza mentén, a hengerelt darab szélességének irányában. A hengerek behajlása a darab egyenlőtlen alakváltozását okozhatja, ami síkfekvési problémákhoz is vezethet. A hengerek meghajlásának kompenzálására többfajta technológiát fejlesztettek ki.

3. Az acél viselkedése a hengerrésben

3.1. Az acél mikroszerkezetében végbemenő folyamat meleg hengerléskor

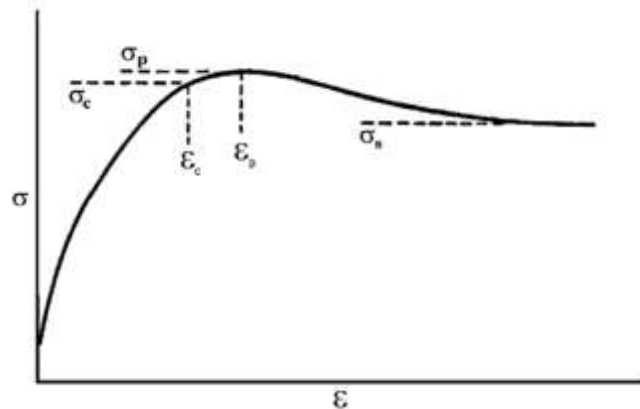
A különböző fémek mind hideg, mind meleg állapotban képlékenyek. Az, hogy egy fém állapota milyen hőmérséklet tartományban tekinthető hidegnek, illetve melegnek alapvetően az adott fém (- ötvözet) olvadáspontja határozza meg. Ezt legegyszerűbben az anyag homológ hőmérsékletével (T_h) tudjuk egységesen kifejezni:

$$T_h = \frac{T_{akt}}{T_{olv}} \quad (3.1.)$$

Ahol T_{akt} a fém tényleges hőmérséklete, K°
 T_{olv} az adott fém olvadáspontja K° -ban kifejezve.

Az így megadott hőmérséklet értékei minden fémre vonatkozóan 0 és 1 között lehet. A hideg és meleg alakítás tartományát elválasztó homológ hőmérséklet 0,42...0,45 közötti érték. Bár ez a határ átmeneti jellegű, mégis a két tartományban valamennyi fém – így az acél is – alapvetően különbözőképpen viselkedik. Ezt az eltérést az alakítási szilárdságnak, mint a képlékeny alakváltozás fontos mérőszámának, változásában nyilvánul meg. Az alakítási szilárdság, a fémek képlékeny alakváltozásának – egytengelyű feszültségi állapotban mért - valódi feszültség függvénye. A hideg alakítási tartományban az alakítási szilárdság az alakváltozás növekedésével a fém töréséig végig növekedik (keményedés).

Ezzel ellentétben a fém meleg állapotában a folyamatos alakítás során először keményedik, majd egy bizonyos alakváltozás után az alakítási szilárdság növekedése megáll, vagy elkezd csökkenni (3.1. ábra).



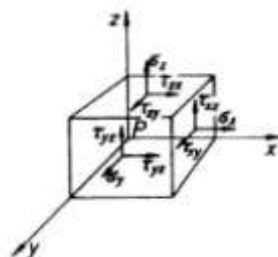
3.1. ábra Alakváltozás-alakítási szilárdság görbe

A fémek melegalakításának ezek a jellemzői a képlékeny alakváltozás belső szerkezeti mechanizmusával és a diffúzió jelenségével magyarázható. Mint ismeretes a gyakorlatban használt valamennyi fém sok kristallitból álló mikro szerkezettel rendelkezik. A kristallitokon belül a külső alakító erők hatására különböző irányú elcsúszások keletkeznek. Az elcsúszás egyszerre nem a teljes atomsorokon megy végbe, hanem a hiányos atomú rácsok síkján. A hiányos rács ezen helyét diszlokációnak nevezik.

A kristályrácsok között található diszlokációk kétfélek lehetnek, úgymint a szabad, amelyek - a külső erők hatására - szabadon haladva létrehozzák a rács síkjainak elcsúszását, valamint a blokkolt diszlokációk, amelyek csökkent mozgóképességgel rendelkeznek valamilyen akadály miatt. Minél nagyobb a blokkolt diszlokációk száma, annál nagyobb külső erő kell a adott síkokon történő elcsúszáshoz, tehát a képlékeny fém keményedik. Lényegében tehát a keményedés mértéke a blokkolt diszlokációk számától függ.

3.2. Feszültségállapot a hengerelt darabban

A képlékeny alakváltozás létrehozásához külső erőkre van szükség. A külső erőrendszerekkel egyensúlyt tartó belső erőrendszert a felületegységre ható erőkkel, a feszültségekkel írják le. Egy síkra ható erő felbontható a síkra merőleges normál- (σ), és a síkba eső csúsztatófeszültség (τ) összetevőre (3.2. ábra).



3.2. ábra Többtengelyű feszültségállapot

Elemi hasábon a kétfajta feszültség 3 irányban, 3 normál és 3 csúszatófeszültséggel jellemezhető, ezek a főfeszültségek. A képlékeny alakváltozás csúszási mechanizmusában fontos szerepük van a főnyírófeszültségeknek. Amennyiben $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, akkor a legnagyobb csúszatófeszültség:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (N/mm^2) \quad (3.2.)$$

A képlékeny alakváltozás mindig a terhelőerővel 45° -os szöget bezáró síkon indul meg. Azt az összefüggést, mely megadja a feszültségek olyan kombinációját, amelyek fennállásakor a képlékeny alakváltozás megindul, **képlékenységi feltételnek** nevezzük:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k) = 0 \quad (3.3.)$$

Alakítási szilárdság

Az alakítási szilárdság az egytengelyű feszültségállapothoz tartozó folyáshatár, vagyis a darabot csak egy irányban terhelve (pl szakítóvizsgálat) mért folyáshatár.

Egy szobahőmérsékletű darab alakítási szilárdságát többtengelyű feszültségállapotból többen is meghatározták. A legfontosabb összefüggések a következők, melyeket folyási feltételnek nevezünk:

Huber-Mises-Hencky:

$$k_f = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (N/mm^2) \quad (3.4.)$$

Mohr-Tresca:

$$k_f = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (N/mm^2) \quad (3.5.)$$

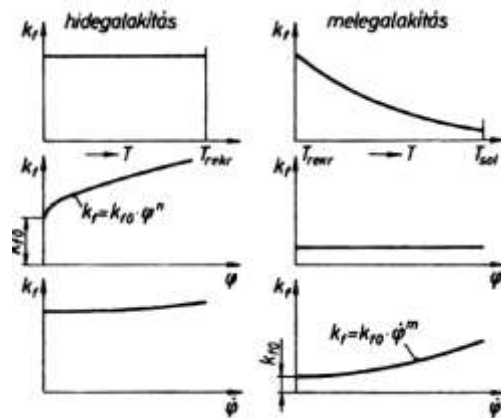
A képlékeny alakváltozás megindul, ha a redukált feszültség eléri a fémes anyagra és az alakítás körülményeire jellemző alakítási szilárdságot (k_f). Az alakítási szilárdság az anyag folyáshatára az alakítás hőmérsékletén.

Az alakítási szilárdság meghatározására a következő összefüggést használták széleskörűen:

$$k_f = k_0 \cdot K_T \cdot K_\varphi \cdot K_\dot{\varphi} \quad (N/mm^2) \quad (3.6.)$$

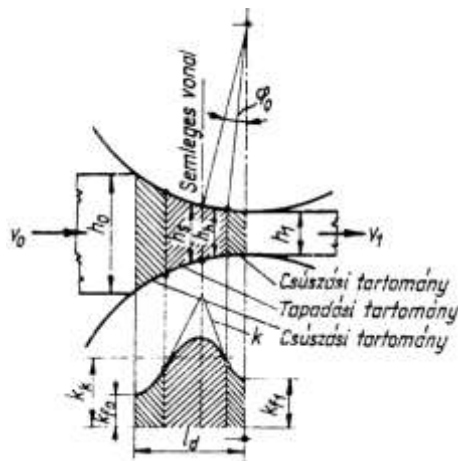
ahol k_0 csak az anyag összetételétől függő folyáshatár (N/mm^2),
 K_T az alakítási szilárdság hőmérséklet függvénye,
 K_φ az alakítási szilárdság alakváltozás függvénye,
 $K_\dot{\varphi}$ az alakítási szilárdság alakváltozási sebesség függvénye.

A jellemző függvénykapcsolatokat a meleg, illetve hidegalakításra vonatkoztatva, elvi vázlat mutatja a 3.3. ábra.



3.3. ábra Az alakítási szilárdság változása

Az **alakítási szilárdság** a hengerrésben folyamatosan változik, merthogy függ az alakváltozás mértékétől és sebességétől. Az alakítási szilárdság hengerrésbeni változását szemlélteti a 3.4. ábra.



3.4. ábra Az alakítási szilárdság eloszlása a nyomott ív mentén

Az alakítási szilárdság legnagyobb értéke a semleges vonalban van és a belépő keresztmetszetben a legkisebb. A nyomott ív mentén két jellegzetes szakasz különböztethető meg: a csúszási és tapadási tartomány. A csúszási tartományban a henger és a darab között relatív csúszás van, a tapadási tartományban nincsen.

Alakítási ellenállás

Az alakítási ellenállás voltaképpen az a fajlagos alakítóerő, mely az egységnyi nyomott felületen ébred. Így a mért alakítóerőből és a szerszámmal érintkező nyomott felületből számítható.

$$k = \frac{F_{al}}{A} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3.7.)$$

Mivel a fajlagos alakítóerő nagymértékben függ azokról a tényezőktől, amiktől az alakítási szilárdság függ származtatható belőle. Mindemellett igaz az is, hogy az alakítási szilárdság a hengerrésben nem állandó, mivel az alakváltozás mértéke és sebessége is pontról pontra

változik. Éppen ezért számításoknál nem tudjuk az effektív értékét meghatározni, így a közepes alakítási ellenállásra van szükségünk, mely a következőképpen határozható meg:

$$k_k = \frac{F_{al,k}}{A_k} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3.8.)$$

3.3. Finomabb szemcséket eredményező mechanizmusok

A hengerlési technológiák arra törekednek, hogy hengerelt termék szemcsézete minél finomabb legyen. Az ausztenit már nem kristályosodik újjá, hanem megmarad az alakításra jellemző nyújtott állapotában. Ebből az átalakulás során lényegesen finomabb szekunder szövet keletkezik. Ezt a határhőmérsékletet bizonyos típusú ötvözők (mikroötvöző elemek) a nagyobb hőmérséklet irányában tolják el. Legerősebb hatása a niobiumnak és a titánnak van, az előbbinek 0,01 százaléka már mintegy 60 ... 70 Kelvinnel, míg ez utóbbi ennek mintegy felével növeli az újrakristályosodás alsó határ hőmérsékletét. Az átalakulás eredményeként keletkező ferrit olyan kisméretű szemnagyságú lesz, mintha a nyújtott ausztenit legvékonyabb mérete lenne az átalakulás előtti átlagos átmérője. Tehát a hengerről kifutó ferrit finomabb szövetű lesz, mint a normális ausztenit- ferrites átalakulása. Ezért a szemcsefinomító hengerlés-technológiát csak pontos hőmérsékletvezetés mellett lehet megvalósítani.

Mikroötvöző jelenléte nélkül a szövetet szintén finomítja, az alacsonyabb hőmérsékleten történő alakítás. Az alacsonyabb hőmérséklet a szemcsék későbbi növekedésének sebességét csökkenti.

4. A hengerlés energetikai viszonyai

Az acélok hengerlésével összefüggő energia szükségletet a darab szúrásakor a berendezés (hengerállvány főegységei) oldaláról, és nem a darab makro szerkezetének oldaláról vizsgáljuk. Ez utóbbira a technológiának a termék tulajdonságát biztosító fejezetnél került sor. A berendezések fő részeit terhelő mechanikai paraméterek láncolata az alábbi:

Hengerlési erő > hengerlési nyomaték > hengerlési teljesítmény > hengerlési munka.

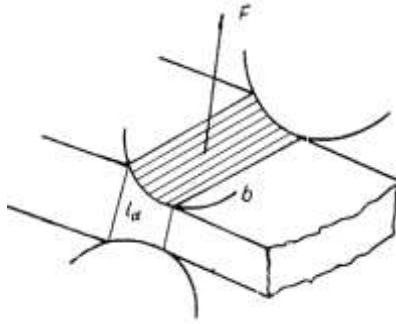
4.1. Hengerléskor fellépő erő

A darabbal érintkező hengerfelülettel (nyomott felület) kifejtett erőhatás a hengerlési nyomás, amelynek következtében a darab magassága és keresztmetszete csökken, a hossza megnő.

Hengerléskor működő két erő: a hengerlési erő és a súrlódási erő. A **hengerlési erőt** megkapjuk, ha a nyomott felületet megszorozzuk a fajlagos nyomóerővel (4.1. ábra). A fajlagos nyomóerőt az előző fejezetből már ismert alakítási ellenállásnak nevezzük és ennek közepes értékével számolunk.

$$F_h = k_k \cdot A_d = k_k \cdot l_d \cdot b_k \text{ (N)}, \quad (4.1.)$$

ahol k_k közepes alakítási ellenállás (N/mm²),
 b_k közepes darabszélesség (mm),
 l_d nyomott ív hossza (mm).



4.1. ábra Hengerlési erő

Hengerlés közben az érintkező felület mentén **súrlódó erő** (F_s) lép fel, amely a hengerlési erő és a súrlódási tényező szorzata:

$$F_s = \mu \cdot F_h \text{ (N)} \quad (4.2.)$$

Ennek vízszintes irányú vetülete a hengerlés irányában ható erő, amely a darabot a hengerek közé behúzza.

4.2. Hengerlési nyomaték

A hengerek forgatásához nyomatékot kell kifejteni. A hengerlési nyomaték biztosítja a hengerelt darab képlékeny alakváltozását és legyőzi a henger csapágyaiban jelentkező súrlódási nyomatékot. Reverzáló hengersorokon a forgó részek (hengerek, kapcsolóorsók, stb.) felgyorsításához ún. gyorsító nyomaték is szükséges.

Hideghengersoroknál a húzás és feszítés is növeli a nyomatékszükségletet.

A hengersor meghajtásához szükséges összes nyomaték az alábbi értékekből tevődik össze:

$$M_{\ddot{o}} = M_a + M_{cs} + M_{\ddot{u}} + M_{gy} + M_{HF} \text{ (Nm)}, \quad (4.3.)$$

ahol: M_a az alakítási nyomaték (Nm),
 M_{cs} csapsúrlódási nyomaték (Nm),
 $M_{\ddot{u}}$ üresjárési nyomaték, amely a hengersor meghajtóelemeinek nyomatéka (Nm),
 M_{gy} gyorsító nyomaték (Nm),
 M_{HF} szalagfeszítés és húzásból adódó nyomaték (Nm).

Az egyes résznyomatékok a következő összefüggésekkel számíthatók ki:

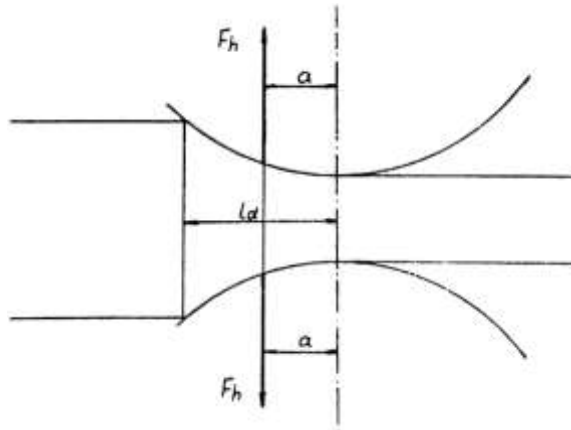
Alakítási nyomaték: két hengerre számolva (4.2. ábra):

$$M_a = 2 \cdot F_h \cdot a = 2 \cdot F_h \cdot m \cdot l_d \text{ (Nm)} \quad (4.4.)$$

$$m \approx 0,5$$

$$M_a = F_h \cdot l_d \text{ (Nm)}, \quad (4.5.)$$

ahol: F_h hengerlési erő (N),
 l_d nyomott ív (mm).



4.2. ábra Alakítási nyomaték meghatározása

Csapsúrlódási nyomaték:

$$M_{cs} = 2 \cdot F_h \cdot \mu_{cs} \cdot r_{cs} \quad (Nm), \quad (4.6.)$$

ahol F_h hengerlési erő (N),
 μ_{cs} csapsúrlódási tényező,
 r_{cs} a henger csap sugara (m).

Üresjárási nyomaték:

$$M_{ü} = 975 \cdot \frac{N_{ü}}{n_{ü}} \quad (Nm), \quad (4.7.)$$

ahol $N_{ü}$ az üresjárási teljesítményszükséglet (kW),
 $n_{ü}$ üresjárási fordulatszám (ford/perc).

Gyorsítási nyomaték:

$$M_{gy} = \frac{(GD^2)}{375 \cdot t_{gy} \cdot n} \quad (Nm), \quad (4.8.)$$

ahol (GD^2) az összes forgó tömeg lendítő nyomatéka (Nm²),
 n felgyorsítás utáni fordulatszám (1/perc),
 t_{gy} gyorsítási idő (s).

Szalagfeszítés (fékezés, hátrahúzás) és húzásából adódó nyomaték:

$$M_{HF} = (T_F - T_H) \cdot 2R \quad (Nm), \quad (4.9.)$$

ahol T_F fékezőerő (N),
 T_H húzóerő (N),
 R hengersugár (m).

4.3. A hengerlés teljesítmény-szükséglete

A hengerlés teljesítményszükségletét a nyomatékszükséglet alapján határozhatjuk meg, amely szintén több részből tevődik össze. Állandó fordulatszámú hengersorok teljesítmény-szükséglete:

$$P_{\dot{\theta}} = P_a + P_{cs} + P_{\ddot{u}} \text{ (kW)} \quad (4.10.)$$

ahol P_a az alakítás teljesítmény-szükséglete (kW),
 P_{cs} a csapsúrlódás teljesítmény-szükséglete (kW),
 $P_{\ddot{u}}$ üresjárás teljesítmény-szükséglet (kW).

Gyorsítós hengerlésnél a gyorsítás teljesítmény szükséglete a gyorsítás nyomatékigényétől függ.

$$P_{gy} = M_{gy} \cdot \Delta\omega \text{ (kW)} \quad (4.11.)$$

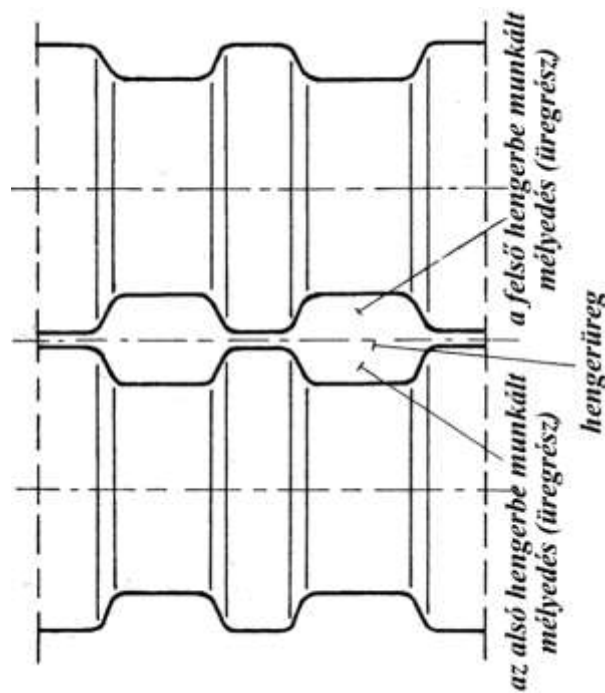
Ahol M_{gy} gyorsítási nyomaték (Nm)
 $\Delta\omega$ szögsebesség (1/s)

5. Hosszútermékek hengerlésének technológiája

A hosszútermékek tulajdonképpen az alakos szelvények, melyekről az 1.1. fejezetben már szót ejtettünk. Az alakos szelvények előállításának egyik módja a hengerlés. Acélok esetén gyakorlatilag csak hengerlés jöhet szóba, alumínium esetén sajtolást is alkalmazhatnak. Alakos szelvény hengerlésénél a kész szelvényt egy kiinduló – jellemzően négyzet keresztmetszetű – anyagból, több szúrásos, alakváltozáson keresztül kapjuk meg.

5.1. Üreges hengerek

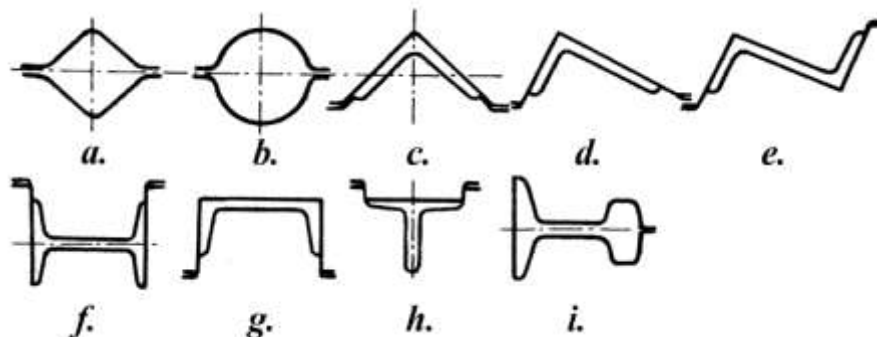
Lapostermékeket sima felületű hengerrel alakítanak, alakos szelvényeket pedig üreges hengerekkel. A hengerüreget a hengerek palástfelületén gyűrűalakban, koncentrikusan körbefutó mélyedések képezik. Az 5.1. ábrán egyszerű hengerüregek láthatók. (hengerlésI)



5.1. ábra Egyszerű hengerüregek

A készüreg megfelel a kész szelvény alakjának, természetesen a hőtágulást figyelembevéve. Az ismert meleg készszelvény és a kiinduló méret alapján megállapíthatók az alakítási fokozatok, azaz a szúrások száma. Ennek alapján az ismert meleg kész szelvény méretéből már kiszámíthatók és megszerkeszthetők a közbenső üregek méretei és alakjuk. (Képlékeny alakítás II.)

Az együtt dolgozó hengerek palástjába bemunkált üregek elnevezése rendeltetésük és alakjuk szerint történik. A készüregek (5.2.ábra) meleghengeléskor a kész szelvény alakjával, méretük a hengrelendő kész szelvény melegméretével azonos.

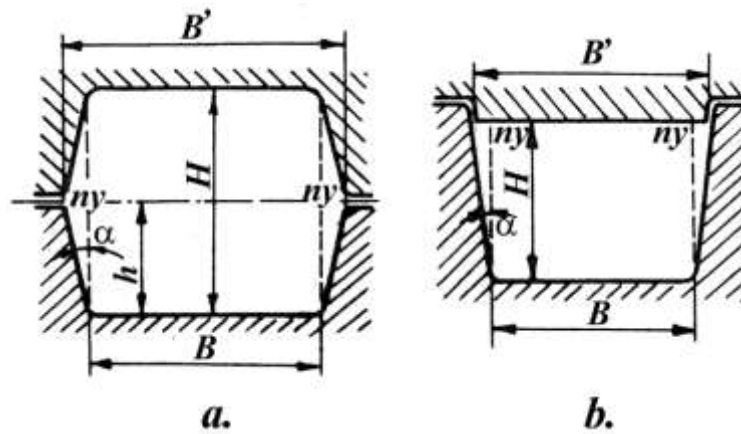


5.2. ábra Készüregtípusok

a) négyzet; b) kör; c) egyenlőszárú sarokacél; d) egyenlőtlen szárú sarokacél; e) Z-szelvény; f) I-szelvény; g) U-szelvény; h) T-szelvény; i) nagyvasúti szelvény

5.1.1. Nyitott és zártüreg

Az üregnyitás (ny) két együtt dolgozó henger üregét határoló kerületének metszéspontjának a helye (5.3.ábra).



5.3. ábra Nyitott (a), és zárt (b) négyszögkeresztmetszetű üregek

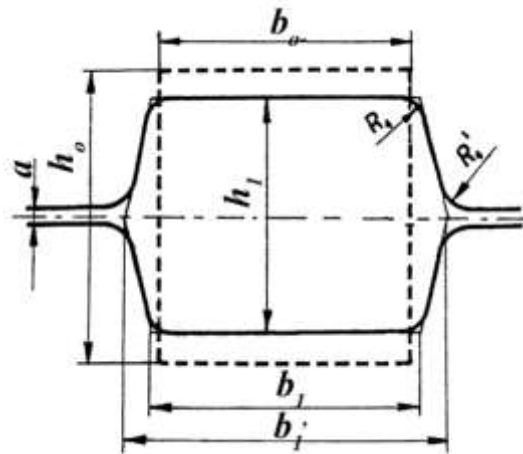
Egyszerű szelvények ürege nyitott, ha a hengerköz az üregnyitás helyén a hengerek tengelyével párhuzamos, az üreg oldalfalát metszi és arra közel merőleges. A zárt üreget lényegében egyik henger határolja, a másik henger az üreget mintegy lezárja, abba belenyúlik.

5.1.2. Az üregek oldalferdesége

Az üregoldalak általában ferde helyzetűek, az anyagáramlás, az üregtöltés, a darab könnyű bevezetése és az alakított darab üregből történő eltávolíthatóságának megkönnyítése végett. A készüreg oldalferdesége a legkisebb, az előnyújtóüregeké ennél fokozatosan nagyobb. A gyakorlatban a legkisebb oldalferdeség az üregmagasság 1%-a.

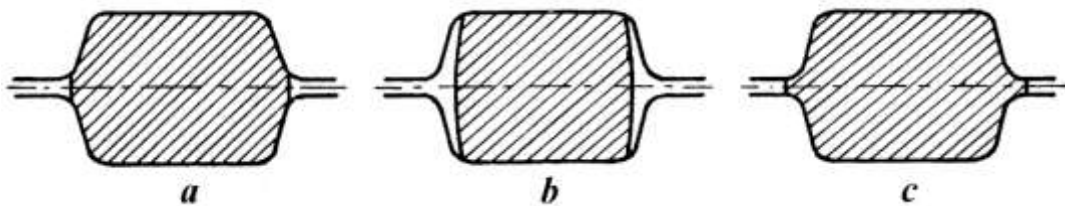
5.2. Az üregtöltés

Az 5.4. ábrán egy hengerüreghez megrajzoltuk a befutó darab szelvényét és méreteit is.



5.4. ábra Hengerüreg és a befutó darab keresztmetszete

Ha a hengerlés szabályosan történik, akkor a szúrásban a darab épen úgy szélesedik, hogy teljesen kitöltse a hengerüreget. Az 5.5. ábrán normális üregtöltésre, alultöltésre és túltöltésre láthatók példák.

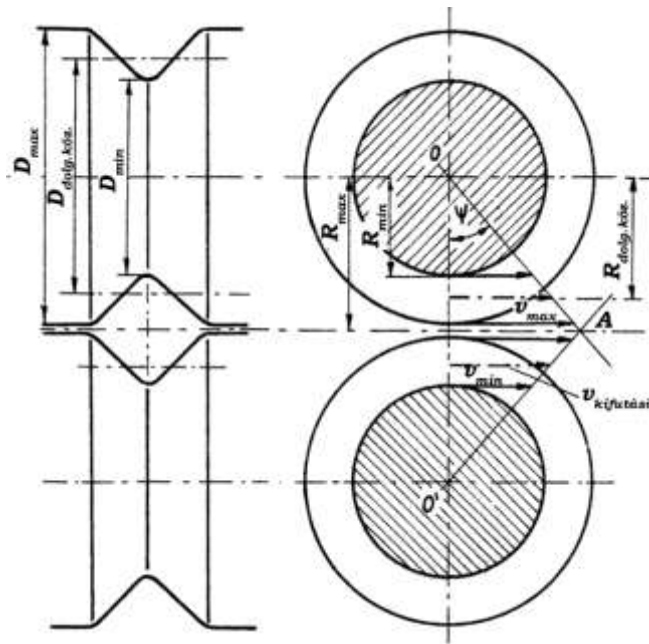


5.5. ábra Az üregtöltés esetei

5.3. A hengerek közepes dolgozó átmérője

Elemi hengerléskor a hengerek átmérője általában szűk tűrésen belül állandó, a hengerdomborítástól eltekintve. Az állandó hengerátmérő azt is jelenti, hogy állandó a munkadarabbal érintkező hengerpontok kerületi sebessége. Ha az előresietéstől eltekintünk, akkor a kifutó darab sebessége megegyezik a henger kerületi sebességével.

A hengerüreg kialakításával együtt jár, hogy az üreg alakjának következtében nem állandó az üregmélység és ezzel együtt nem állandó a hengerátmérő sem. Az 5.6. ábrán négyzetüreg látható.



5.6. ábra Az üregpontok és a hozzájuk tartozó átmérők

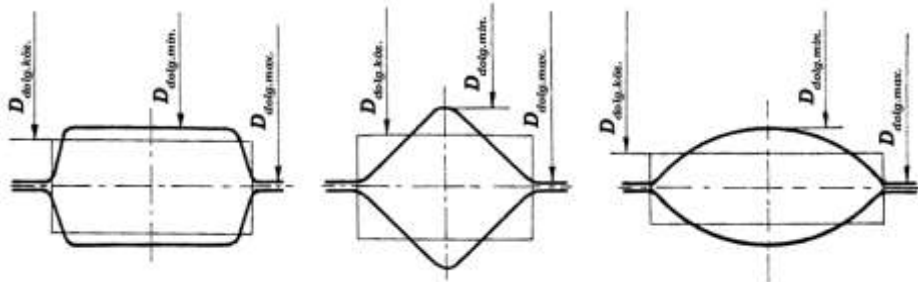
Az üregkontúrhoz tartozó átmérőket – amelyekhez a hengerelt darab hozzáér – dolgozó átmérőknek nevezzük. Ezek az átmérők az üreg alak következtében nem azonosak, vagyis a különböző dolgozó átmérőkhöz különböző kerületi sebességek tartoznak.

Az alsó és felső hengeren is van egy-egy pont, aminek a kerületi sebessége a hozzá tartozó minimális hengerátmérő következtében minimális és vannak olyan üregpontok, melynek kerületi sebessége a hozzá tartozó maximális átmérő következtében maximális. A hengerelt darab azonban a hengerlési síkot csak egyetlen sebességgel tudja elhagyni, az úgynevezett kifutási sebességgel.

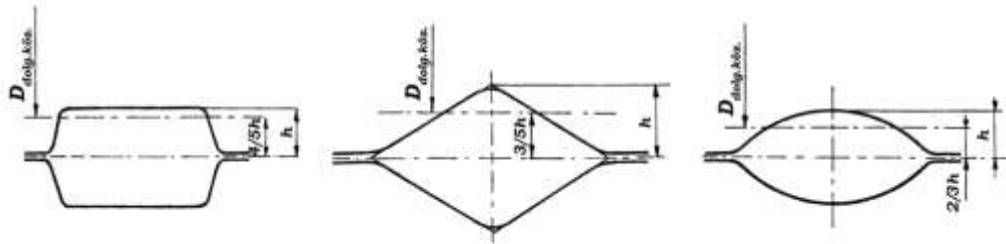
A darab kifutási sebessége az üregpontok maximális és minimális kerületi sebessége közé esik. A 18.4. ábra mutatja a feltételezett kifutási sebességet is. Ehhez a sebességhez tartozik egy vele egyenlő kerületi sebesség és ehhez pedig tartozik egy hengersugár, illetve hengerátmérő. Ezt a hengerátmérőt közepes dolgozó hengerátmérőnek nevezzük.

A közepes dolgozó hengerátmérő tehát az a hengerátmérő, amelynek megfelelő kerületi sebességgel hagyja el a hengerelt darab a hengerlési síkot, ha az előresietést elhanyagoljuk.

Az 5.7. ábra közepes dolgozó átmérők meghatározását mutatja területkiegyenlítéssel, az 5.8. ábra pedig tapasztalati úton meghatározott közepes dolgozó átmérőket szemléltet.



5.7. ábra Közepes dolgozó átmérők



5.8. ábra Tapasztalati úton meghatározott közepes dolgozó átmérők

5.4. Hengerüregek csoportosítása

Az üregben történő hengerlés célja többféle lehet. Az előnyújtó hengerlés célja csupán a kiinduló darab keresztmetszetének csökkentése. Ez a művelet előnyújtó üregekben történik. Az előnyújtó üregek egyszerűek, alakjuk általában téglalap, négyzet, esetleg rombusz. Mivel az üregben történő hengerlés is jellemzően magasságcsökkentésből áll, gyakran előfordul, hogy a hengerelt darabot két üreg között 90° -kal elforgatják, hogy a méretek egyenletesen csökkenjenek.

Az egymás után elhelyezett üreges hengereket üregsoroknak nevezzük.

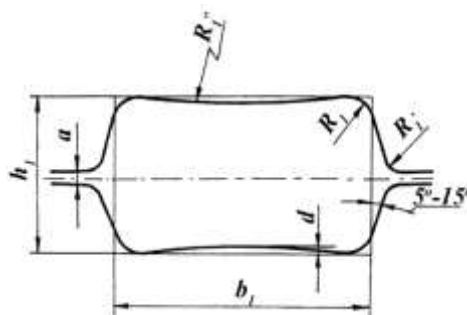
Az üregek másik csoportjánál az alak módosítása, a megfelelő szelvény előállítása a lényeges. A keresztmetszet-csökkentés ezekben az üregekben csak másodrendű feladat. Az ilyen üregsorokat készsoroknak hívják.

6. A hengerlési technológia hengereinek kialakítása

Az előnyújtó üregek és üregsorok feladata a hengerlésre kerülő anyag keresztmetszetének csökkentése. A kiinduló anyagok jellemzően négyzet szelvényűek, amelyek előnyújtása lehetséges lenne üreg nélküli sima hengerekkel is, azonban a darabok lekerekített sarkainak repedésveszélye szükségessé teszi az üregben történő hengerlést. Az üregek használatának másik oka, hogy elemi hengerléssel nehéz kézben tartani a szélesedést.

6.1. Szekrényüreg

Az előnyújtásra leginkább használatos üregfajta a szekrényüreg, mely középen nyitott és téglalap szelvényű. Kialakítása a 6.1. ábrán látható.



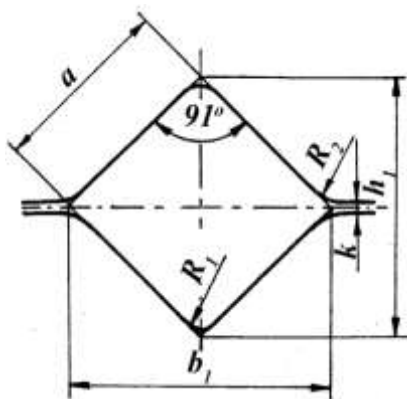
6.1. ábra Szekrényüreg

A h_1 magasságot a hengerrés változtatásával lehet módosítani. Fontos az oldalferdeség ($5-15^\circ$), valamint az R_1 lekerekítés biztosítása. Az alsó és felső felületet általában domborúra munkálják, mert a gyakorlatban bebizonyosodott, hogy előnyös, ha a hengerekt darab oldalfala homorú.

Az üreg területét a $T = h_1 \cdot b_1$ képlettel számolhatjuk, ami csak közelítőleg adja meg a valós területet az oldalferdeség és lekerekítések miatt. A nagy keresztmetszetek miatt ez azonban nem jelent problémát.

6.2. Négyzet és rauta üreg, a négyzet-rauta üreg

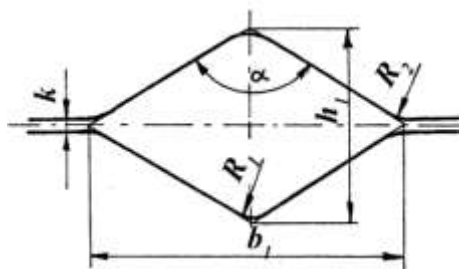
A 6.2. ábrán négyzetüreg látható, aminek fő jellemzője, hogy a „négyzet” átlója fekszik a hengerrési vonalon.



6.2. ábra Négyzetüreg

Látható, hogy a négyzet nem pontosan négyzet, mert a csúcsszög 91° -os. Tapasztalat szerint ez kell a lehült darab négyzetszelvényének biztosításához. Az üreg területének számításánál elhanyagolható ez a kis eltérés, tehát a terület meghatározható a $T = a^2$ képlettel.

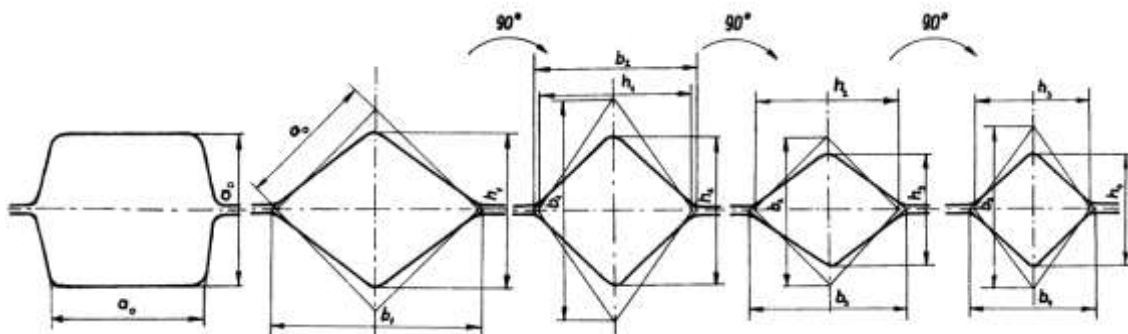
A 6.3. ábrán rombusz alakú, úgynevezett rauta üreg látható (a rombusz németül raute).



6.3. ábra Rauta üreg

A rauta üreg jellemző adata a csúcsszög, melyet α -val jelölünk. Jellemző értéke 105° és 130° között van. A rauta üreg területe a lekerekítéseket elhanyagolva $T = h_1 \cdot b_1 / 2$

A rauta üregek az úgynevezett négyzet-rauta üregsorban használatosak. Ilyen üregsort mutat a 6.4. ábra.

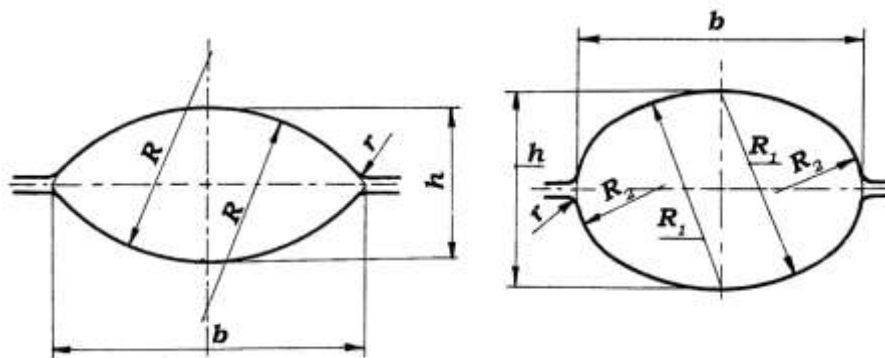


6.4. ábra Négyzet-rauta üregsor

A kiinduló négyzetszelvényű anyagot szekrényüregben hengerlik, majd ezután a négyzet-rauta üregsoron. A négyzet-rauta üregsoron a két üregtípus váltogatja egymást. Az így elkészült négyzet keresztmetszetű rúd csupán csak közbenső terméknek tekinthető.

6.3. Ovál üreg, a négyzet-ovál és kör-ovál üregsor

Ovál üregnek nevezünk több olyan üreget, amely az ellipszishez többé kevésbé hasonlít. Általában alkalmazott oválüregeket szemléltet a 6.5. ábra.



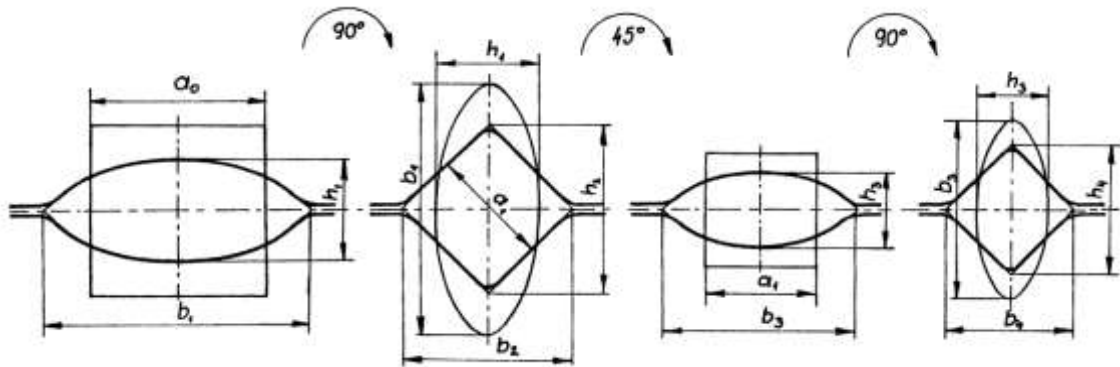
6.5. ábra Oválüreg típusok

A bal oldali ábrán két azonos körívvel szerkesztett oválüreg látható. Ez az üreg viszonylag lapos, ezért erőteljesen nyújt. Területe: $T = 2 \cdot b \cdot h / 3$

A jobb oldali ábrán kosárgörbe alakú oválüreg látható. Ebben az üregtípusban nem olyan nagymértékű az alakítás. Területe: $T = b \cdot h \cdot \pi / 4$

A többféle oválüreget többféle üregsorban használjuk. Ezek közül a legerősebb alakítás a négyzet-ovál üregsorban lehetséges. Kisebb mértékben alakít az ovál-ovál és a kör-ovál üregsor.

A négyzet-ovál üregsor mutat a 6.6. ábra.



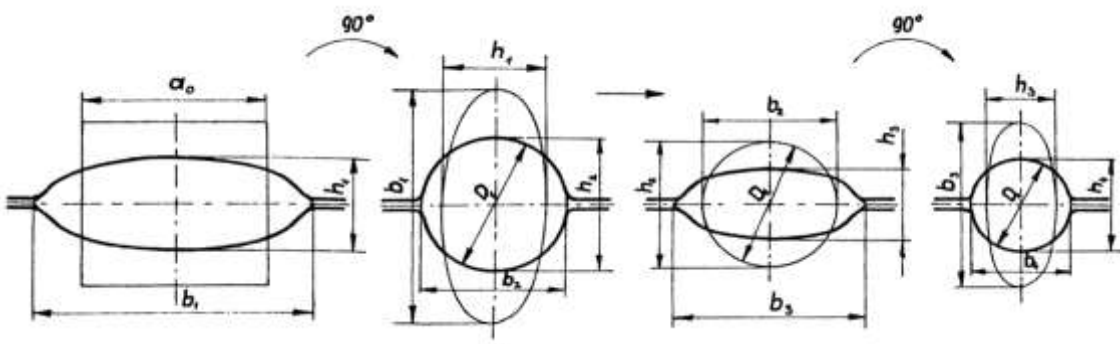
6.6. ábra Négyzet-ovál üregsor

Az első ovál üregbe beszúrt szelvény általában egy négyzet-rauta üregsor utolsó négyzet szelvénye.

Az üregsorral nagy nyújtás hajtható végre. A négyzetüregben azonban kisebb nyújtási tényezővel lehet hengerelni, mint az oválüregben.

Az oválüregből 90°-os fordítással szúrjuk a darabot a négyzetüregbe, a négyzetüregből pedig 45°-os fordítással kerül a darab a következő oválüregbe.

A kör-ovál üregsor a 6.7. ábrán látható.



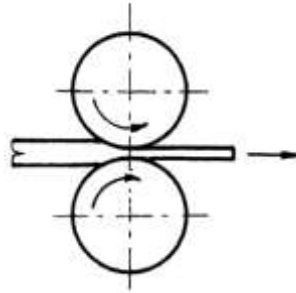
6.7. ábra Kör-ovál üregsor

Az üregsor általában kisebb szelvényeknél alkalmazzák, leginkább a négyzet-ovál üregsor folytatásaként. Ez az üregsor azért terjedt el, mert a körszelvény bevezetése az oválüregbe, nem tartalmaz annyi hibaforrást, mint a négyzetszelvény bevezetése.

7. Hengersorok

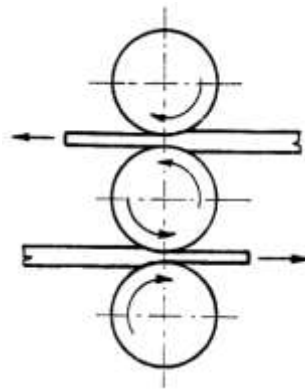
7.1. Hengerállványok

A hengerlés végrehajtásához legalább két hengerre van szükség. Ezt a legegyszerűbb elrendezést mutatja a 7.1. ábra. A kéthengeres hengerállványt duó hengerállványnak hívjuk. Amennyiben a forgásirány változtatható, akkor reverzáló állványnak nevezzük.



7.1. ábra Duó hengerállvány vázlata

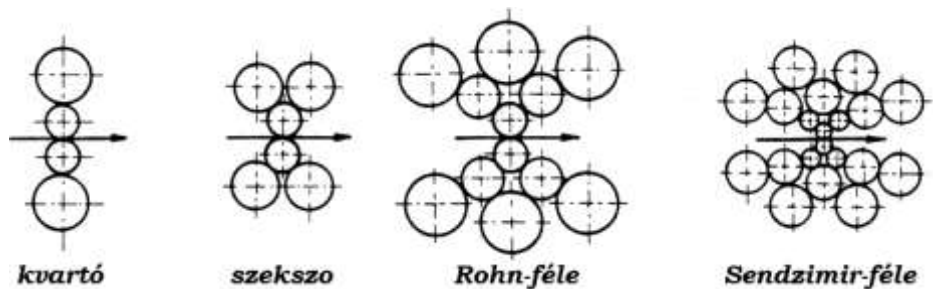
Régebben háromhengeres, úgynevezett trió elrendezéssel biztosították, hogy a forgásirány megváltoztatása nélkül lehessen hengerelni mindkét irányban (7.2. ábra)



7.2. ábra Trió hengerállvány vázlata

Ebben az esetben viszont a darab magassági helyzetének változtatásáról kell gondoskodni a szúrásirány megváltoztatásakor.

A hengerátmérő csökkenésével a nyújtás növelhető és a hengerlési erő is csökken. Annak érdekében, hogy a hengerátmérőt csökkenteni lehessen, meg kell akadályozni, hogy a kis átmérőjű henger túlzott mértékben kihajoljon. Ennek érdekében támhengereket alkalmaznak. Támhengerrel rendelkező hengerállványokra mutat példát a 7.3. ábra.



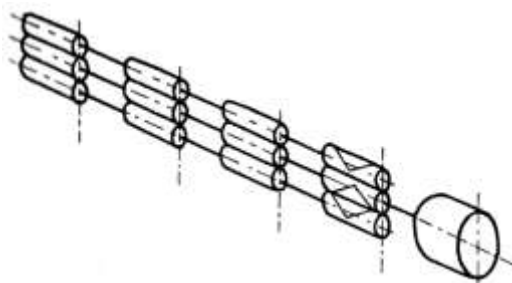
7.3. ábra Sokhengeres hengerállványok vázlata

A sokhengeres hengerállványok kizárólag lapos termékek hengerlésére szolgálnak. Az alakos acélokat és rudakat duó vagy trió hengersorokon hengerlik.

A hengerlési feladatot általában több szúrással kell elvégezni. Ez lehetséges reverzáló hengerléssel egy állványban, vagy több hengerállványban folytatólagosan, csoportos hengerállvány elhelyezéssel. A következőkben ezekről lesz szó.

7.2. Egytengelyes sorok

Egytengelyes elrendezésben a hengersorokat egy motor hajtja. Egy ilyen trió sor vázlatát mutatja a 7.4. ábra.

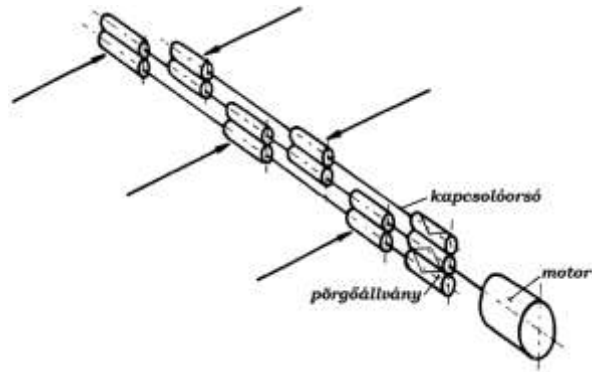


7.4. ábra Egytengelyes trió sor vázlata

Egy ilyen sorra az jellemző, hogy az összes henger fordulatszáma azonos. Ennek az a következménye, hogy a darab nyúlásának függvényében a szúrásidők növekednek.

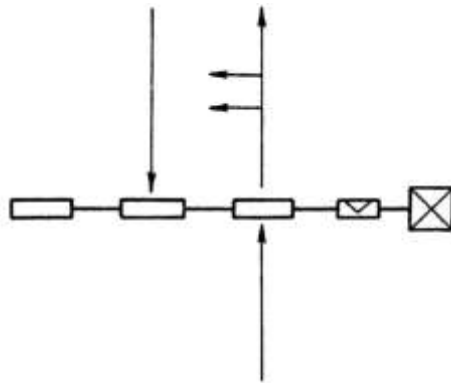
Hátrányt jelent még, hogy az utolsó állvány meghajtásához szükséges forgatónyomatéknak végig kell mennie az összes állványon.

Jellegzetes egytengelyes hengersor a vaktrió sor: egy állványban csak egy szúrást végeznek. Hogy ne kelljen a forgásirányt a darab visszajuttatásához megváltoztatni, a sor végeredményben a trió elrendezéshez hasonlít (7.5. ábra).



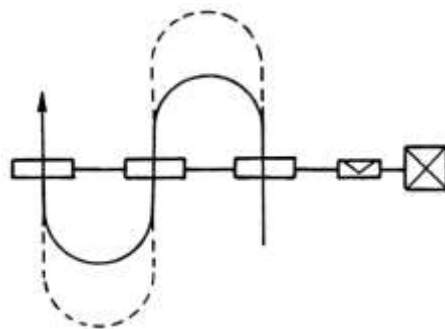
7.5. ábra *Vaktiósor vázolata*

Az egytengelyes sorokon váltott szálvéggel, vagy átvezetéssel lehet hengerelni. Váltott szálvéggel való hengerléskor az egyik irányban a darab egyik vége kerül a hengerállványba, másik irányban a darab másik vége kerül a hengerállványba először (7.6. ábra).



7.6. ábra *Hengerlés váltott szálvéggel*

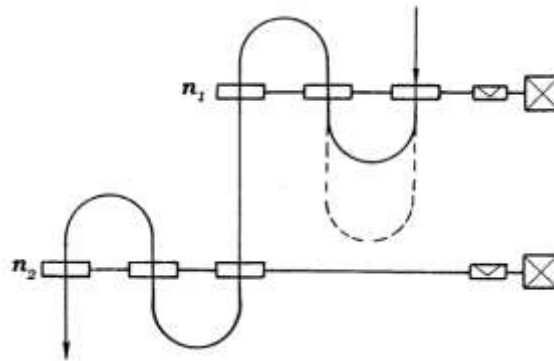
Átvezetéssel történő hengerlés esetén a darabot kézzel, vagy vezetékben az állványból való kilépés után azonnal a következő állványba vezetik (7.7. ábra).



7.7. ábra *Hengerlés átvezetéssel*

Az eljárás előnye, hogy a hengerlés ideje jelentősen rövidül, hiszen az összes szúrás rövid időn belül elkezdődik.

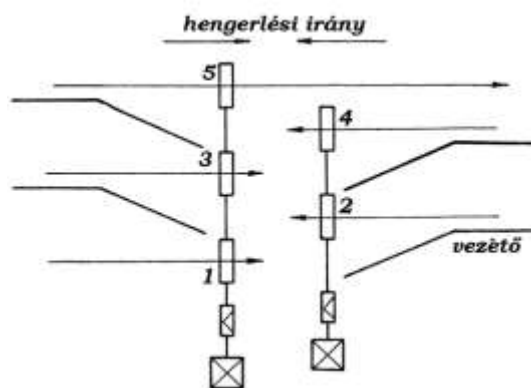
Ha a hengerállványokat több tengelyen helyezük el, akkor lépcsős elrendezésről beszélünk (7.8. ábra). A második lépcső fordulatszámja nagyobb lehet, mint az első lépcsőé.



7.8. ábra Kétlépcsős hengersor

7.3. Cikcakk sorok

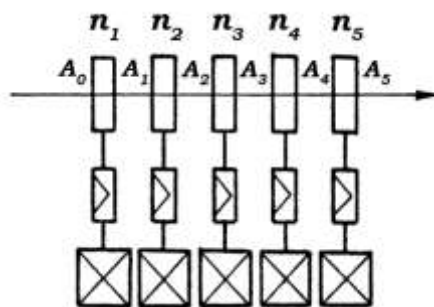
Az egytengelyes soroknak azt a hátrányát, hogy a darab visszajuttatásához irányváltás szükséges, a trió, vagy vaktrió állványok alkalmazásán kívül más úton is ki lehet küszöbölni. Erre találták ki a cikcakk sorokat, melyek legegyszerűb változatában két egymással szemben forgó egytengelyes duó sorozatból áll (7.9. ábra).



7.9. ábra Cikcakk hengersor

7.4. Folytatólagos sorok

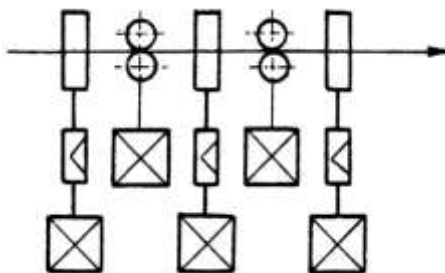
A folytatólagos sorok állványai nem egy tengelyben, hanem a hengerelt darab hossz tengelye mentén egymás után helyezkednek el (7.10. ábra).



7.10. ábra Folytatólagos hengerversor

A hengerelt anyag egyszerre több állványban fut. Lényeges annak biztosítása, hogy az állványok között sem anyagtöbblet, sem pedig anyagihiány ne lépjen fel. Ehhez szükséges a folytonossági feltétel biztosítása. A folytonossági feltétel azt jelenti, hogy azonos idő alatt minden állványon azonos mennyiségű anyag haladjon át. Ezt a feltételt akkor lehet biztosítani, ha minden állvány előtt és után a keresztmetszet és a sebesség szorzata állandó.

Technológiai szempontból nagyon lényeges, hogy rúdárak folytatólagos sori hengerlésekor kedvezőbb, ha az üregek között nem kell az anyagot megcsavarni (elfordítani 90° -kal). Ez elmaradhat, ha a vízszintes tengelyű hengerek mellett függőleges tengelyű hengereket is beléptetünk a sorozatba (7.11. ábra). Az ilyen sorokat HV elrendezésű (horizontális-vertikális) soroknak hívjuk.



7.11. ábra Folytatólagos sor HV elrendezéssel

8. Lapos termékek hengerlése

Lapos termékek a melegen és a hidegen hengerelt szélesszalagok és szélesszalagból darabolt táblalemezek, hasított szalagok. Táblalemezek egyedi meleghengerlését csak durvalemez hengerművekben végezzük. A lapos termékek szelvénye közel téglalap alakú. A hengerelt szalagokat és lemezeket szélesség szerint csoportosíthatjuk a gyártási eljárásuk alapján:

- keskeny szalag 600 mm-ig,
- széles szalag 800-2500 mm között,
- durvalemezek 2000-5000 mm között.

Keskenyszalag meleghengerművek biztosították korábban az alapanyagot a keskenyszalag hideghengerművek részére, de a szélesszalag hengerművekben a hengerlés-technológia fejlődése – méret és szelvény szabályozás – megfelelő minőségű alapanyagot biztosít a

keskenyszalag hideghengerművek részére. Hazánkban Salgótarjánban üzemel keskenyszalag hideghengermű.

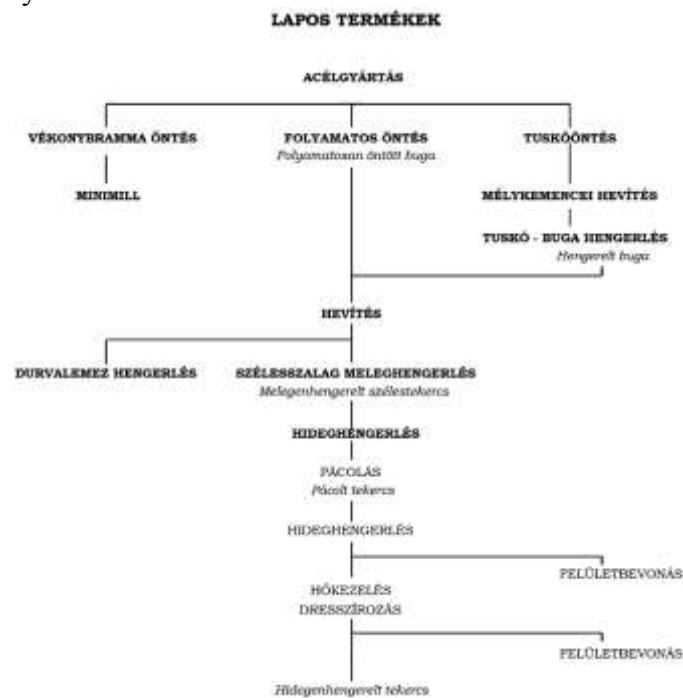
Korábbi irodalmakban megtalálható a lapos termékek vastagság szerinti csoportosítása:

- finomlemez 3 mm – nél vékonyabb,
- középlemez 3 – 7 mm vastagságú,
- durvalemez 8 mm – től kezdődik.

Ma már nem használják ezt a csoportosítást. Helyette:

- melegen hengerelt szélesszalag és szélesszalagból darabolt táblalemez,
- egyedi meleghengerlésű durvalemez,
- hidegen hengerel szélestekercs és a szélestekercsből darabolt táblalemez, hasított szalag.

A lapos termékek gyártási sémáját a 8.1. ábra szemlélteti. Az ábrában a tuskóöntés is szerepel a teljesség kedvéért. A magyar kohászatban már nincs tuskóöntés, a világon mindenütt jelentősen lecsökkent a részesedés az öntött acélon belül, Németországban pl.: a folyamatosan öntött bugák részaránya 97%.



8.1. ábra Lapos termékek gyártási sémája

A lapos termékek hengerlése minden esetben sima palástú hengerekkel történik. A hengersorok felépítése lehet reverzáló vagy folytatólagos. A meleg- és hideghengersorok felépítését, valamint a munka- és támhengerbeépítési változatokat a 10. fejezet ismerteti.

9. Lapos termékek felosztása a felhasználási cél alapján

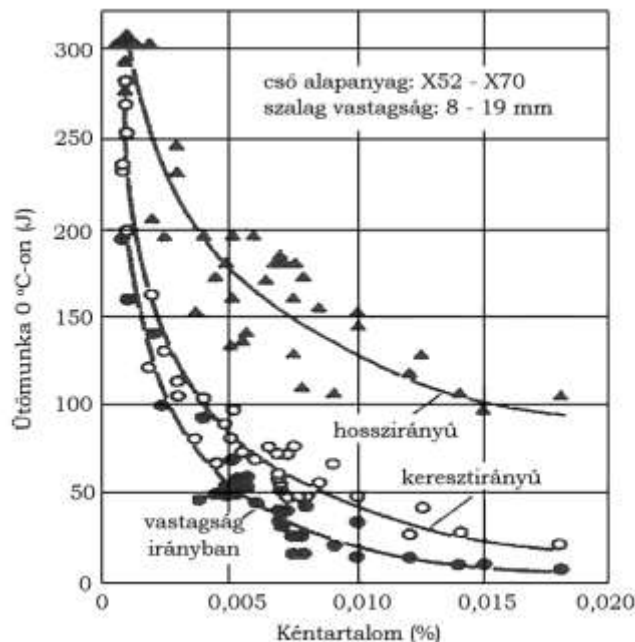
Szélesszalag meleghengerművek végterméke a szélestekercs, a szélestekercsből darabolt táblalemez és hasított tekercs. A melegen alakítás az ausztenit újrakristályosodása feletti hőmérsékleten kezdődik, a hőmérséklet lefutása a hengerelt anyagminőségnek megfelelően

szabályozott. Felhasználásuk sokrétű, hideghengerműi alapanyag, a spirális és hosszvarratú csövek, hajlított profilok, különféle acélszerkezetek, kopásálló acélok, nehéz járművek szerkezeti elemeinek az alapanyaga, stb. Méretszabványa EN 10051.

A tömegméretekben felhasznált acélfajta a szerkezeti acél, melynek minőségeit az EN 10025:2004 szabványkötet foglalja össze. Korrózióvédelmet a szerkezetek tűzi mártó horganyzásával és/vagy festéssel, vagy léghő korrózióknak ellenálló acélminőség alkalmazásával biztosítják.

A felhasználók igényei a korszerű feldolgozóipar XXI. századi követelményei alapján:

- a kiválóan mélyhúzható lágyacélok mellett a lehető legnagyobb szilárdságú acélok is nagyfokú alakíthatósági tulajdonságokkal rendelkezzen,
- alacsony szennyező-tartalom (S,P) és a minimális, de átalakított zárványtartalom biztosítsa a kívánt szívóssági tulajdonságokat (tiszta acél fogalma) 9.1. ábra,
- jól és feltétel nélkül hegeszthető legyen,
- a kémiai összetétel és a mechanikai tulajdonságok szórása szűk tartományú legyen,
- lemez geometriai értékek szűk szórása(vastagság, szélesség, lencséség),
- belső feszültségtől mentes és síkfekvő legyen.



9.1. ábra Kéntartalom hatása az ütőmunkára

Durvalemez hengerművek a vastagabb lemezek (50-150 mm) gyártása esetén a nagyobb össz alakváltozás érdekében igénylik a vastagabb előterméket, a tuskóból előhengerelt laposbugát. A durvalemezek legfontosabb terméke a nagyméretű hajólemez, acélhidak nagyszilárdságú tartólemezei. Méretszabványa az EN 10029.

Az 50-70 mm vastagságú vékonybramma öntés jelentős változásokat hozott a hengerművek felépítésében, gazdaságosságában. A peritektikus reakció hatáskörzetének az elkerülésével nagyon sok minőség gyártható vékonybramma öntéssel.

Az acéloknál is, de elsősorban a nemvas fémeknél alkalmazzák az előlemez öntést (10 – 25 mm) és a szalagöntést.

Hideghengerlés az újrakristályosodási hőmérséklet alatt megy végbe. A hideghengerlés előtt a melegtekerceket pácolják, előkészítik hideghengerlésre, a hideghengerléssel felkeményedett anyagot hőkezelik, majd dresszírozzák kikészítés előtt. Dresszírozói hengerfelület

érdeességével a felhasználás igényei szerinti szilágérdesség jól szabályozható. A hidegen hengerelt termékek gyártmányfejlesztése az elmúlt évtizedben valósággal robbanásszerű volt. Az intersztíciós elemektől mentes IF acélok, a lakkbeégetéskor keményedő BH acélok, a többes fázisú DP és TRIP acélok, a komplex fázisú és a nagyszilárdságú 1400 MPa folyáshatású martenzites acélok, elektrolitikus vagy folytatólagos tűzi mártó eljárással bevonva a járműipar igényei szerint lettek kifejlesztve. Mindenki által ismert az elektrolitikusan ónozott és lakkozott felületű konzervdoboz. Az elektrotechnikai acélok gyártása fontos terméke a hideghengerműveknek. Dekarbonizációs hőkezelési technológiával rendelkező áthúzó hőkezelő kemencével rendelkező hideghengerművek el tudják végezni a dinamó és transzformátor szilágok szemcsedurvító véghőkezelését. (EN 10106, EN 10107, EN 10165) Harangkemencével rendelkező hideghengerművekben az utolsó lépés a kritikus alakítás.

10. Lapos termékek gyártásának általános technológiája

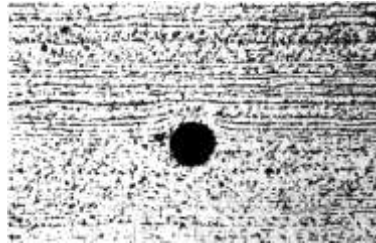
A lapos termékek gyártástechnológiájának alapvetően két változata van, integrált acélműben vagy mini acélműben történik a gyártás. Az integrált acélmű teljes vertikumot jelent a nagyolvasztótól a késztermékig, míg a mini acélmű betétanyaga a direktredukcióval előállított vasszivacs és acélhulladék, az acélgyártás elektrokemencében történik. Az SM acélgyártás kihalóban van az egész világon, mert az acélokkal szembeni minőségi követelmények jelentősen megnövekedtek. Az integrált acélmű és a mini acélmű felépítését a 10.1. ábra szemlélteti. Az integrált acélműveknek jelentős szerepük van a korszerű acélminőségek kifejlesztésében, gyártásában, ezért magasabb költségei ellenére még hosszú ideig vezető szerepet foglalnak el az acélgyártásban.[10.1.]



10.1. ábra Az integrált és a mini acélmű felépítése

A képlékeny alakítóknak is kell ismerni a szennyezők és a zárványok szerepét az acélok tulajdonságainak a megtervezésénél. Az alumíniummal csillapított acélokban - a folyamatos öntés bevezetése és az alacsony zárványtartalmú acélok iránti igény megnövekedése miatt zömmel ilyen acélokat igényel a feldolgozóipar – alumínium-oxid, mangán-szulfid található, melyek az öntött acélban gömb formájúak. A melegalakítás során azonban az Al_2O_3 zárványok összetöredeznek és sorba rendeződnek, a képlékeny MnS zárványok pedig fonallá vagy lepénnyé nyúlnak. Az ilyen zárvány-elrendeződés az acélok mechanikai anizotrópiáját

eredményezi, ami az összetett igénybevételnek kitett hegesztett szerkezeteknél terraszos törések kialakulását okozhatja. Az ilyen zárványok módosítására Ca-ot használnak. Az üstbe adagolt Ca hatására CaS és Ca-aluminát keletkezik. A CaS jól oldódik a Ca-aluminátban ezért egy gömb alakú zárványt alkotnak. Az olvadt acélban nagyrészüket felszáll a salakba, az acélban maradt részük olyan kemény, hogy a hengerlés alatt sem töredezik össze, gömb alakú marad, nem rontja a lemezek keresztirányú mechanikai tulajdonságát. Egy jól kezelt acélban csak ezek a gömb alakú zárványok találhatók. (10.2. ábra)[10.2.]



10.2. ábra Gömb alakú Ca-aluminát zárvány

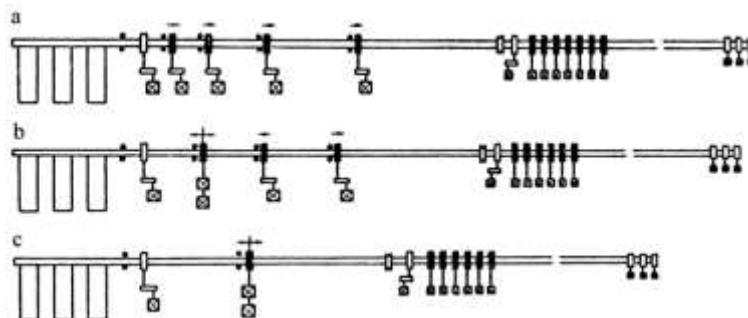
A folyamatos öntés bevezetése jelentősen lerövidítette a betét előnyújtási folyamatát, a tuskóöntés, mélykemencei hevítés, a tuskó előnyújtása lapos bugává, a bugavégek vágása és a felület tisztítása, majd tolókemencei újrahevítése fázisok elmaradtak, a fajlagos anyagfelhasználás és az energiaköltségek jelentős csökkenését eredményezte. A Dunai Vasmű szabadalma volt a lágycél tuskók egymelleges hengerlése, mélykemencéből készrehengerelték a lapos bugafázis kihagyásával.

Az integrált acélművek szélesszalag hengerekkel rendelkeznek, melyeknek részei:

- öntecs melegítése mélykemencében (csak erősen ötvözött acélok esetében alkalmazzák-hazánkban nincs tuskóöntés),
- toló- vagy léptetőgerendás kemence brammák hevítésére,
- előnyújtó szakasz a készsorba beadható vastagságú előlemez hengerléséhez,
- készrehengerlő szakasz,
- kifutó görgősor és csévézők, szalaghűtés és tekercselés.

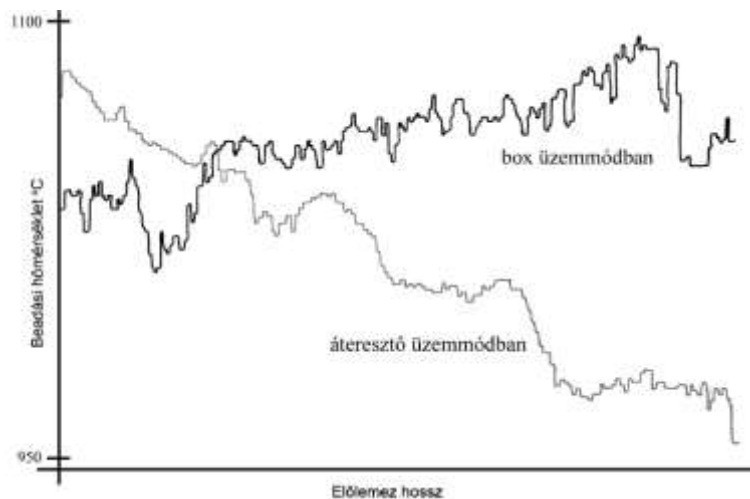
A szélesszalag hengerek három alapvető típusa ismert (10.3. ábra)[10.3.]:

- félfolytatólagos,
- háromnegyed folytatólagos,
- folytatólagos.



10.3. ábra Különböző szélesszalag hengerek
a) folytatólagos b) háromnegyed folytatólagos c) félfolytatólagos

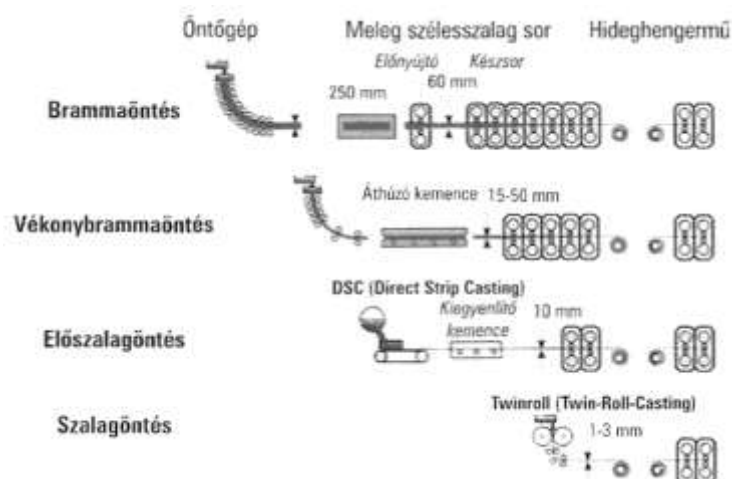
A három típus alapvetően az előnyújtó sor felépítésében tér el egymástól. A mai korszerű hengerek sorokon a folytatólagos sor előtti revetőrőállványt elhagyják. A félfolytatólagos sorokon előlemez csévéző berendezést (coilbox) telepítenek mely az előlemez hőmérsékletét kiegyenlíti és az előnyújtó állvány és a készsor közötti távolságot már nem határozza meg az előlemezek hossza. Az előlemez csévéző berendezés hőmérsékletkiegyenlítő szerepét mutatja be a 10.4. ábra.[10.4.]



10.4. ábra A Coil-box hatása a készsori beadási hőmérsékletre

A korszerű szélesszalagsor felépítésével hasonlítja össze a 10.5. ábra a vékony-brammát hengerlő sorokkal, az előlemez öntő és a szalagöntő berendezéssel. [10.5.-10.7.]

Ötvözött acélok meleghengerlésére alkalmaznak ún. Steckel hengerek sorokat, amelyek felépítése hasonló mint a hideghengerműi reverzáló állványoké, azonban a két csévéző kemencében van.



10.5. ábra A különféle öntési technológiák összehasonlítása

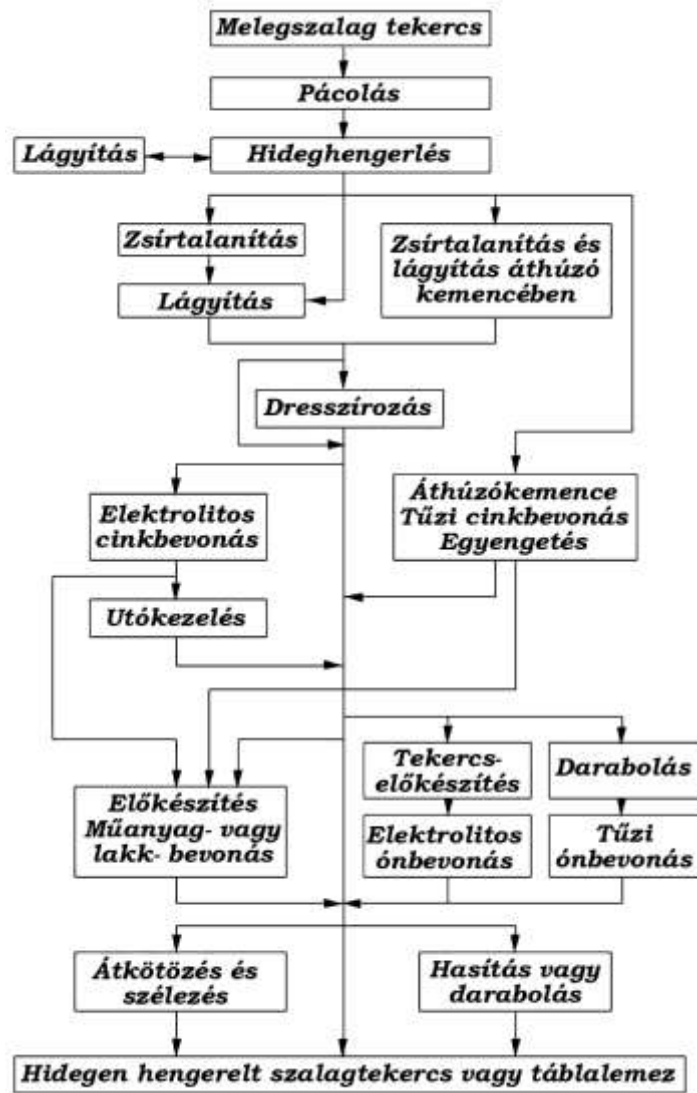
A vékonybramma öntő és hengerlő művekben – a bramma vastagsága 70 mm (CSP hengermű), vagy az öntött szál alakításával 50 mm (ISP hengermű).

A hideghengerművek általános gyártástechnológiai sémáját a 10.6. ábra szemlélteti. Szándékosan egy kb. 20 évvel ezelőtti állapotot mutat be a séma. A sémában pálmaolajjal történő kenéssel történik a vékonyszalagok hideghengerlése. Ma ásványolaj alapú metastabil emulzióval helyettesítik zsirtalanítás nélkül (12. fejezetben bővebben). Tűzi ónozási technológiát ma már sehol sem alkalmaznak. A Dunai Vasműben is megszüntették a 80'-as években. Az egyes speciális termékek gyártására szakosodott hideghengerművek gyártástechnológiai sémája az ábrától eltérő lehet, elsősorban az elektrotechnikai acélokat gyártó hideghengerművéké. [10.8.-10.10.]

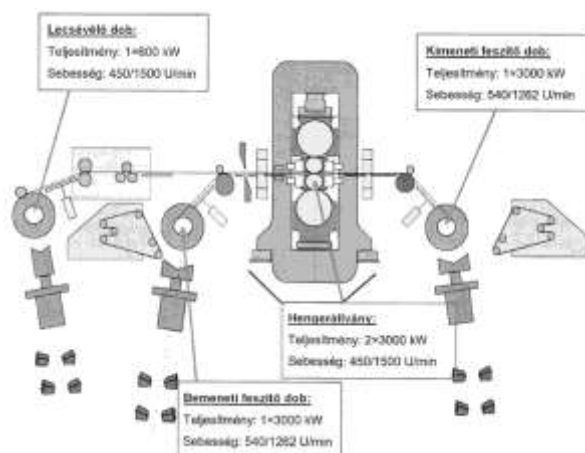
A melegen hengerelt tekercs előkészítését hideghengerlésre, a revétlenítést, szélezést, olajozást és a hengersor műszaki paramétereinek megfelelő tekercsképzést a pácoló sorokon végzik. A hideghengerművekben áthúzó pácolósort alkalmaznak korábban kénsavas, ma már mindenütt sósavas pácolással.

A hideghengersorok egyállványos reverzáló (10.7.ábra), vagy 3-6 állványból álló többállványos tandem hengersorok. A korszerű tandem sorokon szalagvégtelenítést és huroktárolást alkalmaznak. Így a szalagbefűzés csak a munkahengerek garnitúra-cseréjekor szükséges (10. 8. ábra). A pácolósor és a tandemsor összekapcsolásával a termelés 30-50%-al nő, hengerfelhasználás és a termelési költség csökken, a forgási sebesség nő.(10.9. ábra)

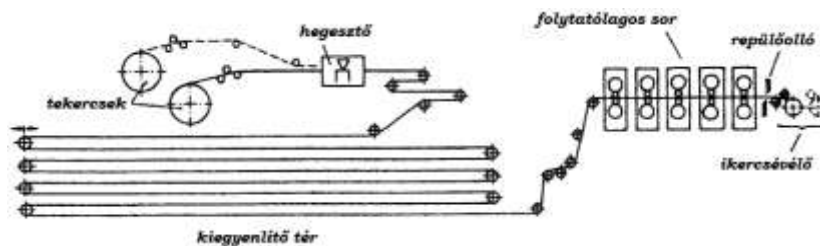
A hidegalakítás hatására a krisztallitok deformálódnak, megnyúlnak. A diszlokációk, rácshibák száma megsokszorozódik. Alacsony hőmérsékleten a termodinamikai hajtóerő a rácshibák mozgását akadályozó hatásokat nem tudja legyőzni. A hidegen hengerelt szalag felkeményedik, szakítószilárdsága, folyáshatára megnő, nyúlása lecsökken, alakváltozó képessége kimerül. Ezért újrakristályosító hőkezelést kell alkalmazni, melynek célja a felkeményedés megszüntetése, a megfelelő anyagszerkezet és a mechanikai tulajdonságok biztosítása a dresszírozási folyamattal együtt.



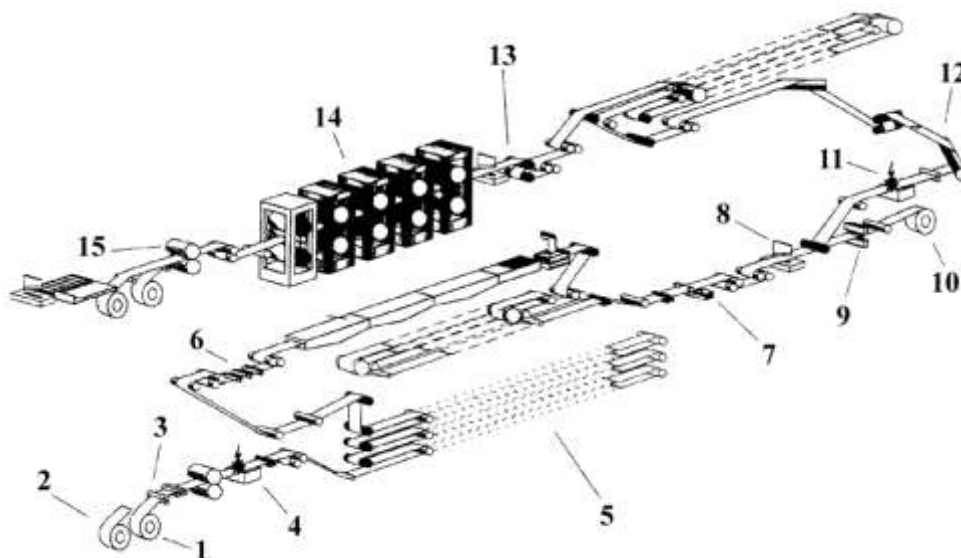
10.6. ábra Hideghengerművek általános gyártástechnológiai sémája



10.7. ábra Egyállványos reverzáló hideghengercsatorna



10.8. ábra Végtelenített tandem sor



10.9. ábra Pácoló és tandem sor összekapcsolása

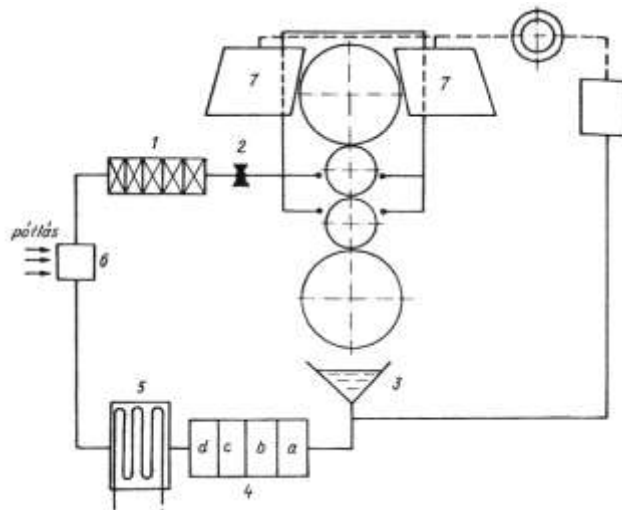
A
dar
ab
és
a
hen
ger

1,2- lecsévélők; 3-olló; 4-hegesztőgép; 5-huroktároló; 6-revetőrő húzvaegyenető a páckádak előtt; 7-felületellenőrző berendezés; 8-olló; 9,10-pácolt tekercs levétel; 11-hegesztőgép; 12-szalagvezetés a tandem sorhoz; 13-feszítő görgők; 14-tandem sor; 15-dobolló a csévélő váltáshoz.

közötti súrlódási tényező - a hengerléshez szükséges minimális súrlódási tényező közelébe - csökkentése érdekében, valamint a munkahenger hőbombírjának a szabályozása érdekében a hideghengerléskor emulziót alkalmaznak. Ma már kizárólag kőolaj alapú olajok és víz emulzióját alkalmazzák. Régebben a súrlódási tényező csökkentése érdekében használtak növényi olajokat is pótlólagos adagolással, pálmaolajat, repceolajat. Ezeknek a olajoknak a jó kenőhatásuk mellett a hűtőhatásuk nem volt megfelelő és hőkezelés előtt el kellett távolítani a szerves olajokat a felületről. A hideghengerlés során a gyártástechnológiába beiktatott zsírtalanítást mutatja a 10.6. ábra. Ezért a hideghengerversorok emulziós rendszerrel rendelkeznek. Az egyállványos reverzáló hideghengerversor egyszerűsített emulziós rendszerét a 10.10. ábra szemlélteti. Az emulziós rendszer u.n. egypályás rendszer, mert a hűtés és kenési feladatot egy rendszerrel látja el. Az emulziós rendszer első része a szivattyútelep, valamint az emulziós kollektorok a munkahengereknél és támhengereknél. A hengerekről és a lemezről lefolyó fáradt emulziót összegyűjtik és tisztítórendszerbe vezetik. Az emulzió szennyeződik a henger és a lemez felületéről leváló acél részecskékkkel, a hengerversor hidraulikus rendszeréből elfolyó olajjal.

A tisztítórendszer részei:

- ülepítő rendszer a nagyobb méretű por és fémszennyeződések eltávolítására,
- mágneses szeparátor, amelyben több mágneses görgő forog és kiválasztja az emulzióba került acélszemcséket,
- flotációs lépcső a 10 µm méretű szemcsék leválasztására habosított adalék hozzáadásával,
- kapilláris, textilszálás vagy papírtisztító.



10.10. ábra Reverzáló állvány emulziós rendszerének egyszerűsített ábrája

1,2-szivattyútelep és szelepek; 3-emulzió gyűjtő; 4-fázadt emulziót tisztító rendszer (ülepítő, mágneses szeparátor, flotáló, textil vagy papírszűrő); 5-hűtő; 6-olajpótlás; 7-emulzió gőz elszívás.

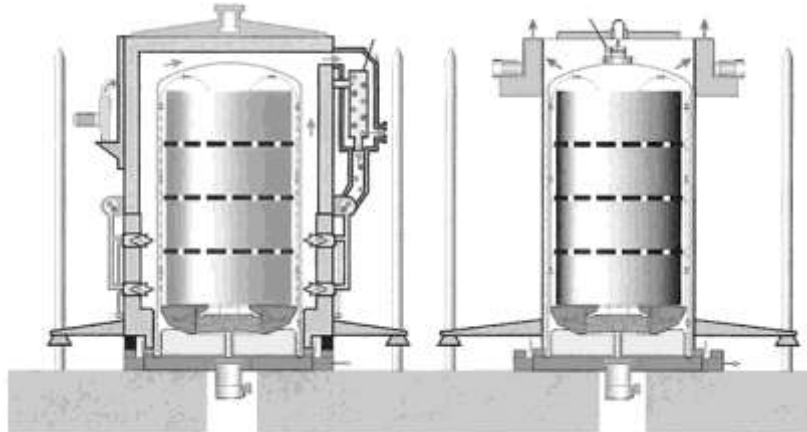
A tandem sorok emulziós rendszere három részből áll, külön rendszere van a sor első állványának, a sor utolsó állványának és a közbenső állványoknak. Erre azért van szükség, mert az első állványban nagyobb kenőképességre van szükség, magasabb az olajtartalom az emulzióban, az utolsó állványban a síkfekvés és a tiszta felület érdekében általában kisebb fogyással hengerelnek és tisztító folyadékot alkalmaznak olajos emulzió helyett.

A hidegen hengerelt felkeményedett tekercseket egyoszlopos harangkemencében vagy áthúzó rendszerű hőkezelő kemencében hőkezelik. Az egyoszlopos harangkemencét a 10.11. ábra mutatja be. A teljesség kedvéért meg kell jegyezni, hogy nemcsak egyoszlopos harangkemence létezik, de ezeket speciális anyagok hőkezelésére telepítették.

A harangkemence részei:

- kemence alap – terelőkészülék – a védőgázt keringtető ventilátorral és a védőgáz hűtővel a hűtési fázisban,
- terelő készülékre helyezik a tekercset, a tekercsek között van a konvekciós alátét amely a védőgáz áramlását segíti elő,
- a legfelső tekercs belső átmérőjét egy lappal lezárják a védőgáz áramlásának irányítása érdekében,
- 3 vagy 4 tekercs egymásra helyezése után ráteszik a sisakot (védőburát),
- légmentesen lezárják a kemencét,
- ráhelyezik a hevítő harangot, tangenciális lángú égők melegítik a sisakot, a sisak átadja a meleget a védőgáznak és felhevíti a tekercset,

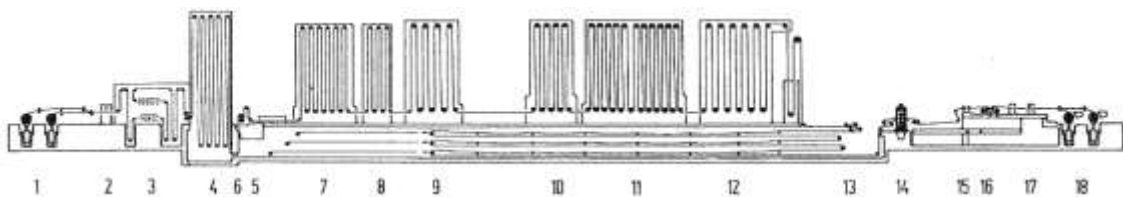
- hőntartás végén leveszik a hevítő harangot és léghűtő harangot helyeznek a sisakra, vagy a sisak vízhűtésével hűtik a sisak belsejében keringő védőgázt, ugyanakkor a védőgázt külön hűtőrendszeren át is keringtetik. Amikor már a hőkezelt tekercs annyira lehűlt, hogy a felülete nem revésedik, leveszik a sisakot és lebontják az állást.
- alkalmazott védőgáz alapja a nitrogén, de a felületen lévő emulzió eltávolítására redukáló atmoszférát kell biztosítani, amely HN_x védőgáznál 8-15% hidrogén. A 10.11. ábrában bemutatott HICON (High Convection annealing technology) kemence tiszta hidrogénnel üzemel. Előnye a fényes felületre lágyítás és a kb. felére csökkent hőkezelési idő.



10.11. ábra Korszerű hidrogén védőgázos harangkemence

Áthúzó hőkezelő kemencéknek két típusa ismert:

- normál hőkezelésre képes – elsősorban tűzi bevonó sorokba építik, pl.: Sendzimir szalaghorganyzó,
- CALP (Continuous Annealing Line whit Pre-treatment) eljárású, amelyik alkalmas 2000 °K/s hűtési sebesség és különféle öregítési folyamatok végrehajtására. (10.12. ábra)

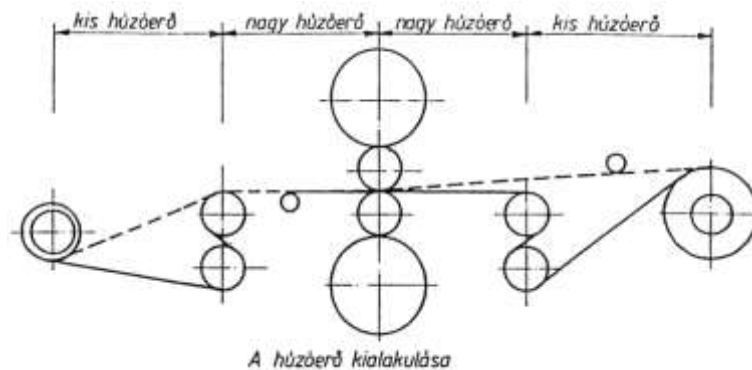


10.12. ábra CALP hőkezelő-Sidmar Belgium

1-lecsévélők; 2-hegesztőgép; 3-felülettisztító; 4-befutó szalag huroktárolója; 5,6-S húzóörgők; 7-hevítő szakasz; 8-hőntartó szakasz; 9-hűtő szakasz; 10-újrahevítő(öregítő)szakasz; 11,12-hűtőszakaszok; 13-kifutó szalag huroktárolója; 14-dresszírozó állvány; 15,16,17-olló, elvezető rész; 18-felcsévélők.

A hőkezelt, hidegen hengerelt szalag gyártásának következő technológiai fázisa a dresszírozás (utánhengerlés). A 10.12. ábrában bemutatott CALP rendszerű hőkezelő sorba már beépítették

a dresszírozó állványt. A dresszírozó sor egy vagy elektrolitikus ónozó alapanyag gyártó sorok esetében kétállványos és egyirányú. A dresszírozásnál a hengerrésben létrejövő képlékeny alakítás mellett a szalagfeszítésnek is fontos szerepe van az alakváltozás mértékének a meghatározásában. Ezt a sorba beépített S-húzóörgök biztosítják. (10.13. ábra)

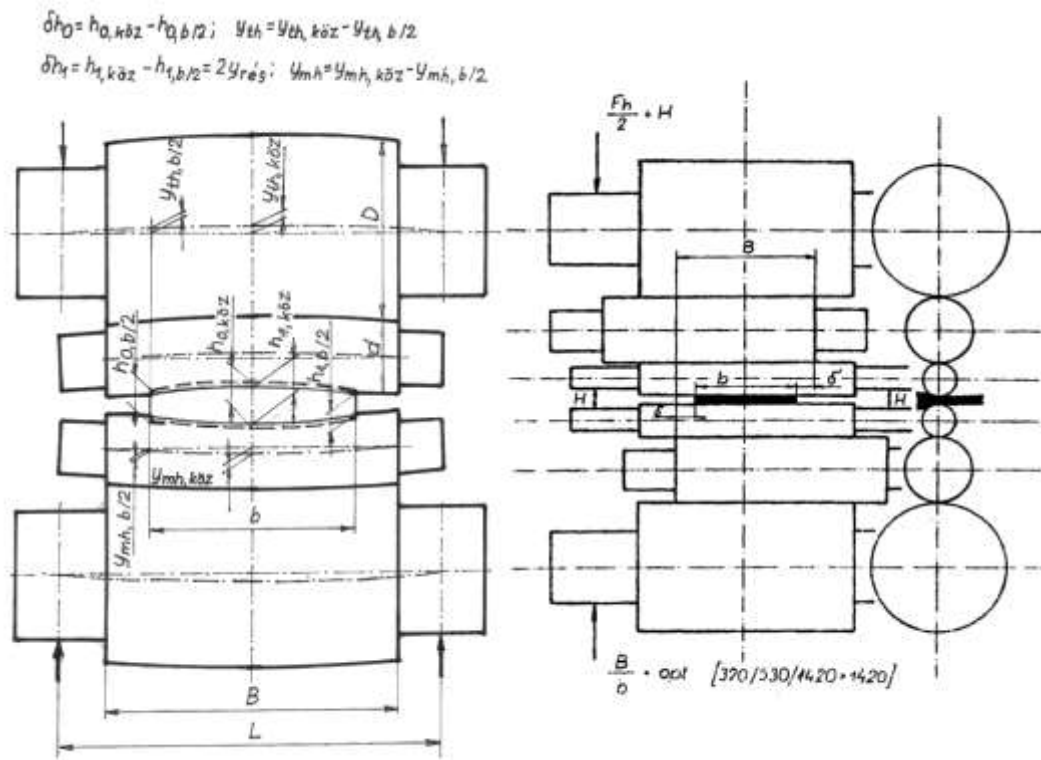


10.13. ábra Dresszírozó sor felépítése

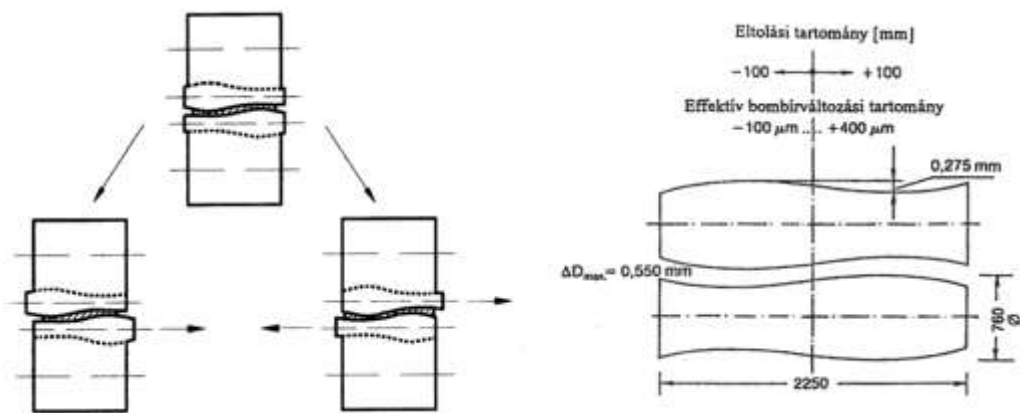
Ma már vannak olyan hideghengerművek, amelyeknél a gyártás összes fázisa egy folyamatba van összevonva a pácolástól a kikészítésig. Egy hagyományos hideghengerműben egy tekekeres átutató ideje 10-12 nap, míg a teljes folyamat összekapcsolása esetén a melegtekeres pácolható hőmérsékletre lehűlésétől számítva két órán belül kapunk készterméket.

A melegehengerművek készsorának hengerállványai négyhengeres kvartó és hathengeres HC hengerelrendezésűek, az előnyújtósorokon az együttesen dolgozó függőleges és vízszintes állványt univerzál hengersornak nevezzük. Az előnyújtó vízszintes állványa kvartó, vagy régebbi sorokon duó is lehet.

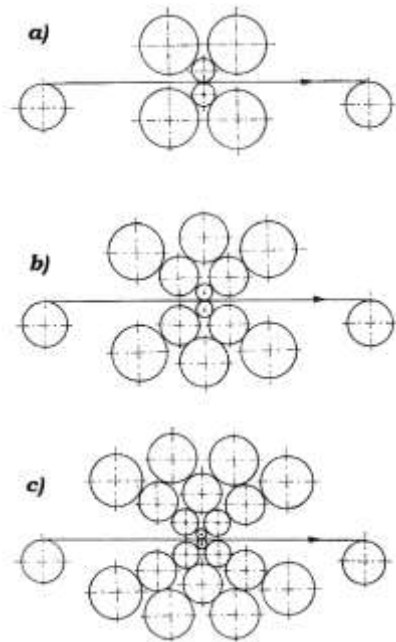
Hideghengerművekben kvartó, hathengeres HC (High Crown) (10.14. ábra), vagy CVC (Continuous Variable Curve) (10.15. ábra) síkfekvésszabályozással rendelkező hengerelrendezéseket alkalmaznak. Elsősorban keskenyszalag (kb. 500 mm széles szalagok) hideghengerművekben található a sokhengeres (hathengeres, Rohn 12 hengeres, Sendzimir 24 hengeres) hengerelrendezésű hengerállványok (10.16. ábra). Kvartó hengerállványon a hengerrés szabályozása a munkahengerek és a támhengerek csapágytőkéjébe beépített hidraulikus hengerekkel mindkét irányú hajlítással megoldott. A HC állványoknál a közbülső hengerek vízszintes eltolásával biztosítják a megfelelő hengerrést. CVC hengerállványok kvartó elrendezésűek. A „körte” alakra köszörült munkahengerek vízszintes irányú eltolásával alakítják ki a síkfekvést biztosító hengerrést.



10.14. ábra Kvartó és HC hengerek elrendezése



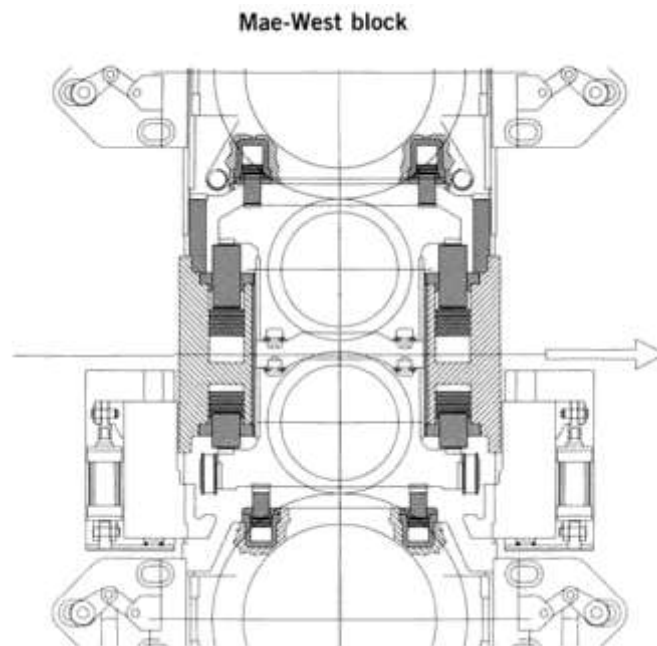
10.15. ábra CVC hengerek elrendezése



10.16. ábra *Különböző henger elrendezések*

*a) hathengeres, b) tizenkét hengeres Rohn,
c) huszonnégy hengeres Sendzimir hengersor*

A hengerdomborítás és így a hengerrés dinamikus szabályozása az intenzív hengerhűtés mellett a munkahengerek (CVC), vagy a közbenső hengerek (HC) vízszintes irányú eltolása, kvartó hengersorokon a munkahengerek mindkét irányú hajlításával. (10.17. ábra)



10.17. ábra *Hengerrés szabályozás a munkahengerek mindkét irányú hajlításával*

11. Lapos termékek meleghengerlése

11.1. Durvalemezek meleghengerlése

A durvalemez egyedi darabonként hengerelt táblalemez. A mérettűrés előírásai is eltérnek a szélesszalagok és a szélesszalagból darabolt táblalemez mérettűréseitől. A durvalemezt rendszerint kvartóállványon hengerlik, ezért az európai szakirodalom kvartólemeznek (kvartoblech – német elnevezés) is nevezi.

A korszerű durvalemez hengerművek kiinduló alapanyaga lehet tuskóból hengerelt laposbuga vagy folyamatosan öntött lemezbuga. A korszerű durvalemezsorokon a hengerelhető maximális lemezszélesség a korábbi 3500 mm-ről 5000 mm-re nőtt.

11.1.1. Durvalemez hengersorok felépítése

A durvalemez hengersorok technológiája a reverzáló hengerlés és várhatóan nem lesz változás. A durvalemez méret- és minőségválasztéka olyan széles, hogy a leggazdaságosabban az egyedi reverzáló állványon végzett hengerléssel valósítható meg. Az egyállványos durvalemezsorok mellett a hengerlési kapacitás növelése érdekében kétállványos sorokat is építenek, ahol mindkettő reverzáló hengerállvány.

A durvalemezsorok lehetnek:

- egyállványos sorok – duó, Lauth trió, kvartó,
- szélesszalag hengersorok előnyújtó sora,
- kétállványos sorok,

Korszerű durvalemezsorok kvartó hengerállványokkal üzemelnek. Felépítésük:

- egyállványos torlóállvány nélkül,
- torlóállvánnyal kiegészítve- univerzál állvány,
- két állványos sor torlóállványokkal,

Korszerű kvartó állvány adatai:

- ikermotoros hajtás,
- munkahengerek mindkét irányú (+ és -) hajlítása,
- hengerpalásthossz 5500 (mm)
- munkahenger átmérő D_{mh} : 900-1000 (mm),
- támhengerátmérő D_{th} : 1950-2100 (mm),
- maximális hengerlési erő F_{max} : 78500 (kN),
- maximális nyomaték $M_{mot\ max}$: 2×2950 (kNm),
- maximális motorteljesítmény $P_{mot\ max}$: 2×11540 (kW),
- állvány rugóállandója CA: 6000-8000 (kN/mm),

11.1.2. A durvalemez gyártási folyamata

- bramma darabolás a késztermék méret és az izzítókemence befogadóképessége függvényében, UH vizsgálat a hibás darabok kiszűrése érdekében,
- a betét hevítése hengerlési hőmérsékletre,
- a kiadott bramma revétlenítése hengerlés előtt,
- hengerlés,
- melegegyengetés és szabályozott lemezhűtés,
- táblák méretre vágása,
- normalizáló hőkezelés – a termomechanikus hengerlés kivételével előírás - minden 16 mm és vastagabb méretre,

- hideg egyengetés,
- próbázás, kikészítés.

Szűrasterv kialakítása

A korszerű durvalemez sorokon a következő alakításokkal hengerelnek:

- torlószűrások – ha van függőleges állvány – feladata az első szűrásokban a revétlenítés, majd a bramma oldalainak az alakítása és a végső szélesség beállítása, a torlási technológia részletes ismertetése a szélesszalagok hengerlésénél.
- nyújtó szűrások hosszirányban,
- nyújtó szűrások keresztirányban, feladata kettős, egyrészt a hengerelt brammák szélessége kisebb mint a durvalemez szélessége, ezért a kész szélesség csak szélesítő szűrásokkal érhető el, amelyhez többszöri fordítás szükséges, másrészt a két egymásra merőleges irányú alakítás kedvezőbb izotróp tulajdonságokat biztosít.

A durvalemez hengerlés szűrasterve négy egymást követő szakaszra osztható (11.1. ábra):

- I. Az első szakaszban – első szűrásban – a maximális magasságcsökkenést a befogási határszög korlátozza.

$$\Delta h \leq D_m (1 - \cos \alpha_{krit}) \quad (11.1.)$$

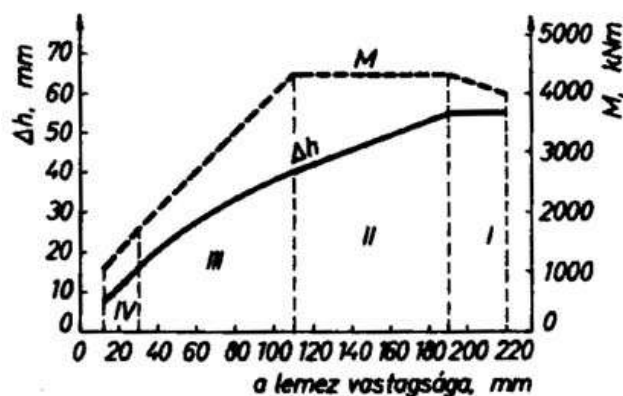
α_{krit} - az áthúzási feltételből számítható befogási szög, durvalemez hengerlésnél 18°-20°-ra lehet felvenni.

- II. A második szakaszban a magasságcsökkenést a sorvonómotor maximális nyomatéka határozza meg. Amíg a geometriai viszonyok az $(l_d/h_k) = 1$ értéket nem érik el, a magasságcsökkenések az egymás után következő szűrásokban lineárisan csökkenő jellegűek.

- III. Ezen szakaszban a magasságcsökkenést az állandó hengerlési erő feltétele szabja meg. A megengedhető hengerlési erőt a hengerlapok maximális terhelhetősége, valamint az adott geometriájú hengerrés stabilizálása határozza meg, mely a hengerelt lemez síkfekvését biztosítja. A magasságcsökkenés a lemez vastagságának a függvényében parabolikus összefüggést mutat. Az állandó hengerlési erőt eredményező magasságcsökkenések és így az egymást követő nyomott ívek hossza is egyre kisebbek lesznek. Az állandó hengerlési erő esetén a hengerlési nyomaték monoton csökkenést mutat.

$$\left(\frac{l_d}{h_k} \right) < 1,0 \quad F \approx \text{állandó} \quad (11.2.)$$

- IV. Az utolsó 1 - 3 szűrásban a cél az egyenletes vastagság, a jó felületi minőség és a síkkifekvés biztosítása, ezek a simító szűrások.



11.1. ábra Durvalemez szűrésterve

A hőkezelés általában normalizálás. A termomechanikus alakítással hengerelt durvalemezeknél értelemszerűen a normalizáló hőkezelés elmarad és a megfelelő lemezhűtő rendszer biztosítja a megfelelő mechanikai tulajdonságok eléréséhez szükséges hőmérsékletet. A soronkövetkező technológiai lépések:

- hidegegyengetés,
- próbázás,
- vágási helyek berajzolása,
- táblalemezek kivágása,
- késztermék csomagolás.

Durvalemezek, de a szélesszalagok hengerlése során is a mechanikai tulajdonságok anizotróppá válnak. Az anizotrópia oka, hogy a metallurgiai eredetű zárványok meleghengerléskor sorokba rendeződnek, megnyúlnak és ezzel a keresztirányú alakváltozást akadályozzák. Az anizotrópia csökkentési lehetősége, elsősorban metallurgiai eszközökkel az acél tisztaságának a növelése, a szélesítő és a nyújtó szűrások arányának megválasztása, valamint a hengerlés befejező hőmérsékletének megválasztása.

Meleghengerléskor az alakított darab keresztmetszete csökken, azonban a térfogat-állandóság következtében a téglalap keresztmetszetű daraboknál a vastagságcsökkenéssel egyidejűleg a darab szélessége nő – szélesedik.

11.2. Szélesszalagok meleghengerlése

A szélesszalag hengerek a feldolgozóipar tömegtermelésének egyre nagyobb minőségi követelményeit elégítik ki. A meleg szélesszalagokkal szembeni követelmények:

- a szalag teljes hossza és keresztmetszete menti szélesség, vastagság és szelvényprofil méretszórás minimalizálása,
- lehetőség szerinti legkisebb szalagvastagság,
- a szalag síkfekvése és egyenessége,
- behengerelt revétől mentes felület,
- homogén mechanikai tulajdonságok
- gazdaságos gyártás.

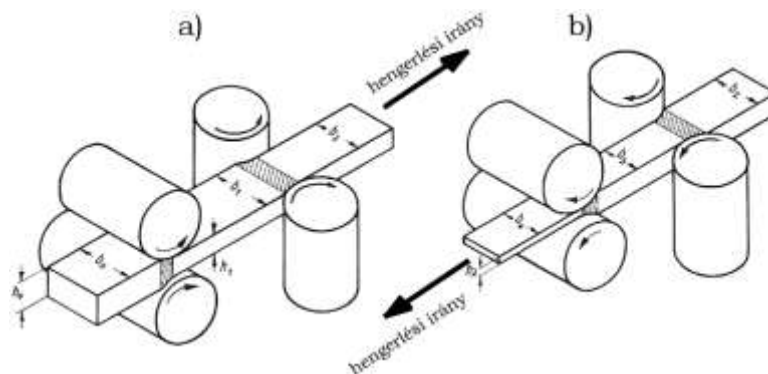
A szélesszalag gyártás fázisai:

- betét hevítése,
- előnyújtás,
- készméretre hengerlés,

- szalaghűtés, csévélés,
- próbázás és kikészítés (darabolás, hasítás, szélestekercs készáru).

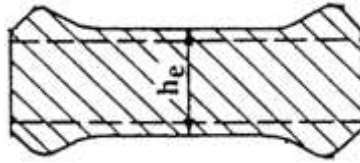
11.2.1. Folyamatosan öntött brammák előnyújtása előlemezzé

A folyamatosan öntött brammák tárolása a brammatéren történik adagonként. A melegepedésre érzékeny acélminőségeket leöntés után meleg állapotban teszik kemencébe. A brammák hengerlési hőmérsékletre hevítése tolokemencékben vagy léptetőgerendás kemencékben történik. A kemencék az előnyújtó sor bevezető görgősorához csatlakoznak a görgősor hossz tengelyére merőlegesen. A kemencék gázellátása általában földgázzal történik, kokszolóművel is rendelkező vertikumokban kamragázzal, vagy a kettő keverékével. A tolokemencében a vízzel hűtött csúszósíneken tolják tologéppel a brammákat. A kemencét hosszirányban három szakaszra lehet bontani, előmelegítő, izzító és hőkiegyenlítő szakaszra. A csúszósínek hőtőhatásának következtében a sínhelyek hidegebb sávként jelentkeznek. Ennek megszüntetésére szolgál a csúszósín mentes hőkiegyenlítő szakasz. A kemencéből kiadott hengerlési hőmérsékletre felhevített brammák először az előnyújtó sor görgősorára kerülnek. A korszerű hengerművekben a görgősoron található egy magasnyomású revétlenítő berendezés a primér reve eltávolítására. Az előnyújtás a hengermű felépítésétől függően reverzáló univerzál állványon (félfolytatólagos sor) vagy 4-5 állványos folytatólagos soron történik. Az előnyújtó állványok is el vannak látva magasnyomású revétlenítő rendszerrel. Elsősorban a félfolytatólagos soroknál a kifutó görgősor végén helyezkedik el a coil-box berendezés. A készsorba beadandó előlemez végeit levágják dobrendszerű repülőollóval. Az előlemezről a minimális veszteségű vágás biztosítása érdekében folyamatszabályozási rendszereket fejlesztettek ki. Az előnyújtósor és a készsor között haladó előlemez revésedik – szekunder reve – amelyet a sor előtt elhelyezett magasnyomású revétlenítő rendszer távolít el. A készsorok előtt revetőrő állványokat ma már nem alkalmaznak. A készsorok 6 – 7 állványosak, hengerlés közben a folytonossági feltétel biztosításához szükséges fordulatszám szabályozást az állványok közötti hurokszabályzók végzik. Az előnyújtósoron is és a készsoron is a munkahengereket vízzel hűtik. A hengerelt darab hőmérsékletének a szabályozhatósága miatt az állványok között függőnyhűtő szakaszokat telepítenek. A kifutó görgősoron van a lamináris hűtőszakasz, mely biztosítja a minőségnek megfelelő hűtési sebességet és a csévélési hőmérsékletet. Előnyújtó sor vízszintes állványán a bramma oldalirányban korlátozás nélkül, szabadon szélesedhet, amelyet függőleges torló hengerekkel alakítanak. Ezt szemlélteti a 11.2. ábra, ahol a) esetben a vízszintes állvány felől, b) esetben irányváltással a függőleges állvány felől történik a hengerlés. Torlással végzett előnyújtáskor szabályozott szélesedésről beszélünk.



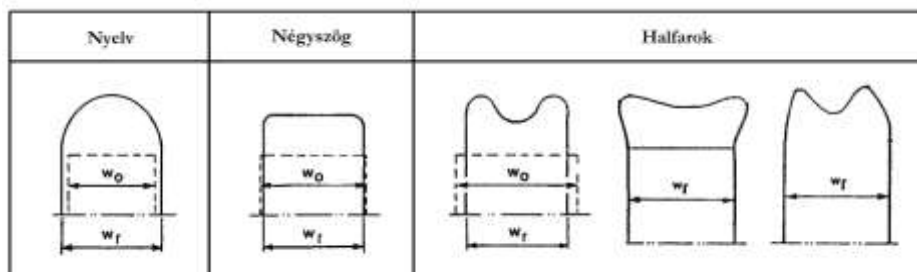
11.2. ábra Torlással végzett előnyújtás

Torlaskor a darab vastagsága csak csekély mértékben változik, jelentős viszont a helyi alakváltozás a torzult széleken. Ezt a kétoldali alakváltozást szemlélteti a 11.3. ábra, mely a torló szűrés utáni jellegzetes „kutyacsont” alakot mutatja be. A torlással megvastagodott szélek – kutyacsont alak – az előnyújtó szűrősternv függvényében különféle nyelv, halfarok vagy egyenes vég alakot eredményez.



11.3. ábra Torlás utáni „kutyacsont” alakú keresztmetszet

A végalak felismerő és automatikus, optimális végvágást biztosító rendszerek telepítése a veszteséget csökkenti. A minimális veszteséget a négyszög alakú előlemezvég biztosítja, amelyhez a torolt keresztmetszet szélszabályozása szükséges (11.4. ábra).



11.4. ábra Előlemez végalakok

Torlási technikák és az előlemez végalak szabályozása

Hagyományos sima palástú függőleges hengerekkel nagy torlásokat nem lehet elérni a szélek felgyűrődése miatt. Ezért alkalmazzák a folytatólagos előnyújtó sorokon a „C” betű formára kialakított függőleges hengereket, amelyekkel nagyobb torlásokat végezhetnek.

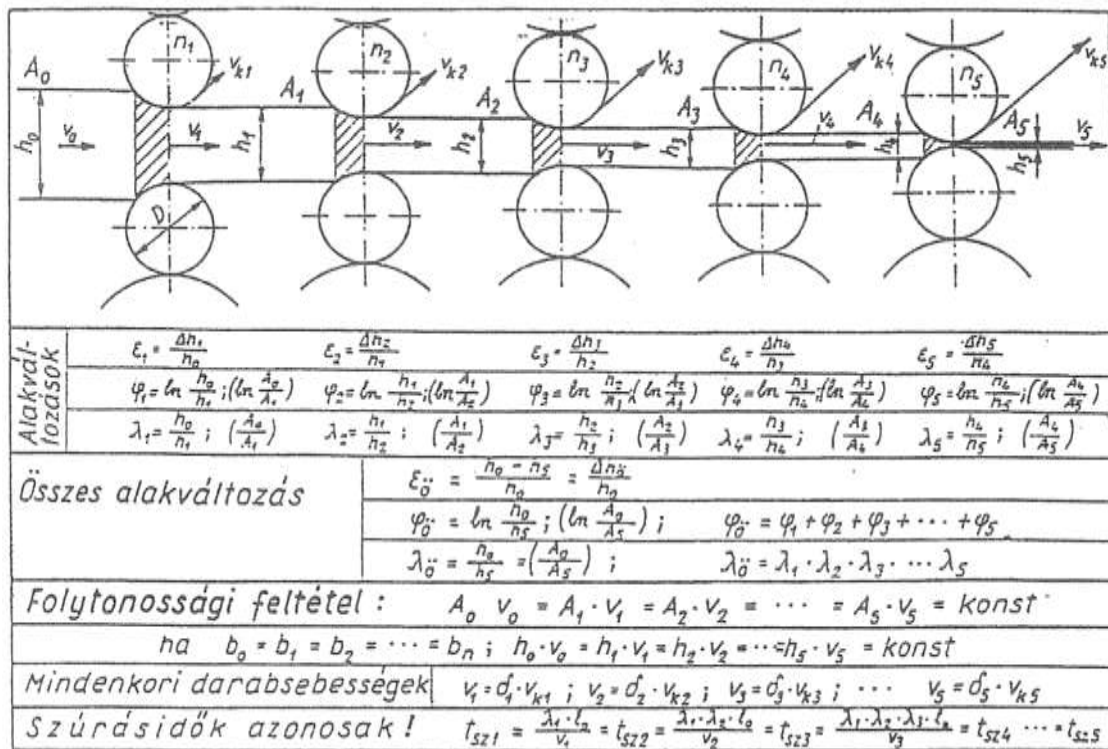
A végalak módosítására alapvetően két módszer terjedt el. Az egyik a saroknyomó prés, amelyik a bramma két végén végzett saroknyomással módosítja a hosszirányú anyagáramlást és egyenes vég alakokat hoz létre a csukás vég helyett. A másik módszer az alternáló mozgást végző torlöhengerek alkalmazása a szélességszabályozáshoz. A „kutyacsont” alak többletanyagát az alternáló mozgással kialakított benyomódások veszik fel.

Világszerte terjedőben van a bramma torlóprés telepítése nemcsak az új hengerművekben, hanem a régi hengerművek rekonstrukciójánál is. A bramma torlóprés szimmetrikusan két oldalról működő vízszintes excenteres prés, amely a bramma áthaladása alatt max. 350 mm – es szélesség csökkenést tud elérni a 240 mm vastag brammán, míg a hagyományos torló hengerléssel összesen maximum csak 100 mm szélességcsökkenést lehet elérni. A torlóprés már az első szűrésben beállítja a készméretet, a további vízszintes szűrésok után a szélesedést kell a függőleges állvánnyal torolni.

11.2.2. Készrehengerlés technológiája

A coil-box után még a készsor előtt helyezkedik el a végvágó olló, amely az előlemez elejének és végének a levágására szolgáló berendezés. A készsori hengerlés megkezdése előtt

az előlemez felületéről el kell távolítani az előnyújtás után keletkezett revét. Ezt a revét szekunder revének hívja a szakirodalom. A coil-box berendezésnek is a fel- és lecsévéléssel jelentős revesfeszítő és revétlenítő hatása van. A revétlenítő rendszer kollektorai közvetlenül a készsor első állványa előtt helyezkednek el. A készrehengerlés a Steckel sor kivételével minden esetben folytatólagos, a készsor általában 6 vagy 7 állványból áll egy tengelyvonalban egymástól 5-6 m-re. Az állványok kvartó, vagy részben hathengeres rendszerűek. A folytatólagos sori hengerlésre a folytonossági feltételt kell alkalmazni (11.5. ábra).

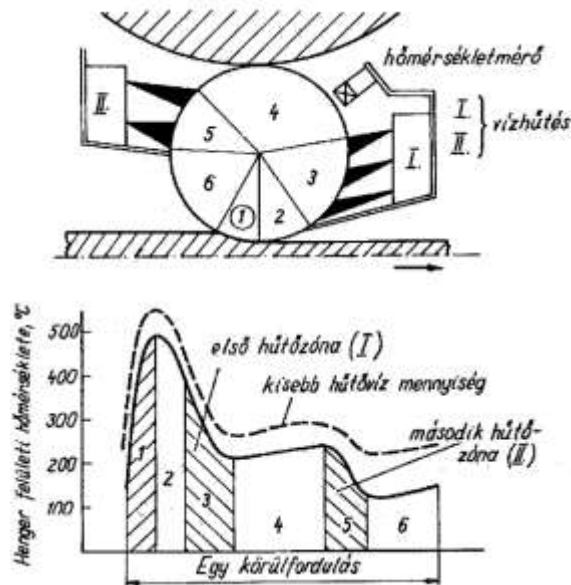


11.5. ábra Folytonossági feltétel készsori alkalmazása

A készsoron az anyag áthaladását állványközi mechanizmusok, asztalok, terelőlécek segítik. A muka- és támhengereket az előnyújtósor hengereivel együtt meghatározott időszakonként, meghatározott szalaghossz kihengerlése után cserélni kell. A támhengerek cseréje után az elektrohidraulikus vastagságszabályozás pontos működéséhez és az automatikus résbeállításához felveszik minden állványnál az új hengerekkel az állványok rugalmassági jelleggörbéjét.

A készsori hengerlés feladata a hengerelt szalag elvárt mechanikai tulajdonságainak a biztosítása mellett a szalag alaki előírásainak teljesítése. Az alaki előírások: a vastagságtűrés, szélességtűrés, szelvényalak, hullámosság. A vastagságtűrésen belül a szalag hossza menti vastagság biztosításának eszközei a sor utáni vastagságmérő és a vastagságszabályozási rendszer, mely a vastagság változására és az állványonként várható erőre szabályoz. A vastagságszabályozás rövidlökötű hidraulikus hengerekkel (kapszulákkal), vagy a hengerállító orsók helyett hosszúlökötű hidraulikus hengerekkel történik. A szalagszelvény szabályozás eszközei: a munkahengereknek a hengerlési programnak megfelelő köszörült alapdomborítása, a hengerek vízűtése és a hőállapotuk folyamatos mérése, a hatékony hengerrés szabályozás számos eszközével, a munkahengerek kétirányú hajlítása a csapágytökébe beépített hidraulikus hengerekkel, munkahengerek vízszintes irányú eltolása és „körte” alakú profilírozása (CVC elrendezés), hathengeres hengerállványokon a közbenső hengerek vízszintes irányú eltolásával. Hengerlés közben a munkahenger hőmérsékletének

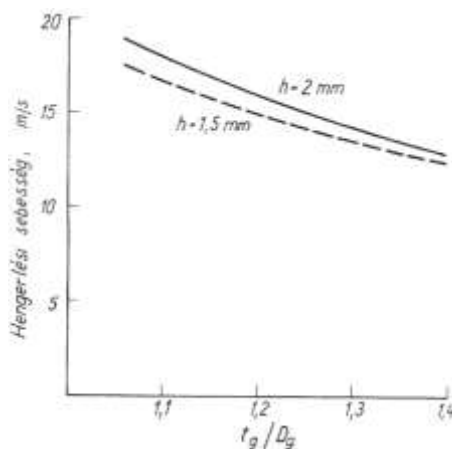
egy körfordulás alatti változásait a 11.6. ábra szemlélteti. A hengerek vízhűtését a hengerlési program lefutása, ütemessége szerint kell szabályozni, mert a munkahengerek hőprofiljának a változása szelvényalak és vastagság változását eredményezi.



11.6. ábra Hengerhőmérséklet egy körfordulás alatt

A hengerlés előre meghatározott hosszúságú garnitúrákban történik. A hengerlési garnitúrát a kihengerelt szalagok hossza mellett az ékszabály is jellemzi, amely a hengerelt szélességek folyamatos csökkenését jelenti a hengerkopás miatt. A meleg szélesszalag hengerművekben a berendezések és a szabályozástechnika fejlődésével a hengerlési végsebesség is folyamatosan nőtt. A végsebesség növelésének azonban gyártástechnológiailag jól definiálható határai vannak. A hengerlési sebességet a készsorból kifutó szalagvég mozgási viszonyai a csévélig, valamint a hűtőszakaszon a lehüléshez szükséges idő korlátozza.

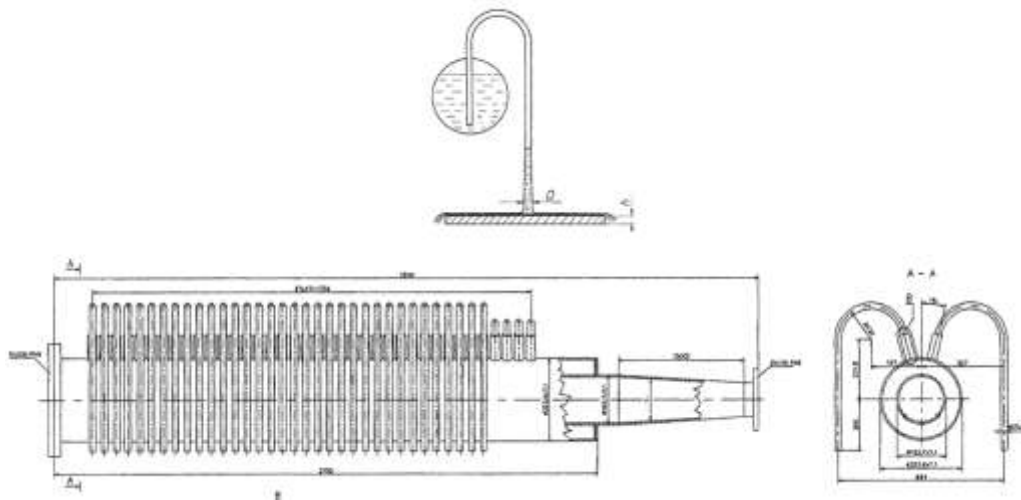
A szalagvég a készsort elhagyva a görgősoron a szalagvastagságtól és a sebességtől függően felhajlik, egy kritikus sebesség fölött az aerodinamikai felhajtóerő következtében felemelkedik. A szalagvég nemcsak felfelé, hanem a saját súlyának következtében lefelé is elhajolhat és elakadást eredményez. Az elakadási határsebességet mutatja a 11.7. ábra.



11.7. ábra Elakadási határsebesség
 t_g – görgőosztás, D_g – görgőátmérő

11.2.3. Hőmérsékletszabályozás a készsoron és a kifutó görgősoron a csévéelőig

Hőmérsékletszabályozás kiemelt pontjai – a beadási hőmérséklet a készsorba, hőmérsékletváltozás a készsoron, állványközi hűtés, hengerlési véghőmérséklet, szalaghűtés a kifutó görgősoron, csévéelési hőmérséklet. Ma szinte kivétel nélkül szivornyás lamináris szalaghűtést alkalmaznak. A szalag görgősorral érintkező alsó felületét fúvókákon keresztül vízszugárral hűtik. A szivornyás lamináris vízűtés vízugarát és a felső kollektort mutatja a 11.8. ábra.

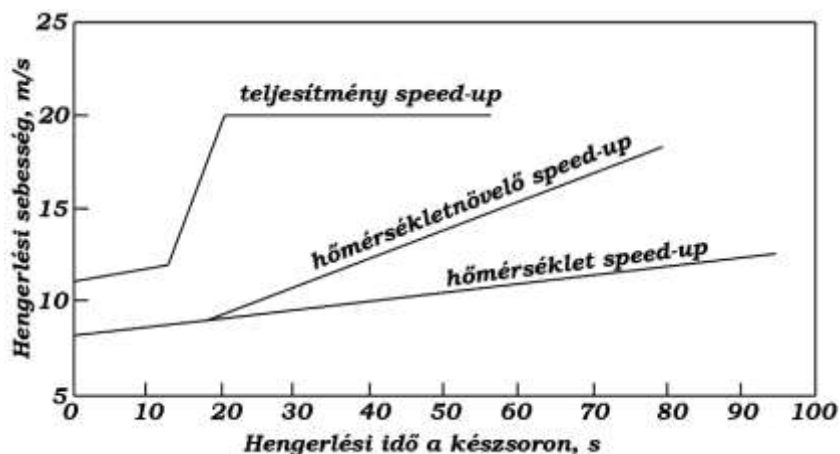


11.8. ábra Felső kollektor a szivornyás lamináris vízűtésnél

A gyártott anyagminőségtől függően különféle hűtési stratégiát és csévéelési hőmérsékletet kell biztosítani. Ezért a technikai lehetőségüktől függően gyorsítósos hengerlést alkalmaznak egyes hengerművekben.

A gyorsítósos hengerlésnél a szalag felgyorsítása akkor kezdődik, amikor a szalagot a csévéelő már biztonságosan befogta, eddig a hengerlési sebesség állandó és kisebb a határsebességnél. A befogás után a hengersor-görgősor-csévéelő szinkronizáltan felgyorsul. A gyorsítósos hengerlésnél a gyorsítás nagysága szerint háromféle eljárást különböztetünk meg. (11.9.ábra)

1. Hőmérséklet speed-up. Gyorsítás állandó hőmérsékletre. A gyorsítás $a=0,04...0,055$ m/s^2 . Ezt a gyorsítási módszert a vékony szalagok (0,8-1,5 mm) meleghengerlésénél alkalmazzák.
2. Hőmérsékletnövelő speed-up. Emelt hőmérsékletű gyorsításnál a készrehengerlés során a szalag hőmérséklete növekszik, ezért a szalaghőmérséklet emelkedéssel összhangban növelni kell a szalaghűtés intenzitását. A gyorsítás a csévéelői befogástól kezdve folyamatos. A gyorsítás $a=0,08...0,12$ m/s^2 .
3. Teljesítmény speed-up. Teljesítmény gyorsítósos módszer, ha a gyorsítást egy rövidebb szakaszra korlátozzuk, majd egy magas állandó sebességi szint tartása. A gyorsítás $a=0,3...0,4$ m/s^2 . A gyorsítás alatt intenzív hűtés, majd az állandósult sebesség mellett csökkenő intenzitás.



11.9. ábra Gyorsításos hengerlés változatai

11.2.4. A melegen hengerelt szalag méreteltérése

A hengerlési erőtlől független tényezők

- hengerek felmelegedése,
- hengerek kopása,
- hengerek excentricitása.

A hengerlési erőtlől függő tényezők

- szalaghőmérséklet változása,
- a befutó darab vastagság ingadozása,
- hengerlési sebesség változása,
- a hengerállvány rugalmassági modulusának a változása,
- szalagfeszítés változása.

A hengerlési erőtlől független tényezők:

A hengerek felmelegedéséből adódó mérethibák abból adódnak, hogy a hengerek beépítésekor a hengerek csarnokhőmérsékletűek és csak lassan melegednek fel üzemi hőmérsékletre, a hengerátmérőjük nő, a hengerköz csökken. Hengerléskor a nyomott felületen a meleg darabbal való érintkezéskor a nyomott felület mentén egy adott rétegvastagságban felmelegszik a munkahenger, majd a henger elfordulásakor konvektív hőátadással és hűtővízzel a felvett hő jelentős része eltávozik. (11.6.ábra) A hengerek belsejébe hatoló hő fokozatosan növeli a henger hőtartalmát amíg az egyensúlyi állapot beáll, majd az elvezetett hő és a hengerekbe áramló hőmennyiség megegyezik. Ütemtelen hengerlés esetén, ha a hengerhűtő vizet nem szabályozzák a hengerlési szünetben a hengerrés megnő, jelentős hosszirányú vastagságváltozást és szelvényalak-változást okoz. A munkahengerek átmérőnövekedése:

$$\Delta D_{mh} = \alpha \cdot D_{mh} \cdot (T_{\text{átl}} - T_e) \quad (11.3.)$$

ahol:

- ΔD_{mh} – munkahenger átmérőnövekedése,
- α – hengerek anyagának lineáris hőtágulási együtthatója, $(14 \cdot 10^{-3})$ 1/s
- D_{mh} – munkahenger átmérő,

$T_{\text{átl}}$ – a henger átlaghőmérséklete,
 T_e – a henger hőmérséklete beépítéskor.

A hőmérséklet hatására bekövetkező hengerrés változás:

$$\delta h_{\text{hő}} = h_{\text{köz}} - h_{\text{szél}} = 2 \cdot (\Delta D_{\text{mh,köz}} - \Delta D_{\text{mh,szél}}) \quad (11.4.)$$

Ha feltételezzük, hogy a támhenger alkotója megközelítően egyenes, $T_{\text{th,köz}} = T_{\text{th,szél}}$.

A szalag méretváltozása a munkahenger hőmérsékletváltozás hatására.

$$\delta h_{\text{hő}} = 2 \cdot \alpha \cdot D_{\text{mh}} \cdot (T_{\text{mh,köz}} - T_{\text{mh,szél}}) \quad (11.5.)$$

A hődomborodás változása kihat a szalag keresztirányú vastagságának, a lencséségnek a változására is.

A hengerek kopása a hengerlés teljes hőmérséklettartományában kétféle mechanizmus szerint megy végbe, a mechanikai súrlódás koptató hatása okozza, valamint a hőfeszültségek által előidézett felületi fáradásos mechanizmus, mely elhanyagolható mértékű.

Hengerek excentrikus megmunkálásából adódó méreteltérések részben a hengerek megmunkálásának pontatlanságából, részben a henger csapok egyenlőtlen kopásából adódik.

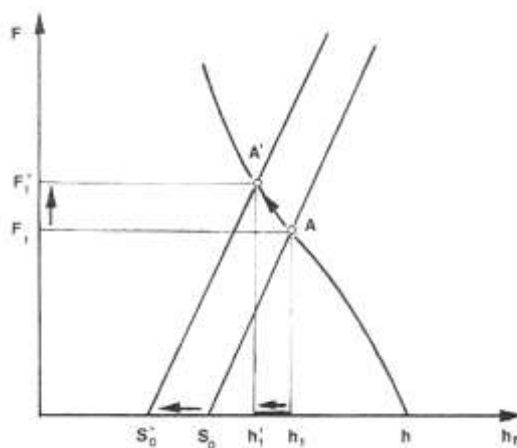
A hengerlési erőtlől függő tényezők befolyása a szalagok mérethibáira

A hőmérsékletváltozás hatása a hengerlési erőt befolyásolja. A h_0 vastagságú hengerelt darab befogásakor a beállított s_0 hengerrésből h_1 méretű szalagot hengerelnek, ezt szemlélteti a hengerlés karakterisztika diagramja (11.10. ábra).

$$h_1 = s_0 + \frac{F}{C_A} [\text{mm}] \quad (11.6.)$$

ahol:

s_0 – beállított hengerrés [mm],
 F – az állványban fellépő hengerlési erő [kN],
 C_A – az állvány rugóállandója [kN/mm].



11.10. ábra A hengerlés karakterisztika diagramja

A hengerlés karakterisztika diagramja és a hengerlési erő számítására szolgáló összefüggés bizonyítja, hogy a hengerlési erőtlől függő vastagságot befolyásoló tényezők közül a

legjelentősebb a darabhőmérséklet. A hengerlési erőt a hőmérséklet a hengerlendő anyag alakítási szilárdságán keresztül befolyásolja.

Hosszirányú hőmérséklet eltérés keletkezhet:

- tolokemencében a csúszósín hűtőhatása következtében kialakuló keresztirányú hidegebb csíkok,
- görgősori várakoztatás, sétáltatás a készsori beadás előtt – elsősorban termomechanikus hengerlés esete,

A hosszirányú hőmérsékleteltérésre példa a 10.4. ábra, ahol coil-box berendezés nélkül az előlemez végének a hőmérséklete 100°C-al is csökkenhet az elejéhez képest a sori bevezetéskor. Coil-box berendezés esetében ezt a hőmérsékletesést nem tapasztalhatjuk. Vastagabb szalagok esetében kismértékű hőmérséklet növekedés van. Az előlemez jelentősebb hőmérséklet eltérései a készsor első állványaiban vastagság és szelvényeltérést eredményez. Ez az ingadozás az egymást követő alakítások hatására a készsoron csökken.

A hengerrésbe befutó szalag két eltérő vastagságú szelvénye közötti Δh_0 vastagságkülönbség Δh_1 értékre csökken:

$$\Delta h_1 = \kappa \cdot \Delta h_0 \quad (11.7.)$$

$$\kappa = \frac{C_F}{C_A + C_F} \quad (11.8.)$$

A hengerállvány eredő rugóállandójának nagysága az erő vonalában lévő alkatrészek egyedi rugóállandójának értékétől függ:

$$\frac{1}{C_A} = \frac{1}{C_{\text{állványkeret}}} + \frac{1}{C_{\text{hengerek}}} + \frac{1}{C_{\text{orsó}}} \quad (11.9.)$$

A hengerállvány rugalmassági modulusza a támhengercserénél megváltozik, ezért kell minden támhengercsere után az állvány jelleggörbét újra felvenni.

Az AGC-elektrohidraulikus vastagságszabályozás az állványban fellépő hengerlési erőket méri, ennek megváltozása esetén állítja a hengerrést. A szabályozás alapegyenlete:

$$\delta h_r = \frac{C_F + C_A}{C_A^2} \cdot \Delta F \quad (11.10.)$$

ahol:

ΔF – hengerlési erő eltérés,

δh_r – hengerrés változás.

$$C_F = \frac{\partial F}{\partial \Delta h} \quad (11.11.)$$

ahol

$\partial \Delta h$ - a magasságcsökkenés megváltozása hengerrésben, amelyhez a ΔF erő tartozik.

A hengerrésből kilépő szalag vastagságát az állvány után elhelyezett vastagságmérő méri és a beállított vastagságtól való eltéréssel arányosan változtatja a hengerrés értékét. Ez a hátraszabályozás. A beállítandó részváltozás értéke:

$$\delta h_r = \frac{C_F + C_A}{C_A} \cdot \delta h \quad (11.12.)$$

ahol:

δh – mért vastagságetérés.

Ennek a szabályozásnak a holtideje nagyobb, ezért mindkét szabályozási módszert együttesen alkalmazzák.

Folytatólagos sorokon alkalmazzák az ún. előreszabályozást is, amely szintén a hengerlési erő mérésén alapul.

11.2.5. Melegen hengerelt szélesszalagok szelvényalakjának a szabályozása

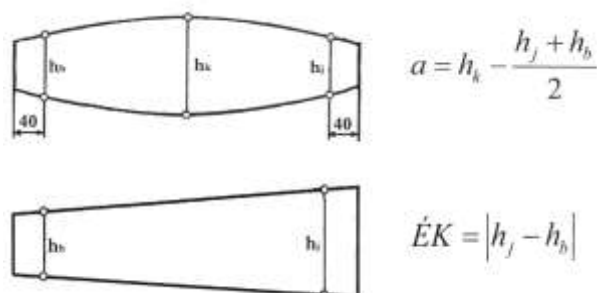
Szelvényalak a szélesszalag keresztmetsvénye bárhol a szalag hossza mentén. Ez a szelvényalak pozitív lencsés (konvex), lehet plánparalell és lehet negatív lencsés (konkáv).

A negatív (konkáv) lencsés szalag hideghengerlésre nem alkalmas. A melegen hengerelt szalagok egyengetéséhez (táblalemez, hasított szalag továbbfeldolgozáshoz) a plánparalellhez közelítő kis lencsésességű szelvényalak a kedvező, nem keletkezik az egyengetéskor rugalmas feszültség, mely a lézervágással történő feldolgozást megghiúsíthatja. A hideghengerléshez szabályos, a szabványokban előírt lencsés szelvényalak szükséges.

A szabványok két szelvényalak tulajdonságot különböztetnek meg:

- lencséséget,
- ékességet.

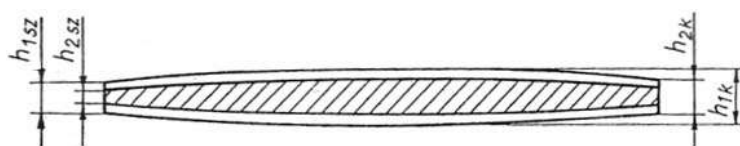
Lencséség (a) az ugyanazon keresztmetszetben mért vastagság a szalagközepén és a két szélétől 40-40 mm-re, az **ékesség** (ÉK) az ugyanazon keresztmetszetekben mindkét szalagszéltől 40-40mm-re mért vastagságkülönbség (11.11. ábra).



11.11. ábra Lencséség és ékesség meghatározása

Szelvényalak kialakítása

A szabályos lencsés szelvényalak kialakítása síkfekvő szalagot eredményez. Ebben az esetben az előlemez szelvényétől a készsor utolsó állványában az alakításig a nyújtási tényezőnek a szalag szélessége mentén állandónak kell lenni (11.12. ábra), a hideghengerműi továbbhengerlésnél is ez a szabály érvényes.



11.12. ábra Szelvényalak kialakítása

$$\text{szalagszélen: } \lambda_{sz} = \frac{h_{1sz}}{h_{2sz}}; \quad (11.13.)$$

$$\text{szalagközépen: } \lambda_k = \frac{h_{1k}}{h_{2k}}. \quad (11.14.)$$

Bármely keresztmetszetre általánosan $\frac{d\lambda_x}{dx} = 0$, ha a szalagszélesség futókoordinátája x .

Ebben az esetben a szélesség mentén a hengerelt szalag elemi szálainak hossza nem változik:

$$\ln(x) = \text{állandó} \quad (11.15.)$$

ahol l_n - a hengerrésből kifutó szalag hossza,

A szelvényalakot befolyásoló tényezők

A szelvényalak szabályozás célja, hogy a szalagkeresztmetszet geometriája egy előre meghatározott alakot vegyen fel, lehetőleg azonos legyen a tekercs elején és végén, szűk tőrésmezőben maradjon és egy hengerlési tételben belül tekercsről tekercsre azonos maradjon. A szalagprofil és a hengerrés összefüggést szemlélteti a 10.14. ábra kvartó és HC henger elrendezésénél, a 10.15. ábra CVC henger elrendezésénél. A szalagprofil szabályozásának hagyományos módja a munkahengerek köszörült alapdomborításának (bombírozásának) a kialakítása, változtatása a hengerek rugalmas deformációjának a kompenzálására. A munkahengerek domborítását az alkalmazott hengerlési garnitúrában hengerelt méretek és minőségek igényei szerint kell meghatározni. Ez természetesen gazdaságos hengerlési program esetén lehetetlen, ezért alkalmazzák a hengerrés külső erőkkel történő szabályozását.

A szelvényalakot befolyásolja:

- a hevítés egyenletessége, egyenlőtlen eloszlása a buga tömegében,
- előlemez szelvénye és szelvényhibái,
- a hengerelt darab kereszt- és hosszirányú hőmérséklete,
- a köszörült alapdomborítás jósága és mértéke a munkahengereknél és a támhengereknél,
- a hengerek hődomborodása, mely függ
 - o a hengerhűtés milyenségétől,
 - o a hengerlés ütemétől, követési időtől,
 - o hengerlési sebesség változástól,
- a hengerek kopásától, a hengerlési garnitúraszabály kialakításától és betartásától,
- hengerek alakváltozásától és a hengerrés szabályozásától.

Hagyományos kvartó hengerállványon a munkahengerek mindkét irányú, pozitív és negatív irányú hajlításával, a köszörült bombír megválasztásával, a hengerek hűtésével lehet a szelvényalakot szabályozni egy meghatározott szűrásterven belül. A hengerhajlító rendszerek működése az egyetlen lehetőség a szelvényalak szabályozására meleghengerlésnél az állandósult hengerhőmérséklet kialakulásáig.

A munkahenger hengerdomborítás nagyságát az alábbi összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$\Delta d = 2y_{th} + 2y_{mh} + \Delta k - \Delta t - 2\Delta m - dh \quad (11.16.)$$

ahol:

Δd – a köszörüléssel kialakítandó hengerdomborítás [mm],

y_{th} – a támhenger behajlás [mm],

y_m – a munkahenger behajlása [mm],

Δk – támhenger átlagos kopása [mm],

Δt – támhenger hődomborodása [mm],
 Δm – munkahenger hődomborodása [mm],
 dh – a lemez keresztirányú vastagságkülönbsége- lencsésége [mm].

A hengerrés kialakulása folytatódólagos kvartó hengerson: (10.14. ábra)

Az összefüggésből a hengereelt szalag lencsésége meghatározható:

$$dh = h^{köz} - h^{b/2}$$

$$dh = 2(y_{th}^k - y_{th}^{b/2}) + 2(y_{mh}^k - y_{mh}^{b/2}) - (t_{th}^k - t_{th}^{b/2}) - 2(m_{mh}^k - m_{mh}^{b/2}) - (d_{mh}^k - d_{mh}^{b/2}) \quad (11.17.)$$

Δk -a támhenger kopása a számításnál elhagyható értékű.

A munkahenger rugalmas vonalának elmozdulása a hengerközép és a szalagszél között

$$\left(\delta y_{mh}^{k-\frac{b}{2}} \right):$$

$$\left(\delta y_{mh}^{k-\frac{b}{2}} \right) = y_{mh}^k - y_{mh}^{b/2} = F \left(1 - \frac{b}{B} \right) \left[\frac{b^2 \cdot B}{18,8 \cdot E \cdot d^4} \left(6 - 5 \frac{b}{B} \right) + \frac{B}{2\pi \cdot G \cdot d^2} \right] [mm]$$

(11.18.)

A tám-és munkahengerek rugalmas vonalának együttes elmozdulása(δy_r):

$$\delta y_r = \delta y_{th}^{k-\frac{b}{2}} + \delta y_{mh}^{k-\frac{b}{2}} =$$

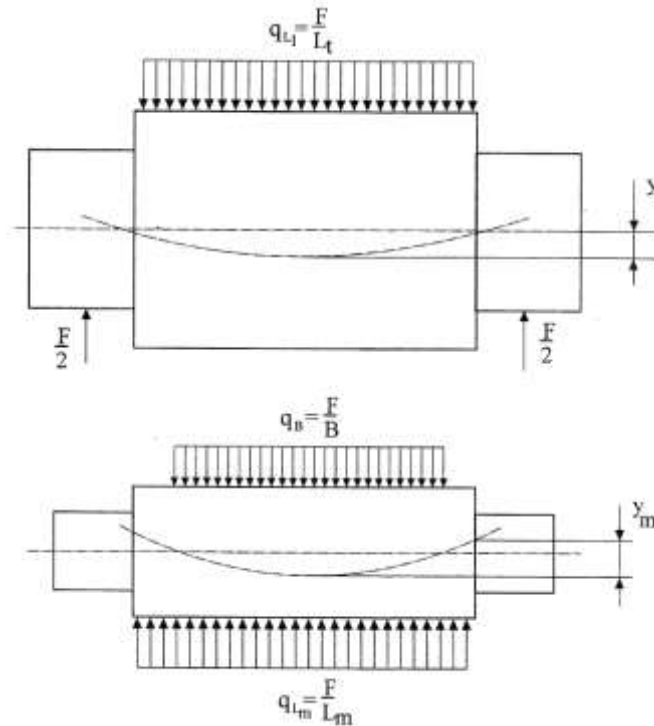
$$= \frac{F \cdot b^2}{\pi \cdot E \cdot D^4} \left(2L - \frac{7}{6}b \right) + \frac{b}{2\pi \cdot G \cdot D^2} + \left(1 - \frac{b}{B} \right) \left[\frac{b^2 \cdot B}{18,8 \cdot E \cdot d^4} \left(6 - 5 \frac{b}{B} \right) + \frac{B}{2\pi \cdot G \cdot D^2} \right] [mm]$$

(11.19.)

Hengerrendszer rugalmassági modulusza:

$$C_h = \frac{\delta y_r}{F} \quad (11.20.)$$

A munka – és a támhenger terhelésének sémáját a 11.13. ábra szemlélteti.



11.13.ábra Munkahenger és a támhenger terhelési sémája

11.2.6. A hengerelt darab hőmérsékletváltozása

Az egyes szúrásokban - az előnyújtáskor és a készsori hengerlésnél – a hengerrésen történő áthaladáskor a hengerelt darabot az alakváltozási munka hőegyenértéke és a súrlódás következtében fejlődő hőmennyiségnek a darabba áramló hányada melegíti. A hengerelt darabnak a hengerekkel és a hűtővízzel történő érintkezéskor a hőleadását, valamint az állványok közötti távolság megtétele alatti hőszugárzás a hőmérsékletét a hőátadási tényező, a hőfeszültség és a rendelkezésre álló idő függvényében csökkenti. A hengerelt darab hőmérsékletét a melegedést és hűlést okozó tényezők együttes hatása befolyásolja.

Hőmérsékletcsökkenés a levegőn való hűlés és az állványközi hűtés hatására:

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

$$T_{sug} = T_{lev} + (T_{kezd} - T_{lev}) \cdot e^{\left(-\frac{K}{A c \rho} u t_g\right)} \quad (11.21.)$$

ahol:

- T_{lev} – környezeti hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$],
- $K=2(h_i+b_i)$ – a lemez kerülete [m^2],
- $A=h_i b_i$ – a lemez keresztmetszet területe [m^2],
- c – a lemez fajhője [$\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$],
- ρ – a lemez sűrűsége [kg/m^3],
- u – hőátadási tényező [$\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$],
- t_g – szállítási idő [s].

Az egyenlet egyes változóinak anyagminőségtől, hőmérséklettől és sebességtől való függését a teljes anyag tartalmazza.

Ha a darab szabad levegőn hűl, a lehűlést zömében a felületi sugárzás hozza létre, melyet a *Stefan-Boltzmann* összefüggéssel lehet meghatározni:

$$\Delta T_{sug} = \frac{2 \cdot C_s \cdot t_1}{3,6 \cdot h \cdot \rho \cdot c} \left[\left(\frac{T_{sz} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k + 273}{100} \right)^4 \right] [^{\circ}C] \quad (11.22.)$$

ahol:

ΔT_{sug} – hőmérsékletcsökkenés [$^{\circ}C$],
 T_{sz} – szalaghőmérséklet [$^{\circ}C$],
 T_k – környezeti hőmérséklet [$^{\circ}C$],
 C_s – a felületi sugárzási szám [$kJ/m^2h^{\circ}C$],
 c – a szalag fajhője [$kJ/kg^{\circ}C$],
 ρ – az acél sűrűsége [kg/m^3],
 h – szalag vastagsága [mm],
 t_1 – a szalag levegőn való tartózkodási ideje [s].

Hőmérsékletváltozás a hengerrésben:

Egy adott hengeralvány hengerrésében alakváltozást szenvedő szalag kilépő hőmérsékletét meghatározza:

- az alakváltozás során keletkező hőmennyiség növeli a szalag hőmennyiségét ΔT_{al} -értékkel,
- a henger és a darab között ébredő súrlódási hőmennyiségnek a szalagba áramló része növeli a szalag hőmérsékletét ΔT_{surl} -értékkel,
- a hengerek által elvont hőmennyiség csökkenti a szalag hőmérsékletét ΔT_{heng} -értékkel.

A darab hőmérsékletét a hengerrésből történő kifutáskor az alábbi rész hőmérséklet összegek adják:

$$T_{ki} = T_{be} + \Delta T_{al} + \Delta T_{surl} - \Delta T_{heng} \quad (11.23.)$$

Alakváltozási hőmennyiség az anyag hőmérsékletét ΔT_{al} értékkel növeli:

$$\Delta T_{al} = \frac{100\varphi}{c \cdot \rho} (k_f - \sigma_{h,köz}) \quad (11.24.)$$

ahol:

$\varphi = \ln(h_{be}/h_{ki})$ – a szűrés logaritmikusan alakváltozása,
 k_f – az anyag alakítási szilárdsága [N/mm^2],
 $\sigma_{h,köz}$ – a hengereelt szalagban fellépő közepes húzófeszültség,
 c – az acél fajhője [$kJ/kg^{\circ}C$],
 ρ – az acél sűrűsége [kg/m^3].

A henger és a darab között ébredő súrlódási hőmennyiségnek a szalagba áramló része ΔT_{surl} :

$$\Delta T_{surl} = \frac{10^6 \cdot \xi \mu F (1 - e^{-\varphi})}{c \cdot \rho \cdot b \cdot h_{ki}} \quad (11.25.)$$

ahol:

ξ – a keletkezett súrlódási hőmennyiségnek a hengerekbe áramló hányada-0,1,
 μ – súrlódási tényező a hengerrésben a hengerfelületen.

$$\mu = C_1 (C_2 - 0,0005 \cdot T - 0,0056 \cdot v) \quad (11.26.)$$

ahol:

T – hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$],
v – sebesség [m/s].

A C_1 és a C_2 értékei

	C_1	C_2
Előnyújtó sor kemény anyagra	1,2	1,04
egyéb anyagra	1,6	1,04
Folytatólagos sorra	1	0,8

A hengerek által elvont hőmennyiség:

$$\Delta T_{heng} = \frac{2u_{heng} \cdot l_d}{3600 \cdot c \cdot \rho \cdot v \cdot h_{ki}} (T_{sz} - T_{heng}) \quad (11.27.)$$

ahol:

u_{heng} – a hengerelt darab és a hengerek közötti hőátadási tényező, értéke 21000 [kJ/m²h^oC],
 T_{sz} – szalag közepes hőmérséklete a hengerrésben [$^{\circ}\text{C}$],
 T_{heng} – hengerek közepes felületi hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$],
v – hengerlési sebesség [m/s],
 l_d – nyomott ív [mm],
 h_{ki} – hengerrésből kilépő szalag vastagsága [mm].

Az előlemez csévélő (coil-box) hatása a szalaghőmérsékletre

A feltekercselés alatti hőkiegyenlítődés hatására minimálisra csökkenti a hőmérsékletkülönbséget a darab hossza mentén, a darab eleje és vége között.

A szalag hőmérsékletének a meghatározása a folytatólagos soron:

Egy vizsgált hengerállvány hengerrésében alakváltozást szenvedő szalagnak a hengerrésből kilépő hőmérsékletét az alábbi hőegyensúly határozza meg:

- egy hengerállványt elhagyó szalag a folytatólagos sor két állványa között a szabad levegőn hőszigeteléssel hűl,
- egy hengerállványt elhagyó szalag a folytatólagos sor két állványa között hőszigeteléssel és állványközi vízűtéssel hűl. Ebben az esetben a hőátadási tényező értékét az állványok között alkalmazott vízteljesítménnyel kell korrigálni, $u_{ak} = u \cdot \xi_q$,
- a hengerrésben a már ismert folyamatok játszódnak le az alakítás hatására:
 - a. alakváltozási és súrlódási hőmennyiség az anyag hőmérsékletét növeli,
 - b. a hengerek által elvont hőmennyiség csökkenti a szalag hőmérsékletét, ugyanakkor a hengerek hőmérsékletét folyamatosan növeli a hőegyensúly beálltáig.

A szalaghűtés hőmérsékleti viszonyai

A szalaghűtés feladata, hogy a szalagsor utolsó készsori állványából kilépő szalag hőmérsékletét az anyagminőségtől függő hőmérsékletre lehűtse a minőségtől függő hűtési intenzitással (stratégiával). Ezt követi a szalag felcsévélése, ezért ezt a technológiát a csévélési hőmérséklet megadásának nevezik. A csévélési hőmérséklet függ még a hengerelt szalag vastagságától.

A leggyakrabban alkalmazott hűtőrendszer – felső hűtőrendszer réslamináris, az alsó hűtőrendszer permetező hűtési eljárással dolgozik.

A lamináris hűtésnek a lényege, hogy a hűtővizet kisnyomással és párhuzamos sugárban juttatjuk a szalag felületére. A vízrétegnek olyan vastagnak kell lenni, hogy megakadályozza az összefüggő gőzréteg keletkezését. A lamináris áramlás feltétele, hogy a kifolyó vízszögben a Reynolds-szám kisebb legyen mint 2.104. A Reynolds-szám a következőképpen fejezhető ki:

$$Re = v_{v\acute{z}} \frac{D}{\nu} \quad (11.28.)$$

ahol:

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

D – vízszög átmérője [mm],

ν – kinematikai viszkozitás [mm²/s].

A kiömlő víz egységnyi térfogata által elvitt hőmennyiség és a Reynolds-szám közötti összefüggés:

$$Q_v = 4,27 \cdot 10^7 \cdot Re - 0,645 [kJ/m^2 \cdot h] \quad (11.29.)$$

ahol:

Q_v – a víz által elvitt hőmennyiség.

A szalag felső felülete T_1 hőmérsékletéről T_2 hőmérsékletre hűl le.

A felső felület hőmérséklet csökkenése:

$$\Delta T_f = T_1 - T_2 = \frac{n \cdot \frac{D\pi}{2} \lambda \cdot (T_1 - T_v) \cdot \sqrt{\frac{D}{\nu}}}{2\sqrt{\pi a \cdot \rho \cdot c \cdot b \cdot h}} [^\circ C] \quad (11.30.)$$

ahol:

n – a vízszögek száma [db],

λ – az acél hővezetési tényezője $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$,

Az alsó permetező hűtésnél a lamináris hűtés mintegy 70%-a valósítható meg. Másrészt az alsó hűtés során alkalmazott vízmennyiség az egész vízmennyiség z -ed része, azaz a felső víz mennyiségének a $z(1-z)$ -szerese. Az alsó hűtés hőmérséklet csökkenése a felsőhöz képest tehát arányos a hűtővíz relatív mennyiségével és a hűtés hatékonyságával:

$$\Delta T_a = 0,7 \left(\frac{z}{1-z} \right) \cdot \Delta T_f \quad (11.31.)$$

$$\text{A szalag lehülése } \sum \Delta T = \Delta T_f + \Delta T_a \quad (11.32.)$$

11.2.7. Alakítás erőszükséglete

Az alakító erő kiszámítása:

$$F = k_k \cdot A_{ny} = k_k \cdot l_d \cdot b \quad (11.33.)$$

k_k – fajlagos hengerlési erő,

A k_k értékének a meghatározására Sims, Ekelund, Siebel, Orowan és még mások dolgoztak ki képleteket. Számításra a Geleji módosított képletét, vagy a Miskolci Egyetem Képlékenyalakítástani Tanszéken kidolgozott összefüggést lehet javasolni, de a korszerű erőszámítási képletek már beépítették az összefüggésbe.

$$F = k_{fk} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot h_k \cdot b \cdot \left(1 - \frac{\sigma_k}{k_{fk}}\right) \cdot e^{\left(\mu \frac{l_d}{h_k}\right)^{-1}} \quad (11.34.)$$

$$\sigma_{hk} = (\sigma_{fék} + \sigma_{hú}) \cdot 0,5 \quad (11.35.)$$

Az alakítási szilárdságot modellkísérletekkel határozzák meg. A hideghengerelt lemezeknél szakítóvizsgálat, a meleghengerelt lemezeknél a Ford-próba a legelterjedtebb. A hengerrésben az alakítási szilárdság az alakváltozás függvényében nő. Gyors alakváltozásoknál, nagy alakváltozási sebességek esetén a hideghengerléshez hasonló felkeményedés jön létre. A dinamikus újrakristályosodási folyamat eredményeként a k_f görbe a hengerrésben nem monoton növekvő, ahogy Hajduk elmélet mutatja, hanem a dinamikus újrakristályosodás a hőmérséklet, az alakváltozás és a szűrasközidő függvényében nem minden esetben megy teljesen végbe. Ezért felkeményedik az anyag a következő szűrásig. A szűrásonkénti felkeményedések összeadódnak. Ez a termomechanikus hengerrés esete.

11.2.8. Újrakristályosodás meleghengerrés alatt

A kemencéből kilépő buga ausztenitjének a szokásos szemnagysága 400-600 μm . Az ausztenit szemcsék durvulási folyamatát kiváltó szemcsehatár mozgást a szövetszerkezetben lévő kisméretű kiválások lassítják, nagy mennyiségű előfordulásuk esetén akadályozzák. Ilyenek az Al-oxidok, a mikroötvozéssel létrehozott nitridek és karbonitridek.

Hengerréskor a hengerek közé befutott darab vastagsági mérete az alakítási zónában folyamatosan csökken, az alakítottsága növekszik. Az alakváltozással arányosan megnövekszik az alakított anyagrészen a diszlokációsűrűség és az alakítási szilárdság értéke. Meleghengerréskor megfelelő hőmérsékleten egy kritikus alakváltozás (φ_c) elérésekor végbemegy a újrakristályosodási folyamat a hengerrésben az alakítás időszaka alatt – dinamikus újrakristályosodás. A kritikus alakváltozás C-Mn acélokra:

$$\varphi_c = 1,87 \cdot 10^{-3} \cdot d_p^{0,284} \cdot Z^{0,129} \quad (11.36.)$$

ahol:

Z – Zener-Hollomon paraméter

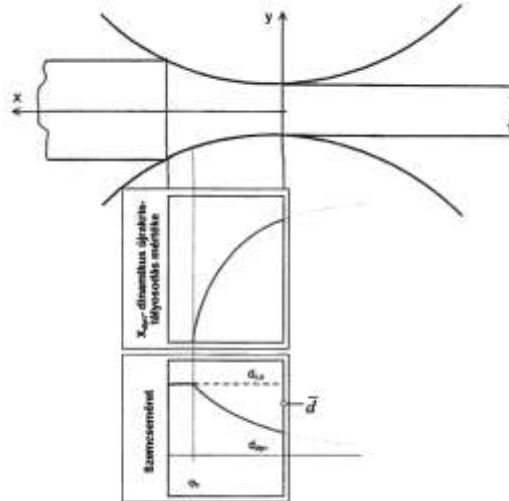
$$Z = \dot{\varphi} \cdot e^{\left(\frac{Q_a}{RT}\right)} \quad (11.37.)$$

ahol:

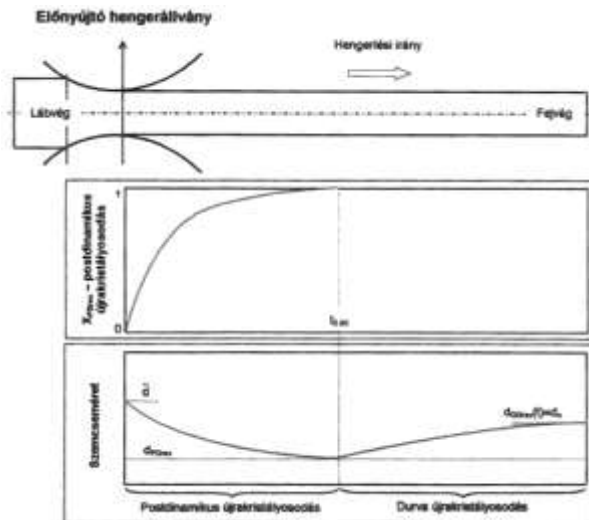
$\dot{\varphi}$ – közepes alakváltozási sebesség a hengerrésben.

Az alakítási zónából történő kifatásig rendelkezésre álló rövid idő alatt csak a szövetszerkezet egy részének az újrakristályosodására van lehetőség, ezért a hengerrésből kifutó szalag szövetszerkezete egyrészt az erősen alakított eredeti szemcsékből, másrészt az újrakristályosodott szemcsékből tevődik össze. Az egyidejűleg nagy és kis szemcsékből kialakult szövetszerkezet átlagos szemcseméretét az alakított és az újrakristályosodott szemcsék mérete és térfogathányada határozza meg, ahogy ezt a 11.14. ábra szemlélteti.

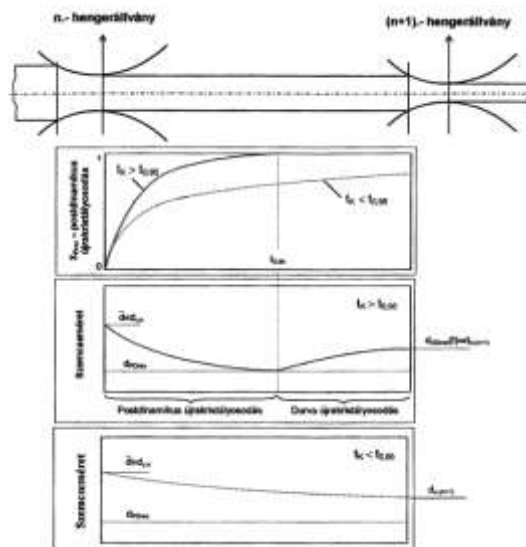
A hengerelt szalag alakított kristályszerkezetének két meleghengerlési szűrás közötti időszakban bekövetkezett változásait a hengerek közül való kifutás után közvetlenül a postdinamikus újrakristályosodás majd ennek végbemenetelét követően a durva újrakristályosodás folyamata határozza meg. A 11.15. ábra előnyújtósori, a 11.16. ábra készsori hengerlésnél a szalagban végbemenő változásokat szemlélteti. A postdinamikus újrakristályosodás időigénye gyakorlatilag a szövetszerkezet 95%-ának újrakristályosodásához szükséges idő nagyságával azonos. Ezalatt az idő alatt a hengerek közül kifutó szalagban a \bar{d} szemcseméretű szalag szemcsemérete d_{PDreX} értékre csökken.



11.14. ábra Dinamikus újrakristályosodás a hengerrésben



11.15. ábra Postdinamikus újrakristályosodás előnyújtáskor



11.16. ábra Postdinamikus és a durva újrakristályosodás hatása a szemcseméret kialakulására két kézsori hengerállvány között lévő szakaszon

Folytatólagos sori hengerlés esetén az utolsó szúrásokban nem megy végbe teljesen a postdinamikus újrakristályosodás. Ennek következtében a csak részben újrakristályosodott szemcsékben a megelőző alakítás során megvalósított alakváltozás hatására kialakuló diszlokációsűrűségnek egy része nem szűnik meg, visszamarad a kristályszerkezetben. Ennek hatása részben az alakítási szilárdság értékét részben az alakítást követő lehülés során az ausztenit ferritté történő átalakulását követően megjelenő szövetszerkezet szemnagyságát befolyásolja.

A melegen hengerelt szalag lehütése során végbemenő folyamatok

Az alakítás A_3 fölötti befejező hőmérsékletének a T_{nr} hőmérsékletéhez való viszonyától függően az ausztenit szemcsék alakilag jelentősen eltérőek. A T_{nr} hőmérsékletnél magasabb hengerlési véghőmérséklet esetén az ausztenit finom, újrakristályosodott szerkezetű, a T_{nr} hőmérséklet alatt viszont az újrakristályosodás elmaradása miatt az ausztenit alakított, hosszan elnyúló szemcseszerkezetet mutat. A T_{nr} hőmérséklet értéke Jonas és munkatársai szerint az alábbi összefüggéssel számítható:

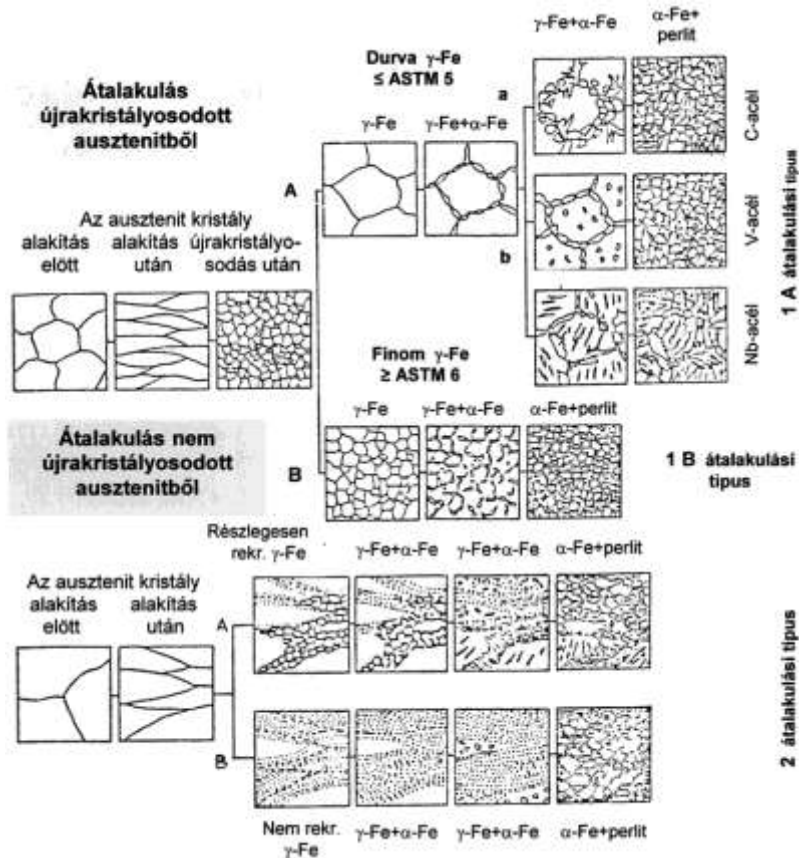
$$T_{nr} = 887 + 464[C] + (6445[Nb] - 644\sqrt{[Nb]}) + (732[V] - 230\sqrt{[V]}) + 890[Ti] + 363[Al] - 357[Si] \quad (11.38.)$$

A melegen hengerelt acélsanyagok ausztenitjének ferritté, illetve ferrit + perlitte alakulásakor a végtermék szövete a hengerlési véghőmérsékletének nagyságától függ a T_{nr} hőmérsékletéhez képest. Az ausztenit átalakulásának típusait mutatja a 11.17. ábra.

Ha a hengerlés az A_3 és az A_1 közötti tartományban fejeződik be, akkor az alakított ausztenit szemcsékből a 11.17. ábra szerinti 2. átalakulási típus szerinti ferrites szerkezet jön létre, az alakított ferritszemcsék pedig a rendelkezésre álló rövid idő alatt újrakristályosodás nélkül alakított, megnyúlt állapotban maradnak.

Az ausztenit bomlásának eredményeként kialakuló ferritszemcse méretét a következők határozzák meg:

- kémiai összetétel,
- akkumulált alakváltozás,
- hengerlési véghőmérséklet,
- hűlési sebesség.



11.17. ábra Az ausztenit átalakulás típusai.

A melegen hengerelt szalag reveszerkezetét és a kikészítés technológiáját a hideghengerléssel foglalkozó 12. fejezet tartalmazza.

12. Szélesszalagok hideghengerlése

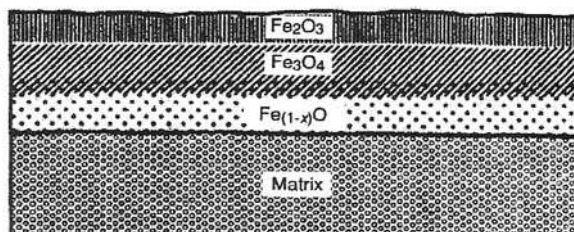
12.1. A szélesszalagok hideghengerlésének általános sémája

A szélesszalagok hideghengerlése a következő séma szerint történik:

- melegtékercs előkészítése hideghengerléshez
 - – pácolás,
- hideghengerlés
 - – egyállványos reverzáló soron,
 - - többállványos (tandem) soron,
- hőkezelés
 - – harangkemencében (sisakos kemence elnevezés is ismert)
 - – áthúzó hőkezelő kemencében,
- dresszírozás
- kikészítés

12.2. A melegen hengerelt szalag revétlenítése, pácolás

A melegen hengerelt szalagon a reve három rétegből áll. A legbelső, amely a melegszalaghoz kötődik a porózus szerkezetű wüstit (FeO). A legkülső reveréteg a hematit (Fe_2O_3) a legvastagabb, közöttük helyezkedik el a két réteg szilárd oldata a magnetit (Fe_3O_4). (12.1. ábra)



12.1. ábra A tercier reve szerkezete

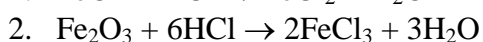
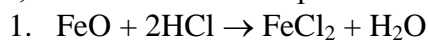
A reveréteg vastagságát, az egyes rétegek vastagságát alapvetően a hengerlési vég hőmérséklet és a csévélési hőmérséklet határozza meg. A szalagsori jó revétlenítés esetén csak a készsor után keletkező reve (tercier reve) található a felületen, amely általában jól pácolható, fő alkotórésze a hematit. A reveréteg pácolással történő eltávolítása annál könnyebb, minél kevesebb kisérelemt tartalmaz a reveréteg. Ha a korábbi technológiai fázisokban – előnyújtáskor, készsori revétlenítés előtt – keletkező reve sávok, foltok formájában megmarad, a hideglemezen minőséghibát okoz.

A hideghengerművek legelső technológiai fázisa a pácolás, a melegen hengerelt alapanyag előkészítése hideghengeléshez:

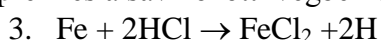
- revétlenített olajozott felület – az olajozás hideghengelési emulzió olajával,
- szélezés,
- a melegtekercsek összehegesztése, végtelenítés a pácolósori áthúzáshoz, előírt tömegű pácolt tekercs képzése,
- szelvényalak és a felület ellenőrzése.
- mechanikus revétlenítés, öntött acél granulátum vagy darabolt huzal a sörét, elsősorban alkatrészek, öntvények revétlenítésére használják, de lehet keskenyszalag pácolók revétlenítésének első lépcsője is a vegyi szakasz előtt.
- kémiai revétlenítés – pácolás – kénsavas, sósavas, kevertsavas, foszforsavas, alkalikus közegben, elektrolitikus.

Kémiai revétlenítéskor adott koncentrációjú savas oldattal távolítják el a reveréteget az acélszalag felületéről

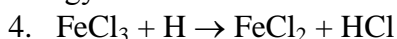
A sósavas pácolás az elmúlt két-három évtized alatt majdnem teljesen kiszorította a kénsavas pácolást, ezért csak a sósavas pácolás reakcióegyenleteit ismertetjük:



Az alapfém és a sav közötti végbemenő reakció:

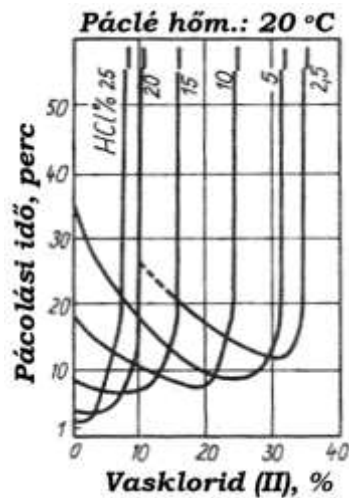


A három vegyértékű vas-kloridot a hidrogén két vegyértékűvé redukálja:



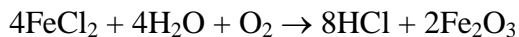
Az 1. és a 2. jelű reakciók nagy sebességgel mennek végbe és a teljes leoldással érnek véget. A 3. reakció, az alapfém oldódása kisebb sebességű, mint az 1. és 2. reakció sebessége, így a túlpácolás lehetősége csekély. Az FeCl_2 jól oldódik a fürdőben és gyorsítja az 1. és 2.

reakciót. A 12.2. ábra alapján a pácolási sebesség a savkoncentráció és a páclé FeCl₂ tartalom függvénye. Sósavas pácoláskor a 20%-os savkoncentrációt és 35-40 °C – os páclé hőmérsékletet alkalmaznak. A gyors 1. és 2. reakció felüről befelé oldja a revét, ezért a pácolás előtti revetörésnek itt nincs jelentősége, revelerobbantás is elmarad.



12.2. ábra A pácolási sebesség függése a páclé állandó hőmérsékletén a savkoncentrációtól és a vasklorid tartalomtól

Az elhasznált sósavas páclé regenerálásának elterjedt módszere a *termikus bontás*. A termikus bontás lényege, hogy a vaskloriddal telített fáradt savat egy magas hőmérsékletű oxidáló közegbe juttatják, ahol az alábbi reakciók zajlanak le:



A bomlási folyamat a reaktorban játszódik le, amelyben a vasoxid-granulátum fluid-ágyként lebeg. Ez az állapot nagymennyiségű levegő reaktorfenéken keresztüli bejuttatásával érhető el, a hőmérsékletet szintén a reaktorfenéken szabályos elrendezésű földgázégők biztosítják. A vasklorid bejuttatása ebbe a magas hőmérsékletű lebegő vasoxid közegbe speciális injektáló lándzsákkal történik az oldalfalon keresztül. A folyamat során keletkező 0,2-1,0 mm nagyságú vasszemcsét folyamatosan elvezetik, a nagy hőmérsékletű klórgőzöt többlépcsős folyamatban először ventúri mosóban lehűtik 100 °C-ra, majd adiabatikus elnyelő oszlopban vízzel folyékony sósavvá alakítják és visszakerül a pácolási folyamatba. A sósav regenerálása során a környezetet szennyeződés nem érinti.

Pácoló berendezések típusai:

- állópácoló,
- átfutópácoló,
 - vízszintes áthúzó pácoló,
 - toronypácoló,
 - tolópácoló.

Állópácoló

Nyitott páckádakból álló berendezés, a munkadarabokat merítéssel pácolják. Öntvények, csövek felületkezelésére használják, tüzi mártó horganyzásnál a horganyozandó darabok revétlenítő berendezése. Hideghengerművekben nem alkalmazzák.

Keskenyszalag hideghengerművekben kb. 40-50-éve még dobpácolást is alkalmaztak, ahol a tekercset nem fejtették le, forgatták a páclében.

Átfutópácolók

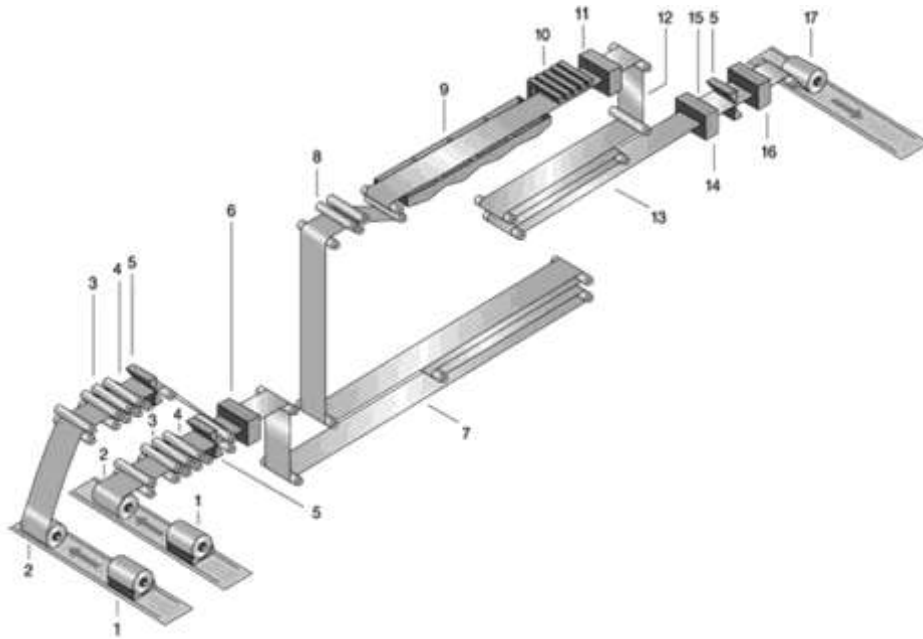
Tolópácoló berendezésnél a végtelenítő hegesztés elmarad, keskenyszalag hideghengerművekben telepítik.

Vízszintes áthúzópácoló

A pácolósorok három fő részre tagolódnak:

- *Előkészítő szakasz* berendezései a lecsévlő, a végvágó olló, tekercsvégeket összehegesztő tompahegesztő-gép, vagy a korszerű sorokon lézerhegesztő-gép, a hegesztési varratnak olyan minőségűnek kell lenni, hogy méretre hengerelhető legyen. A tekercsvégek tűzésére (nem hengerelhető) is van lehetőség, de nem szívesen alkalmazzák. Kénsavas pácolósorokon ezen a szakaszon található a revetőrő egyengető berendezés is. A folyamatos pácolás érdekében a pácoló és öblítő kádak előtt és után szalagtárolási kapacitást építenek be. A korszerű sorokon hurokkocsis szalagtárolást alkalmaznak, régebbi sorokon hurokgödörös szalagtárolást. A tárolandó szalaghossz az előkészítés (befűzés, végvágás, hegesztés) műveleteinek az időigényétől is a maximális pácolási sebességtől függ. A modern szalagpácolósorokba – a sósavas pácolókba is – húzvaegyengető revetőrőt építenek be a pácoló kádak előtt és „S” feszítőgörgők biztosítják a feszes szalagvezetést a kádak előtt és után, valamint biztosítják a pácolt készáru síkfekvését.
- *Pácoló és öblítőkádkak zónájában* 3-5 páckád található, melyek a régebbi sorokon saválló téglából készült gumizott acélkádkak, a korszerű berendezéseknél műanyag kádak. A páclé fűtése során keletkező gőzök üzemszarnok légterébe jutását a kádak szigetelt lefedésével akadályozzák meg. A páckádkakból a szalagot a hideg-, majd a melegvizes öblítőkádkakba vezetik. A szalag előrehaladása során a páckádkakban egyre jobb oldóképességű páclébe, a mosókádkakban egyre tisztább mosóvízbe kerül. A kádakat vállkövek választják el, a páclé áthordását gumigörgőkkel akadályozzák meg. A páckádkakból a szalagot hideg- és melegvizes mosókádkakba vezetik, majd a felületről leszárítják a maradé nedvességet.
- *Elvezető szakasz* – a kádakban a szalag feszes haladását a kádsor után elhelyezett „S” görgők biztosítják. Itt történik a szalag szélezése, olajozása emulziós olajjal, felcsévlése és csévlő váltáskor a végtelenített szalag elvágása. Az elvezető szakasz manipulációs idejére a pácolói részen a szalag haladását hurokgödör vagy hurokkocsis tárolás biztosítja. A korszerű pácolósorokon mélykádás kádtípus helyett a laposkádkakat, vagy turbófűvős típusú kádakat építenek, ahol a páclén lebeg a pácolandó szalag.

A 12.3. ábra korszerű sósavas pácolót mutat be. A kénsavas pácolósorokat a hideghengerművek korszerű sósavas berendezésekre cserélik le.



12.3. ábra Korszerű sósavas pácolósor

1. Tekerccsfeladó; 2. Lecsévélő; 3. Egyengető; 4. Vastagságmérő; 5. Végvágó olló;
 6. Lézer hegesztő; 7. Huroktároló; 8. Egyengető; 9. Pácoló kádak; 10; Tisztító egység;
 11; Szárító egység; 12; felületellenőrzés; 13. Huroktároló; 14. Szélező egység;
 15. Geometria ellenőrzés; 16. Elektrosztatikus olajozó; 17. Csévélő.

Toronypácoló

A huroktárolás, a pácolás és szalagöblítés függőlegesen elhelyezett tornyokban történik. A függőlegesen futó szalagra fűvókákon keresztül juttatják a szalagra a sósavat. A sor többi része azonos a vízszintes pácolósor berendezéseivel.

12.3. Hideghengerlés

12.3.1. Hideghengersorok munkamódszere

Hideghengerlésnél alkalmazott hengersorokat a 10. fejezet részletesen ismerteti.

Az *egyállványos egyirányú* az acélok hideghengerlésénél alkalmazott dresszírozó sor. Elektrolitikus ónozás esetén a megfelelő felületi keménység elérése miatt kétállványos dresszírozósorokat építenek.

Egyállványos reverzáló hideghengersorokat elterjedten alkalmazzák, mert rugalmasan programozhatóak. A csévélődobokba befűzésre kerülő vastagvég és a reverzáláskor keletkező átmeneti rész technológiai hulladék, melyet a tekercestömeg növelésével és a szabályozással igyekeznek csökkenteni. Korszerű hengersorokon a tekercestömeg 50 t - is eléri. A reverzáló hengerlési módszer legnagyobb műszaki hátránya, hogy minden szűrés ugyanazzal a munkahengerpárral történik. A tekercs a keletkező alakváltozási és súrlódási hő egy részét szűrésről szűrésre tárolja. A hengerlési folyamat során a tekercs egyre melegebb lesz és a munkahengerek hőbombírja is változhat. A szabályozástechnika fejlődésével a reverzáló hideghengersorok újra a reneszánszkat élik.

Reverzáló hengerlésnél a szalagfeszítés és húzás csökkenti a fajlagos felületi nyomást, a húzófeszültség-eloszlás mérés a hengerrés- és így a síkfekvés szabályozásának fontos

eszköze. Korszerű reverzáló hengersorok termelési kapacitása eléri a 450-500 et/év mennyiséget, ma már az 1700-as hengersorokon is hengerelnek 0,30 mm vastag szalagokat.

A pácolt tekercs bevezetése a lecsévlő dobról történik, egyengető és vezető görgők segítségével eljut a hengerrésig, a szalagot kis sebességgel (kb 0,5 m/s) hengerlik és továbbítják a csévlőig. A csévlőbe a tekercsvéget befogják és két menet felcsévlése után megkezdik a technológiai előírás szerinti hengerlést. A hengerlésnél a lecsévlő oldalon alkalmazzák a fékezőerőt, a hengerrés utáni felcsévlőnél alkalmazzák a húzóerőt. A reverzáló hengersorokon alkalmazható csévlő feszítőerők (húzó és fékező erők) az egyenlet szerinti nagyságban biztosítják a szalag haladását. A hengerész gyakorlat alapján az alkalmazható húzó és fékezőfeszültség a mindenkori alakítási szilárdság 40%-a lehet a szalagszakadás biztonságos elkerülése érdekében.

$$Z_{f\acute{e}k} < Z_{h\acute{u}z} + 2 \cdot F_h \cdot \mu \quad (12.1.)$$

$$\sigma_0 = \frac{Z_{f\acute{e}k}}{h_0 \cdot b} < 0,4 \cdot k_{f0} \quad (12.2.)$$

$$\sigma_1 = \frac{Z_{h\acute{u}z}}{h_1 \cdot b} < 0,4 \cdot k_{f0} \quad (12.3.)$$

ahol:

F_h – hengerlési erő,

μ - átlagos súrlódási tényező a hengerrésben.

Tandemsorokat 3-6 db folytatólagosan elhelyezett állvánnyal építik. Jellemzőjük a nagy végsebesség (30-35 m/s) és az ebből adódó kapacitástöbblet.

12.3.2. Hűtő- és kenőanyagok szerepe hideghengerléskor

Hideghengerléskor az alakítási munka és a súrlódási munka a szalagban hővé alakul. A keletkezett hő nagyobb része a szalagban marad, más része a hengerekbe áramlik és a hengerek hőbombirját eredményezi. A hengerelt szalag túlzott felmelegedése és a hőbombír változása a hengerelt szalag minőségének jelentős romlását idézi elő. Ezért a keletkezett hő nagy részét el kell vonni. Ugyanakkor az alakítási ellenállás (σ_3 – főfeszültség) csökkentése érdekében is a súrlódási tényezőt a lehető minimális érték közelébe kell csökkenteni.

A hűtőközeg követelményei:

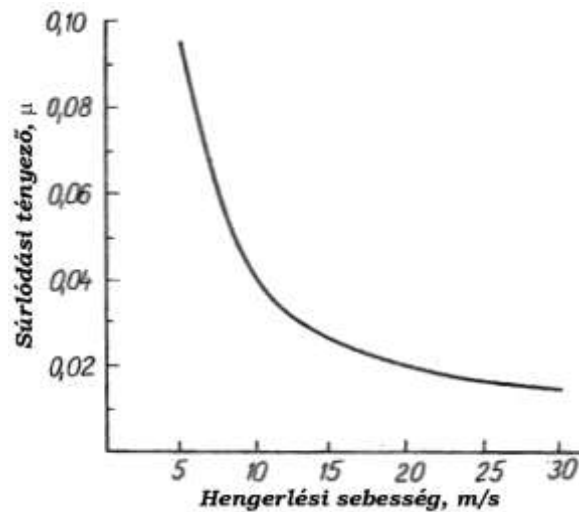
- jó hővezetőképessége legyen,
- magasabb hőmérsékleten is stabil szerkezetű legyen,

A hűtésre legjobban a víz felel meg.

A súrlódási tényezőt csökkentő kenőanyag követelményei:

- a viszkozitása nagy legyen és a hőmérséklet emelkedés hatására ne csökkenjen,
- magas legyen a lobbanáspontja,
- kis felületi feszültségű legyen, hogy a kenőanyag összefüggő réteget képezzen a szalag és a henger között, nyomásálló legyen,
- a hengerelt szalagnak átmeneti korrózióvédelmet biztosítson,
- hőkezeléskor maradéktalanul eltávolítható legyen,
- hosszú élettartam.

A hengerlési sebesség növelésével a súrlódási tényező csökken, amíg az olajréteg nem kezd megszakadozni.(12.4. ábra)



12.4. ábra Súrlódási tényező sebességfüggése

Az emulziós olajok viszkozitásának a beállítása fontos paraméter, ezért a hideghengerművek a gyártási programjuknak és a berendezéseiknek megfelelő paraméterekkel rendelkező emulziós olajokat használnak. Természetesen minden új olaj bevezetését kísérletek előzik meg.

Hideghengerlésnél használt emulziók az alábbiak:

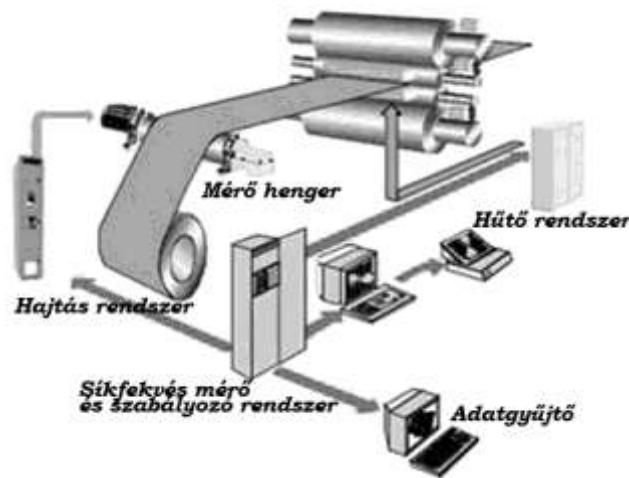
- stabil emulzió – az olajcsepp átmérője kicsi, 0,5 – 2,0 μ , a kenőképessége kicsi, mágnesesen tisztítható, ülepihető.
- félstabil emulzió – az olajcsepp átmérője közepes, 2,0-5,0 μ , kenőképessége közepes, még ülepihető, mágnesesen tisztítható.
- metastabil emulzió – az olajcsepp átmérője nagy, > 5 μ , nem ülepihető, mágnesesen tisztítható, folyamatos keveréssel kell diszpergálni, hogy ne váljon széjjel az emulzió olajcseppekre és vízre.
- adalékok az emulzióban:
 - o emulgátor, feladata az olaj felületi feszültségének a csökkentése,
 - o oldószerek a fémszappanok keletkezésének megakadályozására,
 - o korrózióvédelem, - nyomásállóság növelés, - koksosodás gátlás.

12.3.3. Az 1750-es reverzáló hengercsor főbb műszaki adatai és a szabályozási rendszere

Az 1750-es reverzáló hengerállvány jellemzői:

- kapacitás 450-500 kt/év,
- hengerelrendezés –kvartó,
- hengerpalásthossz – 1750 mm,
- maximális hengerlési erő – 24000 kN,
- maximális hengerlési sebesség 20 m/s,
- munkahenger átmérő 425-475 mm, támhenger átmérő 1150-1250 mm, gördülőcsapágyazás,

- vastagságmérő – röntgenes mindkét oldalon,
- vastagságszabályozás – elektrohidraulikus,
- síkfekvés mérés és szabályozás – munkahengerek mindkét irányú hajlítása, emulziószabályozás fűvókánként (12.5. ábra) a húzófeszültségeloszlás-mérés alapján mindkét oldalon, elve a mágneses légrésmérésen alapul,
- automatikus munkahenger és támhenger cserélő berendezés,
- emulziós rendszer – metastabil emulzió, lehetőség van pótlólagos növelt olajtartalmú emulzió felvitelre a sűrűlási tényező csökkentése érdekében,
- emulziólefűvás mindkét oldalon, ezért a szűrásszám nemcsak páratlan lehet,
- melegtekercs szélessége 750 - 1550 mm, vastagsága 1,0 – 6,0 mm,
- késztermék vastagsága 0,25 – 3,00 mm, 0,50 mm alatti méreteknél utolsó szűrásban alkalmazható a pótlólagos ásványolaj alapú emulzió hozzáadás.



12.5. ábra Hengerrés szabályozás emulzióhűtéssel a húzófeszültségeloszlás-mérés alapján

12.3.4. Reverzáló hengerson szűrásterve

A hideghengerson alkalmazott szűrásterveket a hengerson felépítése és a terhelhetősége határozza meg.

Az irányváltó hengerson minden szűrás ugyanazzal a munkahengerrel történik, ezért a szűrástervek felépítésénél az állandó hengerlési erő elvét alkalmazzák.

A munkahenger alakját – amely a hengerrést is befolyásolja – a köszörült bombír, az alakváltozás a hengerlési erő hatására, a munkahenger és a támhenger rugalmas vonalának a módosítása, a hőfejlődés a hengerrésben, a zónahűtés és a külső hajlítóerők határozzák meg.

Az állandó hengerlési erők meghatározásához jó közelítés a nyújtási tényezők egyenlőségének elve:

$$\lambda_i = \sqrt{\frac{h_0}{h_n}}, \quad \lambda_0 = \frac{h_0}{h_n}, \quad \lambda_0 = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_n \quad \text{és} \quad \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda_i \quad (12.4.)$$

ahol: n-szűrásszám, λ_i - átlagos nyújtási tényező.

A szűrásonkénti magasságsökkenés meghatározása:

$$h_1 = \frac{h_0}{\lambda_i}, \quad \Delta h_1 = h_0 - h_1 \quad (12.5.)$$

$$h_2 = \frac{h_1}{\lambda_i}, \quad \Delta h_2 = h_1 - h_2 \quad (12.6.)$$

$$h_n = \frac{h_{n-1}}{\lambda_i}, \quad \Delta h_n = h_{n-1} - h_n \quad (12.7.)$$

Állandó hengerlési erőre épített szűrásterv:

$$F_1 \cong F_2 \cong F_n < F_{meg} \quad (12.8.)$$

$$F = k_{k1} \cdot b \cdot l'_{d1} = k_{k2} \cdot b \cdot l'_{d2} = \dots = k_{kn} \cdot b \cdot l'_{dn} \quad (12.9.)$$

$$\frac{k_{k2}}{K_{k1}} = \frac{l'_{d1} \cdot b}{l'_{d2} \cdot b} = \kappa \text{ helyettesítéssel} \quad (12.10.)$$

$$l'_{d1} = \kappa \cdot l'_{d2} \quad (12.11.)$$

Az egyenletet egyszerűsítve:

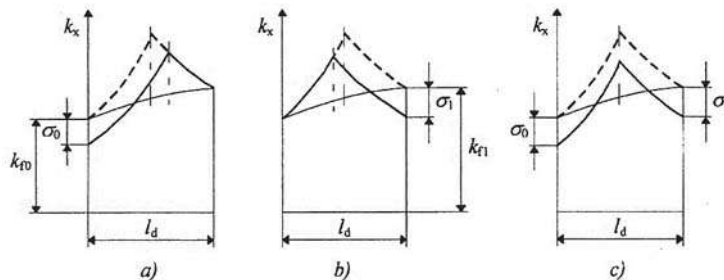
$$\kappa^2 \cdot h_1 - \kappa^2 \cdot h_2 = h_0 - h_1 \quad (12.12.)$$

$$h_2 = h_1 - \frac{\Delta h_1}{\kappa^2} \quad (12.13.)$$

12.3.5. Hengerlési erő meghatározása

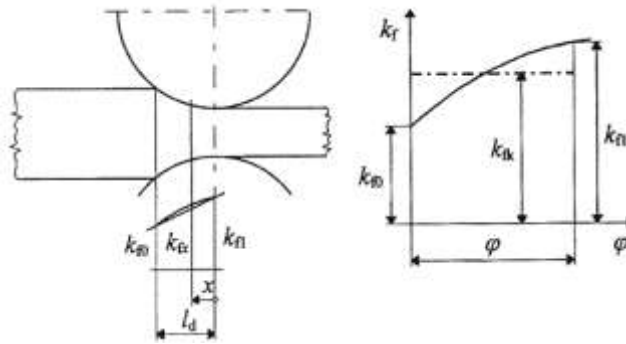
Feszültségi állapot a hengerrésben hideghengerről:

A hengerelt darabra ható külső húzó- (Z_h), illetve fékezőerő (Z_f) is módosítja az alakítási ellenállást leíró görbe lefutását, csökkenti az alakítási ellenállás átlagos értékét (k_k), ugyanakkor a Z_f fékezőerő a semleges szál helyét a kilépési, a Z_h húzóerő a belépési keresztmetszet irányában tolja el. A semleges szál a hengerrésből fizikailag nem léphet ki (12.6.ábra))



12.6. ábra A húzóerő (b) és a fékezőerő (a) hatása az alakítási ellenállásra, együttes hatásuk (c)

A 12.7. ábrában a szűrés előtti anyag alakítási szilárdsága k_{f0} , a hengerrésből kilépő anyag alakítási szilárdsága a felkeményedés után k_{f1} , a k_{fk} fogalma.



12.7. ábra Alakítási szilárdság

Alakítási szilárdság meghatározása szakítóvizsgálattal történhet a különböző mértékben hidegen alakított lemezeknél. Az $R_{p0,2} - \varepsilon$ függvény felhasználható a hengerlési erő meghatározásánál mint alakítási szilárdság. A görbék a Hall-Petch összefüggéssel is leírhatók, amelyben a keményedő képességet a szemcsenagysággal jellemzik:

$$k_{fb} = k_{f0} + \frac{K_x}{\sqrt{d}} \quad (12.14.)$$

ahol:

k_{f0} – egy kristallit folyáshatára [N/mm^2],
 K_x – Anyagminőségtől függő állandó,
 d – szemcsenagyság [mm].

A számításhoz az alapanyagok $k_f = f(\varepsilon)$ közelítő függvénye:

$$k_f = A + B \cdot \varepsilon^n, \quad \text{ahol } \varepsilon \text{ \%-ban (N/mm}^2\text{)} \quad (12.15.)$$

Hideghengerléskor az alakítási szilárdság közelítő egyenlete ugyanazon minőség különböző mértékben alakított részeinek szakítóvizsgálata alapján:

- DC 03 minőségű alacsony karbontartalmú lágyacél 2,4 mm-es kiinduló méretből alakítva:

$$k_f = 340 + 19,5 \varepsilon^{0,775} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (12.16.)$$

- DC 03 minőség 4,0 mm-es kiinduló méretből alakítva:

$$k_f = 330 + 13 \varepsilon^{0,77} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (12.17.)$$

A közel azonos minőségeknél az eltérő keményedőképességet a melegszalag vastagságkülönbségből adódó szemcsenagyság különbség okozza. A járatos acélminőségekre méretcsoportonként célszerű a keményedési görbéket meghatározni.

A belapult nyomott ívhossz számítása:

Hitchcock a rugalmasan belapult hengerpalástot egy olyan körívvel helyettesíti, amely másodrendűen érinti a belapult görbét. Ennek a helyettesítő hengernek a sugara a 12.8. ábra jelöléseivel:

$$R' = R \cdot \left[1 + \frac{16 \cdot (1 - \nu^2)}{\pi \cdot E} \cdot \frac{F}{b \cdot \Delta h} \right] \quad (12.18.)$$

ahol kovácsolt acél hengerekre:

ν – Poisson-szám,
 $E = 2,5 \cdot 10^5$ (N/mm^2) rugalmassági modulusz,
 F – hengerlési erő (N),
 Δh – magasságcsökkenés (mm),
 b – hengerelt darab szélessége (mm),

Az állandók behelyettesítése után:

$$R' = R \cdot \left[1 + c \cdot \frac{F}{b \cdot \Delta h} \right], \quad c \cong 1,85 \cdot 10^{-5} \quad (12.19.)$$

A belapult hengerprofil helyettesítő körív sugarának az ismeretében a tényleges (magnövekedett) nyomott ívhossz:

$$l'_d = \sqrt{R' \cdot \Delta h} \quad (12.20.)$$

A nyomott ív számításához a hengerlési erőt ismerni kell, viszont a hengerlési erő függvénye a nyomott ívhossznak is. Ezért két egyenletből álló kétismeretlenes egyenletet kell megoldani, amely csak iterálással lehetséges:

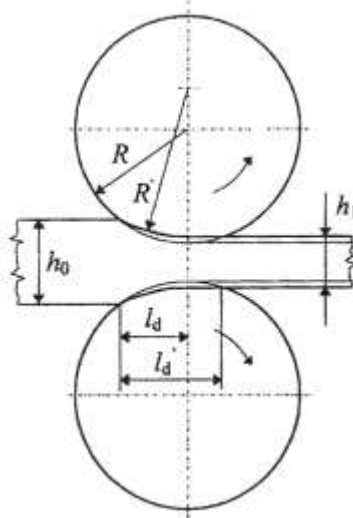
$$l'_d = f_1(F) \quad (12.21.)$$

$$F = f_2(l'_d) \quad (12.22.)$$

A tényleges nyomott ívhossz Hitchcock képletével:

$$l'_d = \sqrt{R \cdot \Delta h \cdot \left[1 + \frac{16 \cdot (1 - \nu^2)}{\pi \cdot E} \cdot \frac{F}{b \cdot \Delta h} \right]} \quad (12.23.)$$

A hengerbelapulás mérései bizonyították, hogy a hengerek belapulási profilja nem monoton görbe szerint alakul, amint azt a Hitchcock modellje ábrázolta. A valóságban a hengerrésben az alakváltozás két jól elkülöníthető szakaszon – egy képlékeny szakaszon (hatásos ívhossz) és egy rugalmas szakaszon (hatástalan ívhossz) megy végbe (12.8. ábra).



12.8. ábra Hatásos (képlékeny alakítás) és a hatástalan ívhossz (rugalmas alakváltozás)

Gulyás József képletével:

$$l'_d = \sqrt{c \cdot p \cdot R + R \cdot h_0 \cdot \varepsilon_{képl}} \quad (12.24.)$$

ahol: $p = \frac{F}{b}$ a szalag egységnyi szélességére vonatkoztatott fajlagos erő (N/mm²) és

$$\varepsilon_{képl} = \frac{\Delta h}{h_0}.$$

A hengerlési erő és a nyomott ív meghatározása Amman, Stone képlete alapján:

$$F = k_{fk}^* \cdot b \cdot \frac{h_k}{\mu} \left(e^{\mu \cdot \frac{l_d}{h_k}} - 1 \right), \quad (12.25.)$$

$$k_{fk}^* = k_{fk} - \sigma_k \quad (12.26.)$$

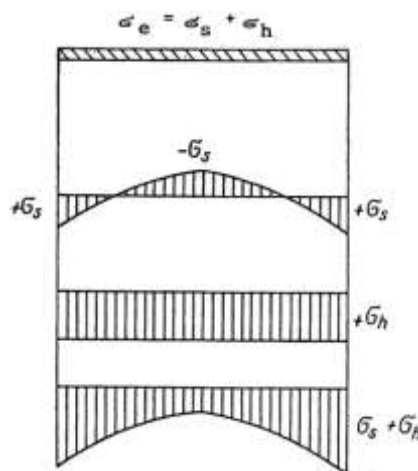
A belapult nyomott ív – szükséges az erőszámításhoz -meghatározása iterálással történhet. A részletes számítás a teljes anyagban.

12.3.6. A hullámképződés mechanizmusa hideghengerlésnél

A hullámmentes és belső feszültségtől mentes – síkfekvő - szalag, táblalemez a feldolgozóipar szempontjából fontos követelmény. A síkfekvő, azaz hullámmentes szalag hengerlésének feltétele, hogy a szalagszélesség mentén bármely pontban a szalag elemi szálainak a megnyúlásának ugyanakkorának kell lennie, ebben az esetben a szalag teljesen feszültségmentes és hullámmentes:

$$\frac{d\lambda_x}{dx} = 0 \quad (12.27.)$$

Ezt a feltételt a gyakorlatban maradéktalanul kielégíteni nem lehet, ami azonban nem jelenti azt, hogy síkfekvő szalagot nem lehet hengerelni. A szalag a geometriai méreteitől függően azonban képes elviselni egy bizonyos mértékű egyenlőtlen alakváltozást anélkül, hogy a szalagban hullámok képződjenek. Az egyenlőtlen alakváltozás hatására a szalagban nem ér el egy kritikus értéket a szalag síkfekvő lesz, de benne rugalmas feszültségek ébrednek. Az ilyen szalag hasításkor, lézervágáskor vetemedik, görbül. Hőkezeléssel ez a rugalmas feszültség megszüntethető. Így a késztermék rugalmas feszültségei a további technológiai fázisok, a dresszírozás és a lemezegyengetés függvényei. hosszirányú rugalmas húzónyomófeszültségek keletkeznek. A keletkezett feszültségek a szalagon belüli alakváltozások különbségével arányosak. Ha az egyenlőtlen alakváltozásból származó rugalmas feszültség a kritikus értéket túllépi, hullámosság keletkezik. Hideghengerlésnél a hengerrésbe belépő és kilépő keresztmetszetekben a húzóerőből származó húzófeszültség szuperponálódik a szalagban keletkezett saját feszültségre (σ_s). (12.9. ábra) A szalag keresztmetszetében a maximális feszültségű helyeken az eredő feszültség σ_e :



12.9. ábra Húzófeszültségek (σ_h -fékezőfeszültség σ_o , szalag húzófeszültség σ_h) és a saját feszültség szuperponálódása (σ_s)

A szalagban ébredő eredő feszültség sehol sem érheti el a szalag anyagának az alakítási szilárdságát, mert szalagszakadás lép fel.

$$\sigma_0 + \sigma_{s\max} < k_{f0} \quad (12.28.)$$

$$\sigma_1 + \sigma_{s\max} < k_{f0} \quad (12.29.)$$

A hengerrésbe befutó szalag és a szűrés utáni profiljának vastagsági méreteit 11.12. ábra tartalmazza.

Ha a szalag közepén nagyobb az alakváltozás mint a szélén – középhullámos szalag – a nyújtási tényezők különbsége:

$$\Delta\lambda = \lambda_k - \lambda_{sz} \quad (12.30.)$$

A szalag keresztmetszetében az átlagos nyújtási tényező:

$$\lambda^* = \frac{h_{1k} + h_{1sz}}{h_{2k} + h_{2sz}} \quad (12.31.)$$

Az egyenlőtlen alakváltozásból származó rugalmas feszültség a szalagban keletkező fajlagos alakváltozási tényezővel arányos:

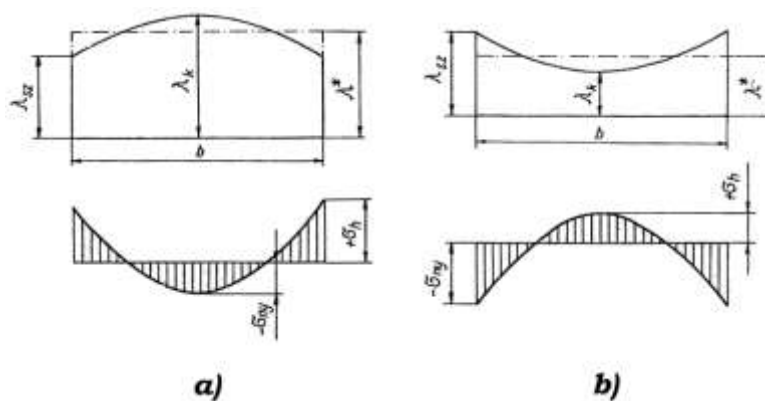
$$\sigma_x = -0,95 \cdot E \cdot K \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda^*} \quad (12.32.)$$

Ahol **K** a feszültség keletkezésének helyétől függő tényező:

- közepén $K = 0,4$
- széleken $K = 0,6$

Az alakváltozás irányának jellege ellentétes a maradó feszültségek irányával. Ha a szalag közepén nagyobb az alakváltozás (középhullámos szalag esetében), akkor a szalag közepén nyomófeszültségek, a szalag szélén húzófeszültségek ébrednek (12.10.a ábra). Ha a szalag szélén nagyobb az alakváltozás (szélhullámos szalag esetében), akkor a szalag közepén húzó, a szalag széleken nyomófeszültségek keletkeznek (12.10.b. ábra).

A hengerelt szalagon a hullámosság mindig ott alakul ki, ahol a maradó nyomófeszültségek egy - a lemez méreteire jellemző - kritikus értéket meghaladnak. A kritikus nyomófeszültséghez tehát hozzárendelhetünk egy kritikus alakváltozási tényezőt.



12.10. ábra Középhullámos szalag (a), szélhullámos szalag (b) saját feszültségei a nyújtási tényező függvényében

A levezetettek alapján megfogalmazhatók a síkfekvés gyakorlati feltételei:

- a hengerelt szalag mindaddig síkfekvő marad, amíg a szalag szélessége mentén a fajlagos alakváltozási eltérés egy kritikus értéket nem ér el:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda^*} = \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda^*} \right|_{kritikus} \quad (12.33.)$$

- A fajlagos alakváltozási eltérés a lemez vastagságának és szélességének a viszonyától függ.

Középhullám esetén:

$$\left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda^*} \right|_{kritikus} = 4,386 \cdot \left(\frac{h}{B} \right)^{0,8} \quad (12.34.)$$

Szélhullám esetén:

$$\left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda^*} \right|_{kritikus} = 0,1968 \cdot \left(\frac{h}{B} \right)^{0,8} \quad (12.35.)$$

Ahol: h- szalagvastagság, B- szalagszélesség

A hideghengerlés számára nagyon fontos a melegszalag szelvényének az ismerete.

A síkfekvő szalag hengerlésének feltételei, a hengerrés szűrásonkénti meghatározása:

A síkfekvő szalag hengerlésének alapvető feltétele a szalag szélessége menti egyenletes alakváltozás, az elemi szálak azonos hosszúságú megnyúlása a szélesség függvényében. Az egyenletes alakváltozás feltétele, hogy a munkahengerek alapdomborítása egyenlítse ki a hengerek rugalmas alakváltozását és a hőmérséklet hatására bekövetkező hódomborulatot a szalag lencsésességének és az alkalmazott fogyások függvényében, azaz a szalag lencsésességét csak a fogyás (ε) arányában szabad csökkenteni:

$$\delta h_1 = \frac{h_1}{h_0} \cdot \delta h_0 = (1 - \varepsilon) \cdot \delta h_0 \quad (12.36.)$$

Az egyenletnek megfelelően a hengerrés alakja:

$$\delta h_1 = 2 \cdot \left(y_{rug}^{\left(\frac{b}{2}\right)} - 2y_0^{\left(\frac{b}{2}\right)} - y_{hő}^{\left(\frac{b}{2}\right)} \right) \quad (12.37.)$$

$$\delta h_1 = 2 \cdot \delta y_{rés}^{\left(\frac{b}{2}\right)} \quad (12.38.)$$

Ahol:

h_0 - szalagvastagság szűrés előtt,

h_1 - szalagvastagság szűrés után,

δh_0 - alapanyag (melegszalag) lencsésége,

δh_1 - lencséség a szűrés után,

$2y_0$ - köszörült alapbombír,

y_{rug} - hengerrendszer rugalmas alakváltozása,

$y_{hő}$ - hőbombír.

A hengerrés meghatározásánál szükséges még a hengerelt szalag képlékenységi jelleggörbéjének az ismerete, amely az alakítási szilárdság, a fogyás és a húzóerők ismeretében meghatározható.

A hidegen hengerelt szalag síkfekvésének a feltétele az eddig leírtak szerint:

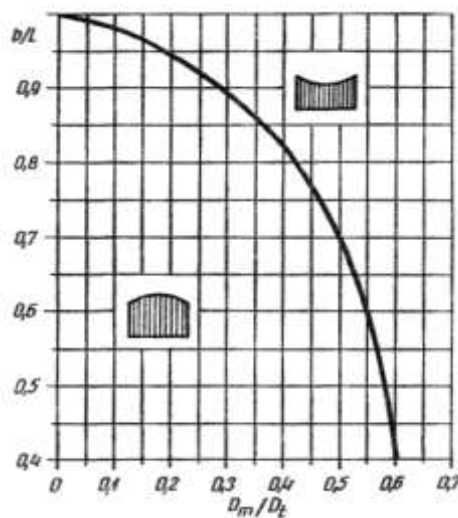
$$f(\varepsilon, \nu_h, y_0, y_{rug}, \delta h_0, \sigma_f, \sigma_h) = 0 \quad (12.39.)$$

A reverzáló kvartó hideghengersorokon a felső, vagy mindkét munkahengerbe bombírt köszörülnek, hogy a hengerek rugalmas alakváltozását kiegyenesítsék. A köszörült bombírnak és a rugalmas résváltozást leíró függvénynek kompenzálnia kell egymást, hogy a hengerrés az

egyenletes alakváltozást biztosítsa. A hengerrendszer rugalmas alakváltozását a Lapos termékek meleghengerlése c. fejezet tárgyalja. A melegszalagok hosszmenti hossz – és keresztirányú méreteltérései, a hideg hengerállvány vastagságszabályozással járó hengerlési erőváltozása szükségessé teszi a munkahengerek, a hengerrések külső erővel történő módosítását hengerhajlítással, hengereltolással (CVC, HC) a hengerlési munkapont körül. A munkapont a síkfekvés feltételeit biztosító hengerrés kialakítására való törekvés. Ha a szalag és a hengerpalást hányadosa $\left(\frac{b}{B}\right)$ közelít az 1-értékhez, annál kisebb a hengerlési erő

hatására a rugalmas alakváltozás. Elvileg $\left(\frac{b}{B}\right)=1$ esetén nem kell a munkahengereket domborítani.

A nyomáseloszlás geometriai feltételeit a hengerrésben a 12.11. ábra mutatja be Poluhin kutatása alapján.



12.11. ábra A nyomáseloszlás geometriai feltételei Poluhin nyomán

Az ábra jelöléseivel:

b/L – szalagszélesség/hengerpalásthossz,

D_m/D_t – munkahenger átmérő/támhenger átmérő,

Ezen az elven épül fel a rövidített palástú hengerekkel dolgozó hengerállvány, a HC és CVC hengerállvány, amelyeknél a közbenső henger, vagy a munkahengerek mozgatásával a b/B - az ábra jelölésével (b/L) - hányadost állítják be. A munkahengert mint rugalmasan ágyazott tartót vizsgálják, ahol a hengerelt szalag oldaláról $p = \frac{F}{b}$, a támhenger oldaláról $\frac{F}{B_r}$

megoszló terhelés támad.

A megoszló terheléseket egyenletesnek feltételezve Castigliano tétel segítségével levezethető a munkahenger behajlása a szalagszéle:

$$\delta y_m^{\left(\frac{b}{2}\right)} = F \cdot (1 - \beta) \left[\frac{b^3}{18,8 \cdot E \cdot D_m^4 \cdot \beta} \cdot (1 - 5\beta) + \frac{b}{2 \cdot \pi \cdot G \cdot D_m^2 \cdot \beta} \right] \quad (12.40.)$$

ahol:

$$\beta = \frac{b}{B_r}$$

D_m – munkahenger átmérő,

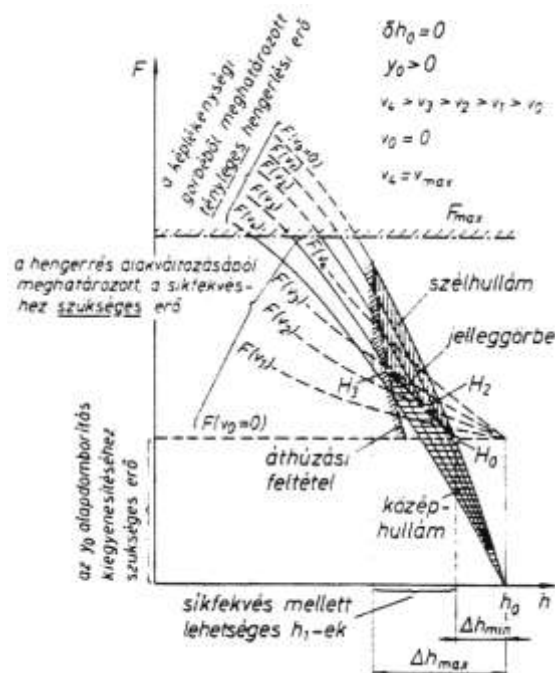
Br – rövidített hengerpalást, illetve a közbenső henger elmozdításával a terhelés módosított hossza.

Hengerlési munkapont meghatározása:

A hengerlési sebesség megválasztása a hengerlés összes paraméterére hatással van és így a hengerelt termék minőségét, elsősorban a síkfekvést is befolyásolja. A sebesség növelésével nő a hengerekbe áramló hőmennyiség, mely végső soron erős középhulámot és szalagszakadást okozhat.

Egy szűrásban adott alapdomborítású hengerekkel adott lencsésességű szalagot csak egymással összetatozó sebességgel és magasságcsökkenéssel lehet hengerelni, ugyanis a magasságcsökkenés növelésével a hengerlési erő és a hengerek rugalmas behajlása növekszik, a hengerlési sebesség növelésével a hengerek hőtágulás- hőtöbbség- nő. A sík kifekvésű szalag geometriai feltételeinek megfelelő hengerrés kialakításához szükséges hengerlési erő adott $2y_0$ és δh_0 – melegszalag lencsésesség – esetén számítható. Adott szalagfeszítés esetén a hengerlési erő sebesség (v) és az alakváltozás nagyságának (ε) a függvénye, az általuk meghatározott hengerlési erő és a képlékenységi jelleggörbe közös pontja a munkapont.

A síkfekvésű szalag geometriai feltételeinek megfelelő hengerrés kialakításához szükséges hengerlési erő: A 12.12. ábra mutatja egy szűrásban a hengerlési munkapont meghatározását.



12.12. ábra Hengerlési munkapont meghatározása

Az ábra jelzéseivel:

- Alapdomborítás: plánpárhuzamos szelvényénél pozitív $2y_0$,
- I. Képlékenységi jelleggörbék a sebesség függvényében.
- II. A hengerrés alakváltozásából meghatározott, a síkfekvéshez szükséges erők.
- III. Az y_0 alapdomborítás kiegyenlítéséhez szükséges erő.

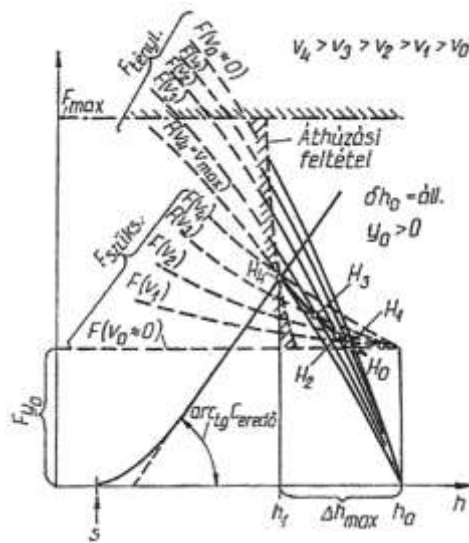
A következő szűrásokban azonban az így kiszámított hengerdomborítás már nem optimális érték, ezért a munkapontot szűrásonként újra kell számolni.

A diagram az alapdomborítás kiegyenlítéséhez szükséges erőt [$F(v_0=0)$] és a hőtöbbség következtében létrejövő hengerrés alakváltozásból a síkfekvéshez szükséges erőket tartalmazza különböző sebességnél [$F(v_1)$; $F(v_2)$; $F(v_3)$], valamint a különböző

sebességekhez tartozó képlékenységi jelleggörbéket. Igen kis sebesség mellett minimális a hőfejlődés, ezért a köszörült alapdomborítás kiegyenlítéséhez szükséges erő létrehozásához egy minimális alakváltozásra van szükség $[\Delta h_{min}]$ - az ábra 0 jelű munkapontja. Ettől kisebb alakváltozás esetén a hengerrési erő kisebb, mint ami a hengerrést plánparalellé tudná deformálni és a szalag középhullámos lesz. Ezt a középhullámot esetleg el lehet a húzóerőkkel tüntetni, de az egyenlőtlen alakváltozásból eredő rugalmas belső feszültségek megmaradnak. Síkfekvő szalagot csak a Δh sík tartományban lehet hengeregni.

Lencsés szalag esetén a hengerdomborítás kiegyenlítéséhez szükséges erőt megnöveli a lencséséget is figyelembe vevő henger alakváltozása, amennyiben azt nem külső erővel végezzük.

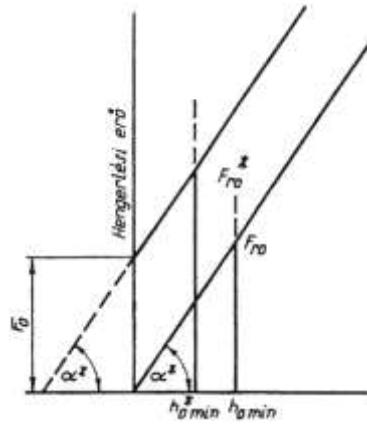
A 12.13. ábrában a maximális sebességhez tartozó munkapontot már a maximális erővel és a hengerrés zárásával lehet biztosítani, amely a maximálisan elérhető síkfekvő alakváltozást biztosítja



12.13. ábra Maximális sebességhez tartozó munkapont

12.3.7. A minimálisan hengerehető szalagvastagság elmélete

A minimálisan hengerehető szalag vastagságának a fogalmát a szakirodalom a hengerek belapulásának jellegéből vezette le. A vékony szalagok hengereésekor a henger geometriai torzulása miatt egy jól elkülöníthető képlékeny és egy rugalmas szakaszt különböztethetünk meg (12.7. ábra). Ha a képlékeny alakváltozás már nem jön létre, csak rugalmas alakváltozás van, határalakítás következett be és az adott hengerson az alakíthatóság végét jelenti. Az állványmerevség növelésével a h_{min} csökkenthető (12.14. ábra). Függ az össz alakváltozástól, adott szúrásban az alakváltozástól, szalagszélességtől, állványmerevségtől, munkahenger átmérőtől, alkalmazott húzóerőktől.



12.14. ábra A hengerállvány előfeszítésének hatása

A minimálisan hengerelhető szalagvastagság számításra M.D.Stone egyszerű összefüggését javasoljuk:

$$h_{\min} = h_{be} = k_{ki} = 3,58 \cdot \mu \cdot d \cdot \frac{k_{fk} - \sigma_k}{E} \quad (12.41.)$$

ahol d- munkahenger átmérő.

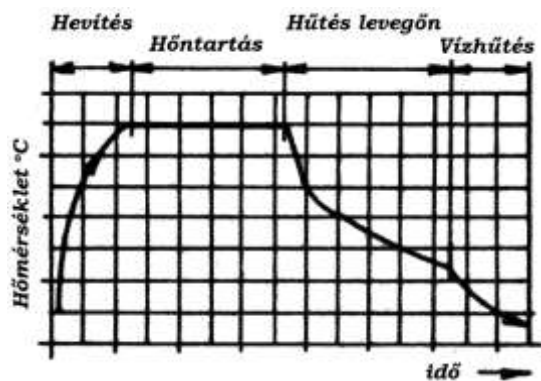
12.3.8. Hidegen hengerelt szalagok hőkezelése harangkemencében és áthúzó kemencében

A hidegen hengerelt acélszalagokat hengerlés után mindig hőkezelní kell. A hőkezelés alapvető feladata a hideghengerlés okozta felkeményedés megszüntetése és a felhasználási célnak megfelelő anyagszerkezet és mechanikai tulajdonságok biztosítása a dresszírozási folyamattal együttesen. A képlékenyen alakított fémbe a rácshibák miatt belső feszültség van, a fémek szabadenergiája nagyon instabil. Alacsony hőmérsékleten mégis tartós ez a deformált állapot, mert a termodinamikai hajtóerő a rácshibák mozgását akadályozó hatásokat nem tudja legyőzni. A hidegen hengerelt termékek minősége ma már rendkívül sokrétű a mélyhúzzható lágyacéloktól a többesfázisú acélokig. A késztermék minőségtől függ az alkalmazott hőkezelő berendezés és a hőkezelés technológiája.

A hideghengerművekben leggyakrabban alkalmazott hőkezelések:

- újrakristályosító lágyítás a hidegalakítás okozta felkeményedés megszüntetésére A_1 alatti hőmérsékleten,
- kritikus alakítás után az elektrotechnikai acélok szemcsedurvító – dekarbonizációs - hőkezelése A_1 fölötti,
- a többesfázisú és nagyszilárdságú acélok lépcsős hőkezelése, hűtése, öregítése áthúzó hőkezelő kemencében,
- melegen hengerelt magas karbon tartalmú (pl.:0,35 %) acélok lágyító hőkezelése dekarbonizáció mentesen. A hőkezelés célja a felhasználás követelménye, vagy a kikészíthetőség.

A hideghengerművekben kétféle hőkezelő berendezést telepítenek, a szakaszos üzemű harangkemencét és a folyamatos üzemű áthúzó kemencét. A harangkemencék felépítését a 10. fejezet mutatja be. Harangkemencei hőkezelési diagramot mutatja be a 12.15. ábra.



12.15. ábra Harangkemencei hőkezelési diagram

A hőkezelés első szakasza a felhevítés. A felhevítésnél távolítják el a tekercs felületéről a emulzió maradékokat. Az emulzió desztillációs görbéje alapján szoktak egy rövid hőntartási szakaszt is beiktatni a felhevítési szakaszba. A felhevítés szakaszában a kemencetérből a levegő és az emulziógőzök eltávoznak a kéményen. A hőntartási szakaszban már csak tisztán védőgáz van a sisak alatt. A hőntartás lágyacéloknál és ötvözetlen szerkezeti acéloknál A_1 alatti, a hőmérséklet a hidegalakítás mértékétől, a tekercs tömegétől és a minőségtől függ. Ahol vízűtést alkalmaznak, ott a kemenceállás először levegőn hűl a sisak hőfeszültségének csökkentése érdekében.

A betét bontása kb. $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on történik, hogy a felületi oxidációt elkerüljék. Hőkezeléssel a szakítódiagramon a melegen hengerelt szalagokra jellemző kifejezett folyáshatár visszatér.

Kifejlesztették a tisztán hidrogén védőgázzal és nagyteljesítményű keverőventilátorral üzemelő harangkemencéket, melyeknek a hőkezelési ideje kb. fele a hagyományos harangkemencékének, a tekercs felülete is szebb, fényes lágyításnak is hívják.

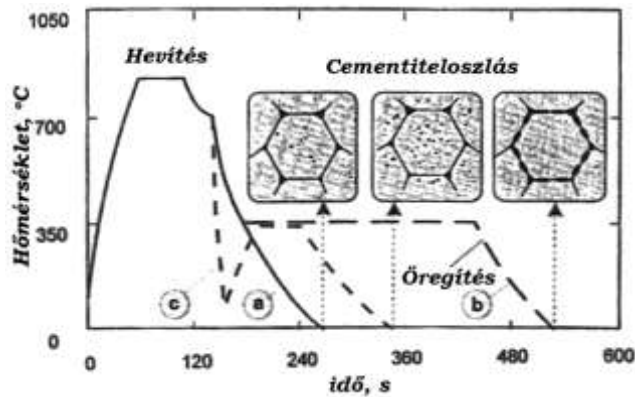
Harangkemencei hőkezelésnél a lágyacéloknál 2:1 arányú nyújtottságú u.n. palacsinta”szövet a kedvező, kb. 6-7 szemnagysággal. Ezért a meleghengereknél a csévézési hőmérsékletet úgy kell szabályozni, hogy kevés AIN kiválás legyen. Kedvező csévézési hőmérséklet lágyacélok esetében $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti. Az AIN kiválások képezik a újrakristályosodás kristálycsíráit. Ezért a kiválóan mélyhúzható acélok esetében a felhevítéskor több hőntartási szakaszt is alkalmaznak a kristálycsírákat képező AIN kiválások létrejötté érdekében.

Az áthúzó hőkezelő kemencéknek két típusa ismert:

- normál hőkezelésre képes - elsősorban tűzi bevonó sorokba épített - áthúzó hőkezelő berendezés,,
- CALP eljárás, mely alkalmas $2000\text{ }^{\circ}\text{K/s}$ hűtési sebesség elérésére és különféle öregítési folyamatok végrehajtására.

A tűzi bevonósorok – horgany, alumínium bevonat készítése – általában a Sendzimir eljárással működnek. A Sendzimir típusú hőkezelő és bevonósor alapanyaga hidegen hengerelt – felkeményedett- szalag. A felületről az emulzió maradványokat égetéssel távolítják el. A hőkezelés után a szalag hőtartalma melegíti a fémfürdőt.

A CALP eljárású hőkezelő sorok elektrolitikus felülettisztítást és jól variálható hőkezelő eljárást tartalmaznak (12.16. ábra)



12.16. ábra CALP hőkezelő sor hőkezelési technológia változatai és eredménye

A 12.16. ábra jelöléseivel:

- a) normál hűlés,
- b) izotermikus lassú hűtés 350-400 °C-on – szemcsedurvulást eredményez,
- c) rövid ideig tartó gyors túlhűtés és rövidített öregítés - a keménység növelését eredményezi.

A Sendzimir típusú hőkezelő berendezéseknél az újrakristályosodás utáni szemcsenagyság kisebb, mint a melegen hengerelt szalag szemcsenagysága. Ezért a melegen hengerelt alapanyagnál durvább szemcsenagyságra törekednek. Ezért a hőkezelő berendezés típusa határozza meg a lágyacélok csévélési hőmérsékletét

12.3.9. Hidegen hengerelt szélesszalagok dresszírozása

A dresszírozás feladata:

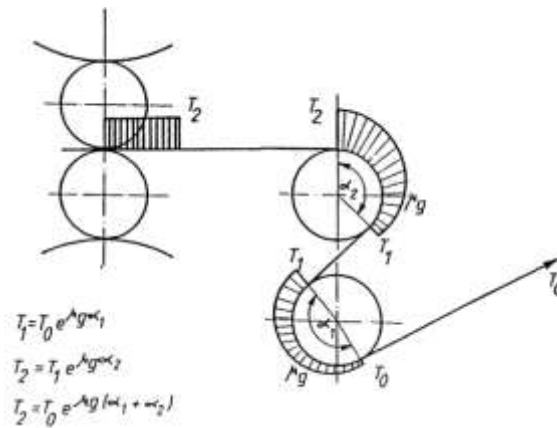
- a hőkezeléssel visszaállított kifejezett folyáshatár eltüntetése,
- a felhasználási célnak megfelelő felületi tulajdonságok (érdesség) biztosítása,
- síkfekvés biztosítása.

A dresszírozás anyagminőségtől függően 0,5-2,5 % nyújtással végrehajtott hideghengerlés. A dresszírozás hatásfokának jellemzője a nyúlás:

$$\varepsilon_{ny} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100(\%) \quad (12.42.)$$

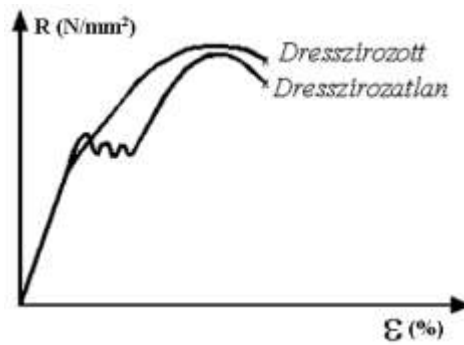
ahol: l_0 - a dresszírozás előtti egységnyi szalaghossz, l_1 - a megnyúlt szalaghossz.

A dresszírozó állványon a nyúlást nem közvetlenül a hosszméréssel határozzák meg, hanem vagy a hengerállvány be- és kilépő oldalán elhelyezett mérőgörgők fordulatszámának változásával, vagy pl.: lézersugaras sebességméréssel. A 12.17. ábra a húzóerőket meghatározó S-görgők húzóerőnövelő szerepét mutatja be.



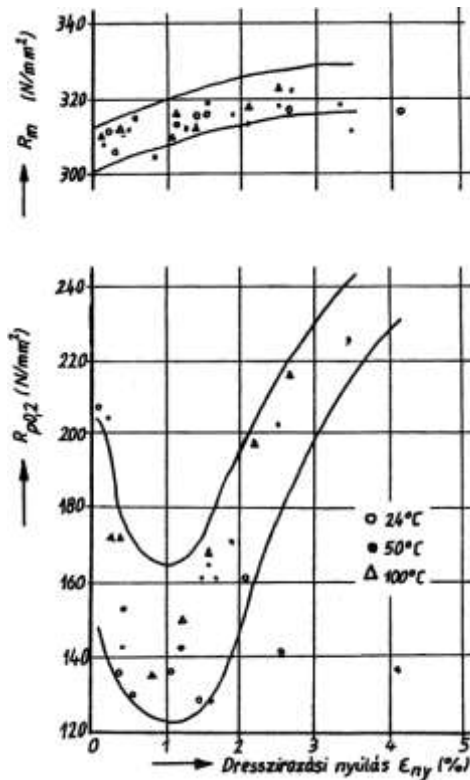
12.17. ábra Húzóerő kialakulása a dresszírozó soron.

A 12.18. ábra a dresszírozatlan és a dresszírozott szalag szakítódíagramjával a folyáshatár változását mutatja be.



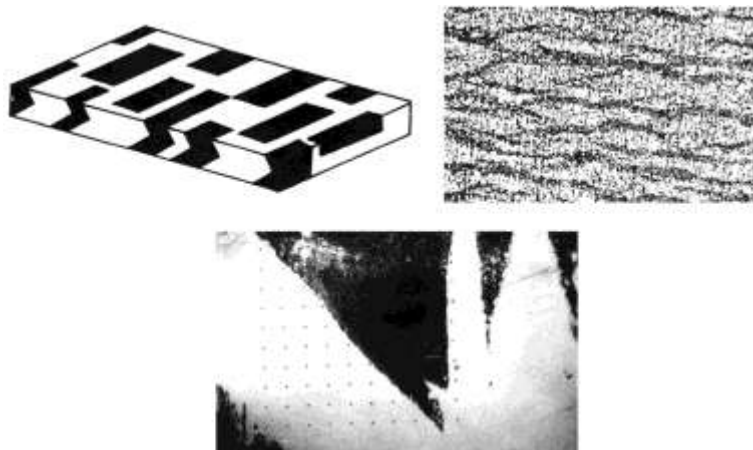
12.18. ábra Szakítódíagramok

A szalagvastagság és a minőség függvényében a dresszírozási nyúlásnak létezik egy olyan értéktartománya, amelynél a folyáshatárnak minimuma van. (12.19. ábra)



12.19. ábra A dresszírozói nyúlás optimuma

A dresszírozás legfontosabb célja a folyáshatár csökkentése, amely úgy érhető el, hogy adott térfogaton belül minél sűrűbben változzanak a képlékenyen és a rugalmasan deformálódott zónák. A képlékenyen és a rugalmasan alakított zónák kiterjedésének van egy alsó határértéke, amelyhez tartozik a legkisebb folyási feszültség. A 12.20. ábra szemlélteti a dresszírozott szalagon a képlékenyen (fekete) és a rugalmasan alakított zónák elhelyezkedését. Fry-féle marószerral kimutatható a képlékenyen alakított Lüders-sávok távolsága, egységnyi hosszra eső száma, mely a dresszírozás fontos jellemzője. A sávokat mikrokeménység mérésel is ki lehet mutatni.



12.20. ábra Képlékenyen és rugalmasan deformálódott tartományok, a Lüders-sávok kimutatása Fry-féle maratással, mikrokeménység mérésel

A dresszírozás folyási határt csökkentő hatása a diszlokációk sebességének a csúsztató feszültségtől való függésére vezethető vissza. A képlékeny alakváltozást létrehozó diszlokációk mozgási sebessége a csúszósíkban ható feszültség m -edik hatványa szerint változik:

$$v_{diszl} = \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^m \quad (12.43.)$$

$$n = \frac{1}{m}$$

$$m = 40$$

Az alakítási szilárdságnak az alakváltozás sebességétől való függését leíró egyenlet n keményedési kitevője és az m kitevő közötti kapcsolatot írják le az ismertetett összefüggések. Ha egyidejűleg több diszlokáció mozog, akkor egyedi sebességük arányosan kisebb lehet, mozgásban tartásukhoz pedig csökkenő feszültség szükséges. Ha L_N Lüders-front mozog, akkor a folyáshatár $\sqrt[m]{L_N}$ - nel arányosan csökken.

Az elvileg elérhető legkisebb folyási határérték:

$$\sigma_{F \min} = \frac{\sigma_{F0}}{\sqrt[m]{L_N}} \quad (12.44.)$$

Technológiai szempontból ez az állapot a határalakítás feltételeinek betartásával érhető el. A minimálisan hengerelhető szalagvastagság elméletével számolva meghatározhatók az egyes vastagságok dresszírozására érvényes optimális nyúlásértékek. Ha határalakításnál kedvezőbbek a feltételek a hengerrésben, akkor túldresszírozás, felkeményedés lép fel.

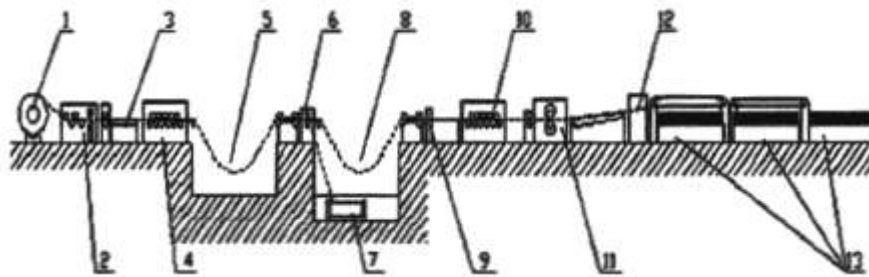
12.3.10. Kikészítés, egyengetés, húzvaegyengetés

A hidegen hengerelt szalagok kikészítése:

- darabolással – táblalemez – kötegképzés,
- szélezett szélestekercs – elsősorban felületbevonásra,
- hasított tekercs.

A kikészített termékeket korrózióvédő csomagolással látják el. A csomagolásnak a szállítás közbeni sérülésektől is védelmet kell nyújtani.

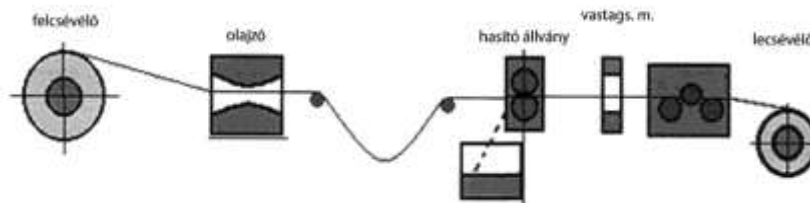
A **darabolósoron** (12.21. ábra) a dresszírozott hidegtekerccset szélezzik, táblalemezre darabolnak keresztvágással, a rakásolás felület és méret szerinti osztályozás is. A felület szerinti osztályozást vizuális vagy műszeres felületellenőrzés alapján végzik. Korszerű hideghengerművekben, ahol a szabályozottak a technológiai folyamatok a felületi végellenőrzés már csak eseti.



12.21. ábra Táblalemez daraboló sor

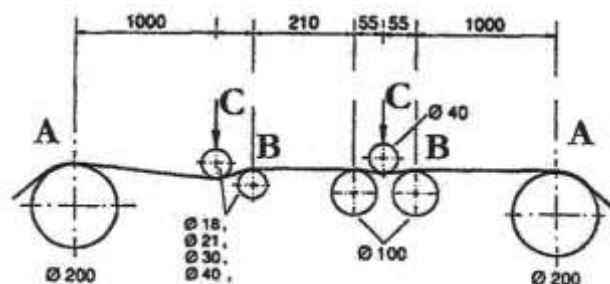
1.lecsévéző; 2.behúzó-előgyengető; 3.végvágó olló és vég hulladék gyűjtő; 4. és 10.egyengetőgép; 5. és 8.hurokgödör; 6.szélező olló 7.szélnyíradék felcsévéző; 9.vastagságmérő; 11.keresztvágó olló; 12.olajozó; 13.rakásolók

A 12.22.ábra hasítósort mutat be, ahol szélesszalagból állítanak elő hasított keskenyszalagot. A maximum 500 mm széles szalagok hideghengerlését végző keskenyszalag hideghengerművek is hasított szalagot dolgoznak fel.



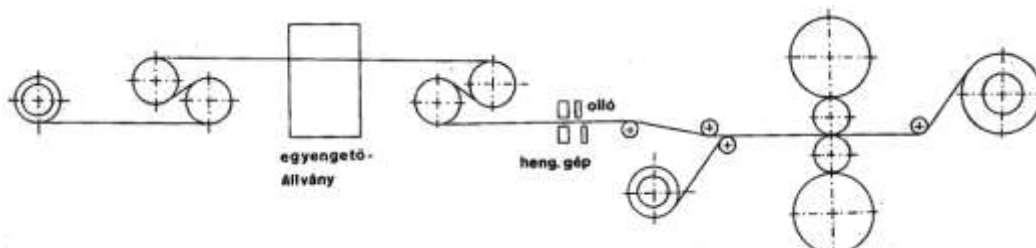
12.22. ábra Hasító sor

A 12.23. ábra húzva hajlítva egyengető sort görgős egyengető részét mutat be. A húzóerőt a dresszírozásnál részletesen tárgyalt S-görgők biztosítják. A sor feladata, hogy a lemezben maradó belső feszültségeket és az abból eredő deformációs hibákat minimálisra csökkentse, vagy megszüntesse.



12.23. ábra Húzva - hajlítva egyengető sor hajlító-egyengető része

Dresszírozó sorokhoz is építik a húzva - hajlítva egyengető berendezéseket.(12.24. ábra)



12.24. ábra Dresszírozó sor húzva hajlítva egyengető berendezéssel kombinálva

13. Fontosabb acélminőségek meleg- és hideghengerlésének technológiája

13.1. A feldolgozóipar követelményei

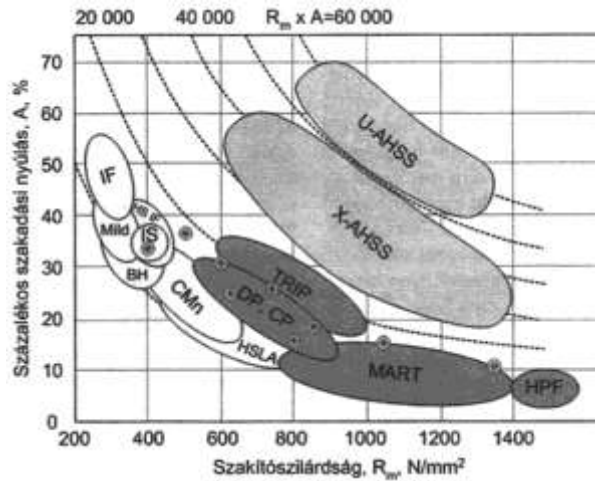
A melegen- és hidegen hengerelt lapos termékeknek meg kell felelni az élenjáró szabványok – európai (EN), német (DIN), angol (BS), francia (AFNOR), amerikai (ASTM), japán (JIS) – előírásainak, ugyanakkor a felhasználók egyedi, speciális igényeinek is. Az acéltermékek tulajdonságainak beállításában a gyártástechnológia minden egyes fázisa (acélgyártás, hengerlési módok) meghatározó. Az acélgyártás során az acél célzott mechanikai tulajdonságainak feltétele a vegyi összetétel egyenletessége és az acél megfelelő „tisztasága”, a szabályozott zárványalak, a szennyezők és a gáztartalom csökkentése.

A lapos termékek jellegzetes tulajdonságai a gyártástechnológiával összefüggésben:

- acélgyártással meghatározott jellemzők és tulajdonságok:
 - vegyi összetétel,
 - dezoxidálás mértéke, zárványok,
 - belső tisztaság, szennyezők(S,P), gáztartalom(H, N)
 - folyamatosan öntött bramma kristályos szerkezete (dúsulás, porozitás),
- hengerléssel meghatározott tulajdonságok:
 - alak, alakhúság, belső feszültség,
 - méret, méretpontosság,
 - felület, felületi minőség,
- a teljes vertikális technológia összhatásában meghatározott tulajdonságok:
 - szövetszerkezet,
 - mechanikai tulajdonságok,
 - technológiai tulajdonságok (alakíthatóság, hegeszthetőség, hőkezelhetőség, stb.)

Az európai acél felhasználók olyan acélminőségeket keresnek, melyek geometriájukban, összetételükben és szilárdsági tulajdonságaikban megfelelnek a XXI. század követelményeinek, egy magasabb életminőség biztosításának, a gazdaságos és energiatakarékos feldolgozásnak és alkalmazásnak. A feldolgozóipar által igényelt acélok széles skálája a következő (13.1. ábra):

- kiválóan mélyhúzóható lágyacélok mellett a melegen- és hidegen hengerelt nagyszilárdságú acélok is nagyfokú képlékenységgel rendelkezzenek,
 - lágy és nagyszilárdságú IF acélok,
 - hő hatására keményedő (sütve keményedő) BH acélok,
 - nagyszilárdságú HSLA acélok alkalmazása a járműiparban és a szerkezetépítésben,
 - a szilárdságnöveléssel együtt járó alakíthatósági tulajdonság romlás elkerülése, valamint járműiparban a tömegcsökkentések érdekében a többszfázisú (MP) és a TRIP acélok alkalmazása,
- bevonatos és korrózióálló acélok,
- acéltulajdonságok a feldolgozóipar igényei szerint:
 - szívósság,
 - melegítés nélküli hegeszthetőség,
 - a vegyi összetétel és a mechanikai értékek szűk szórása,
 - geometriai értékek szűk szórása,
 - síkfekvés, belső feszültség mentesség.

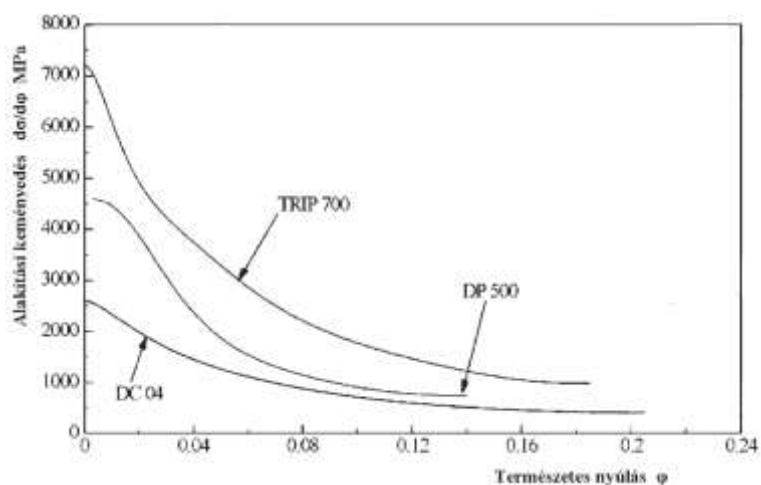


13.1. ábra Korszerű acélminőségek

Az ábra rövidítéseinek az értelmezése:

- Mild – hagyományos lágyacél,
- IF - interstíciósan oldott atomoktól (C, N) mentes,
- BH – Bake Hardening – sütvé keményedő acélminőség,
- IS – isotrop tulajdonságú acélok,
- CMn – hagyományos karbon-mangán acélok,
- DP – duális fázisú acélok (ferrit, martenzit, maradék ausztenit),
- CP – komplex fázisú martenzites acélok,
- HSLA – mikroötvözött nagyszilárdságú acélok,
- TRIP – Transformation – Induced – Plasticity, (ferrit, bénit, maradék ausztenit)
- MART – martenzites acél 1400 (MPa) szakítószilárdsággal,
- HPF – melegalakításra kifejlesztett MnB – ötvözésű acél.

A 13.2. ábra a hidegen hengerelt lágy és különféle többesfázisú acélok alakítási keményedését szemlélteti.



13.2. ábra Hidegen hengerelt acélok alakítási keményedése

A többes-fázisú acélok előnyös tulajdonság együttese akkor érvényesül, ha a szerkezet túlterhelés éri. Tipikus példa erre a gépkocsi vázszerkezete. Nagy alakíthatóságú,

keményedőképességű acélt alkalmazva, az esetleges ütközéskor fellépő alakváltozás képes felemészteni az ütközési energiát. A többes-fázisú jelző arra utal, hogy a többes fázisú acél szövetét – adekvát technológiai megoldásokat alkalmazva – előre meghatározott minőségű, mennyiségű és eloszlású fázisból, szövetelemből építjük fel. Ezek lehetnek: ferrit, alsó és felső bénit, martenzit, maradék ausztenit. Ahhoz, hogy a fenti célt elérhessük, a gyártástechnológia adott szakaszában meghatározott ferrit/ausztenit arányú szövetet kell létrehozni. Az ausztenit átalakításával adott mennyiségű bénitet, martenzitet hozunk létre a szövetben, de azt is elérhetjük, hogy az ausztenit egy része nem alakul át, hanem maradék ausztenitként marad vissza.

A nagyszilárdságú mikroötvözött HSLA acélok felhasználása is széleskörű. Az utóbbi időszakban a termomechanikusan hengerelt minőségek használata növekedett a normalizált minőségek rovására a kedvezőbb alakíthatósági, szívóssági és hegeszthetőségi tulajdonságai miatt, valamint a szilárdsági tartományuk terjedelme is nagyobb. A szilárdság növekedése lehetővé tette a beépített tömegek csökkentését, daruk, nagy fesztávú hidak építését.

13.2. Lágyacélok meleg- és hideghengerlése

A *melegen hengerelt* lágyacélokkal az EN 10111 jelű szabvány foglalkozik. A felhasználásuk sokrétű a mélyhúzástól az egyszerű alakításig. Miután a korszerű szélesszalag sorok már 0,8 mm vastag szalagot is hengerelnek, ezért pácolt, húzva egyengetett vagy dresszírozott kivitelben hidegen hengerelt szalagok helyett is alkalmazzák. Jellemzője az alacsony C, Mn és szennyező tartalom. R_{eL} folyáshatár 170 és 290 (MPa) közötti. Az EN 10111 szerinti melegen hengerelt mélyhúzóható lágyacélok hengerlésekor 880 ± 20 °C véghőmérséklettel és 660 ± 20 °C csévélési hőmérséklettel a kedvező szerkezet biztosítható.

A *hidegen hengerelt* kis karbontartalmú acélok hidegalakításra szélesszalagok szabványa az EN 10130, a maximum 600 mm széles szalagokra az EN 10139 szabvány vonatkozik.

A jól alakítható lágyacélok kis karbontartalmú, ferrites acélok. A DC03-DC06 minőségek az (r) – képlékeny alakváltozási viszonyzámmal és az (n) keményedési kitevővel is jellemeztek. A DC06 minőség Ti mikroötvözött vákuumozott minőség. Az acélban lévő nitrogént a Ti leköti és így a titánnitridek a méretük miatt már nem képesek a diszlokációk kitágult részébe diffundálni és nem okoznak öregedést.

A lágy, jól alakítható minőségeknél a nagy keményedőképességet (n-érték) és síkbeli anizotrópiát (r-érték) követelték meg. A folyáshatárt növelő és az alakíthatóságot csökkentő intersticiósan oldott elemek mennyiségét (C, N) vákuumozással, dekarbonizációs izzítással, erős nitrid- és karbidképző elemek (Ti, Nb, B) mikroötvözésével csökkentik.

A melegen hengerelt széles szalagok mérettűrését minden minőségre az EN 10051 szabvány írja elő. A hidegen hengerelt széles szalagok mérettűrését a EN 10131, a maximum 600 mm széles szalagok utánhengerelt minőségeit az EN 10139, a mérettűréseket az EN 10140 szabvány írja elő. Az utánhengerelt alapanyag apró alkatrészekre vonatkozik, melynek a felhasználója a bútortipar és az építőipar. Az utánhengerlés szakítószilárdsággal jellemzett felkeményítés.

A hidegen hengerelt lágyacél szállítási állapota: A – lágyított, LC – dresszírozott, C – utánhengerelt.

A hideghengerműi melegen hengerelt lágyacél alapanyag csévélési hőmérsékletét a hideghengerműi hőkezelés technológiája határozza meg. Lágyacélok harangkemencei hőkezelése esetén a csévélési hőmérséklet alacsony 550-600°C a hőkezeléskori kristálycsirát képező AlN kiválások csökkentése miatt. Így kapjuk a betét lépcsőzetes, lassú felhevítésekor a kristálycsirákat képező AlN kiválások szabályozásával a 2:1 arányú nyújtottságú un. palacsintaszövetet és az alacsony folyáshatárt.

Ha a hideghengerműben a hőkezelést szalag tűzi fémbevonó sorok előtt telepített áthúzó hőkezelő berendezésen végzi, akkor a csévélési hőmérséklet célszerűen 700-740 °C. Cél a melegszalag szemcséinek eldurvítása, mert az áthúzó hőkezelő berendezésben hőkezeléssel az alapanyagtól finomabb szemcséket kapunk. A korszerű CALP rendszerű hőkezelő sorokon ilyen megkötést nem kell alkalmazni.

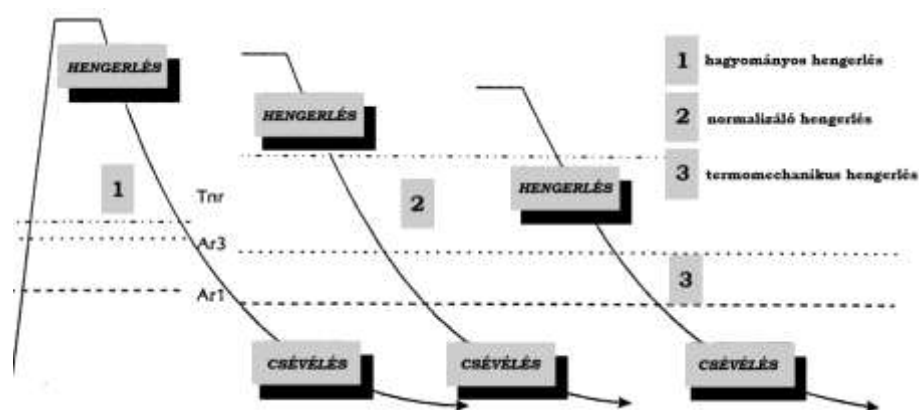
Az IF (interstitial free) acélok nagy $\alpha - \gamma$ átalakulási hőmérséklete a lágyítási hőmérséklet növelését is lehetővé tette, ami a további folyáshatár-csökkenést, illetve alakíthatóság növekedést eredményezett. Ezeket az acélokat szalag tűzi horganyzásra is alkalmazzák. Az IF acélokat nem csak lágyacélként alkalmazzák, hanem a kedvező alakíthatósági tulajdonságai miatt sok nagyszilárdságú acélminőség alapját képezi.

A vékony (0,8-1,5 mm) lágyacél szalagok meleghengergelésénél alkalmazzák a gyorsítós hengergelésnek a megfelelően magas állandó értékű vég hőmérsékletet biztosító változatát.

13.3. Szerkezeti acélok, mikroötvözött acélok meleg- és hideghengergelése

Ennek az acélcsoportnak a felhasználása a *melegen hengerelt* lapostermékek között a legelterjedtebb. Ide sorolhatjuk az ötvözetlen szerkezeti acélokat és a mikroötvözött HSLA acélokat. A csoport acéljainak a sokrétű felhasználását a hengergelési technológiával szabályozott acéltulajdonságok teszik lehetővé. A szabályozott körülmények között végzett hengergelésnek, mint technológiai folyamatnak az az alapja, hogy az alakadási folyamatot és a szövetszerkezet tudatos befolyásolását összehangolja.

Az acélcsoport különálló szabványait szerkezeti acélok címmel az EN 10025:2004 hat kötetes összeállítás foglalta össze, amelyből az EN 10025-2 ötvözetlen szerkezeti acélokat, a 10025-3 a *normalizálva hengerelt*, a 10025-4 a *termomechanikusan hengerelt* finomszemcsés acélokat tartalmazza. Ide sorolhatjuk a nyomástartó berendezések alapanyagával foglalkozó EN 10028 szabvány 3-as kötete (normalizált/normalizálva hengerelt acélok) és az 5-ös kötete (termomechanikusan hengerelt acélok), az EN 10149 szabvány a nagy folyáshatárú melegen hengerelt lapostermékek (normalizáló és termomechanikus hengergeléssel) hidegalakításra, valamint a termomechanikusan hengerelt csőalapanyagok az EN 10208 és az API Spec. 5L szabványban. A hengergelési technológiákat a 13.3. ábra szemlélteti.



13.3. ábra Hengergelési technológiák az újrakristályosodási határhőmérséklet (T_{nr}) függvényében

Hidegen hengerelt minőségeknél az EN 10268 szabvány tartalmazza a finomszemcsés acélokat.

Természetesen a felsorolás a szélesszalag hengerművek termékválasztékában a leggyakrabban előforduló szabványokat emelte ki a hengerlési technológiák bemutatása érdekében.

Az acélcsoport acéljait a minimális folyáshatár előírás és a szívóssági tulajdonságok jellemzik, amelyek az alkalmazott hengerlési technológiának is a függvényei.

A minőségcsoportnál a szilárdságnövelő mechanizmusok a mechanikai tulajdonságok felhasználási igény szerinti biztosításához:

- a karbon tartalom növelésével,
- szilárd oldatos felkeményítéssel(Mn, Ni, Cr, Si)
- szemcsefinomítással,
- kiválásos felkeményítéssel - mikroötvözéssel,
- diszlokációs felkeményítéssel,
- többes fázisú acélok alkalmazásával.

A '60-as évekig a *karbontartalom növelése* volt a szilárd oldatos ötvözés mellett az az eljárás, amelyet szilárdságnövelésre alkalmaztak. Ez a módszer az alakíthatóság és a hegeszthetőség jelentős romlását eredményezte, ezért a megfelelő szilárdsági és szívóssági értékek eléréséhez költséges hőkezelési eljárásokat alkalmaztak.

A *szilárd oldatos felkeményítés*, ötvözés hatékony, de drága módszer a szilárdság növelésére. Mivel eredményt csak több százaléknyi ötvözés hoz, ezért csak a Mn –ötvözés terjedt el. Hátránya, hogy az acél szívóssága, alakíthatósága és a hegeszthetősége is romlik az ötvözőanyagok mennyiségének a növekedésével.

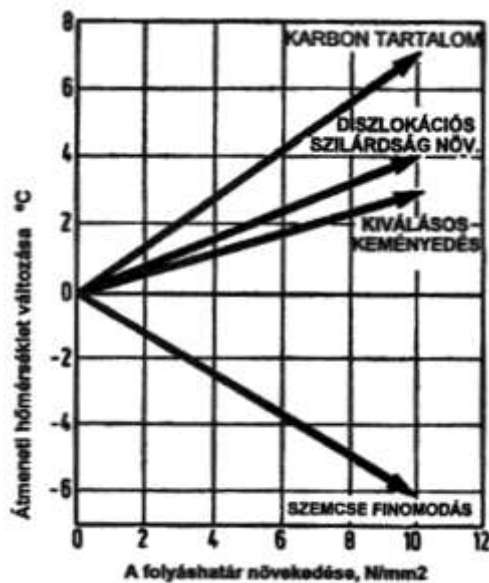
A *szemcsefinomítást* és a *kiválásos keményítést* az acél kismennyiségű karbid -, illetve nitridképzővel való mikroötvözéssel érjük el. Csak olyan ötvözőelemek jöhetnek szóba, amelyek karbidja, illetve nitridje az ausztenites hőmérséklettartomány alsó felében már nem oldódik, magasabb hőmérsékleten azonban csaknem teljes oldódás érhető el. Ezek a mikroötvözők a Nb, a V, a Ti, a Zr, az Al és a B.

A *diszlokáció-sűrűség* növelése igen erélyes szilárdságnövelő eszköz. A meleghengerlés utáni hűtéskor ilyen diszlokációsűrűséget kapunk, ha az acél bénitesen alakul át.

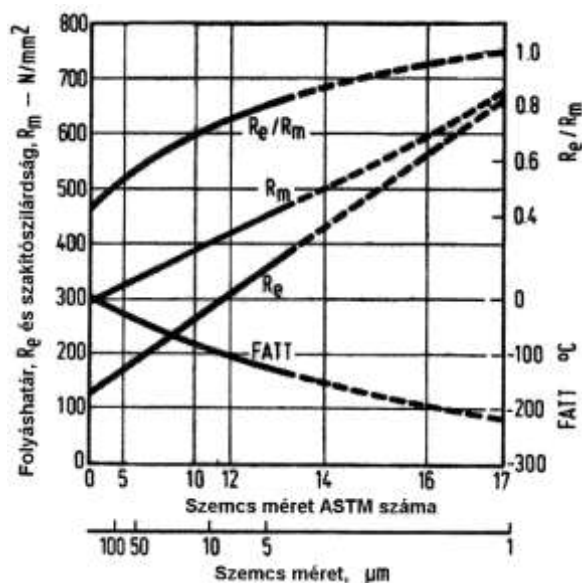
A *többesfázisú* acélokra jellemző, hogy több, egymástól jelentősen eltérő tulajdonságú fázis van jelen a szövetben, amely kompozitként viselkedik. Az ilyen acélok a korábbinál kedvezőbb, a felhasználói igényeket jobban kielégítő tulajdonság-együttese - a relatíve nagy alakíthatósággal párosuló nagy szilárdság – nem ötvözéssel, hanem a szövetet alkotó fázisok minőségének, mennyiségének és eloszlásának tudatos szabályozásával valósul meg, melynek fő célja az alakítási keményedőképesség fokozása.

A különféle szilárdságnövelő mechanizmusok hatását a folyáshatárra és az átmeneti hőmérsékletre mutatja 13.4. ábra. Az ábra is mutatja, hogy a szemcseméret csökkentése jelenti az egyetlen lehetőséget, amely az acél szilárdságát és szívósságát egyidejűleg növeli a Hall-Pech összefüggés szerint. A ma ismert képlékenyalakítási technológiák alkalmazásával a szemcsefinomítás legfeljebb 5 µm-os szemcseméretet biztosít, ezért a megfelelő fémtani állapot megteremtése és a szilárdság további növelése érdekében mikroötvözésre is szükség van. A melegen hengerelt ferrit-perlites acélok szilárdsága a szalagvastagságtól függően maximum 550 MPa értékig növelhető. Az ettől magasabb értékek precipitációs keményítési mechanizmus segítségével mikroötvözéssel érhetők el. Egy 0,10% C – tartalmú és 0,50% Mn – tartalmú acél szilárdsági jellemzőit tartalmazza a szemcsenagyság függvényében a 13.5. ábra.

A szemcsefinomítás hatékony eszköze az alábbiakban részletesen tárgyalt termomechanikus alakítás. Olyan helyeken ahol nem szükséges feldolgozaskor a melegalakítás, ma a konstruktőrök szívesebben alkalmaznak termomechanikusan hengerelt acélokat a jobb szívóssági és hegeszthetőségi tulajdonságai miatt (pl.: Pentele-Dunahíd S 460 M minőség) Ha a feldolgozaskor melegalakítás is szükséges, akkor a szilárdság növelésénél a diszlokáció sűrűség növelése és többesfázisú acélok alkalmazása nem jöhet szóba.



13.4. ábra Az egyes szilárdságnövelő mechanizmusok hatása az átmeneti hőmérsékletre



13.5. ábra Szilárdsági jellemzők a szemcsenagyság függvényében

Ma már végeznek kísérleteket ultrafinom és nanoszemcsés acélok előállítására is, célkitűzés a ferrit szemcseméret $1\mu\text{m}$ -os értékének az elérése. [13.4.]

A melegen hengerelt termékek felhasználása meghatározza a termék gyártástechnológiáját és a szállítási állapotát. Ezek szerint a szerkezeti acélokat a következőképpen osztályozhatjuk:

- normalizált vagy normalizáló hengerléssel gyártva (N),
- termomechanikus hengerléssel gyártva (M),
- termomechanikusan hengerelt és gyorsítva hűtött (MCP).

A korábbi szabványokban a termomechanikusan hengerlés rövidítése – (TM)

Az alakítás A_3 fölötti befejező hőmérsékletének a T_{nr} hőmérsékletéhez való viszonyától függően az ausztenit szemcsék alakilag jelentősen eltérőek. A T_{nr} hőmérsékletnél nagyobb befejező hőmérséklet esetén az ausztenit finom újrakristályosodott szerkezetű, a T_{nr} hőmérséklet alatt viszont az újrakristályosodás elmaradása (n_r – index jelentése: no recrystallization) miatt az ausztenit alakított, hosszan elnyújtott szemcseszerkezetet mutat. A

T_{nr} és A_{r3} hőmérséklet Jonas és munkatársai szerint az alábbi empirikus összefüggés alapján számítható °C-ban: [11.7.]

$$T_{nr} = 887 + 464[C] + (6445[N] - 644\sqrt{[Nb]}) + (732[V] - 230\sqrt{[V]}) + 890[Ti] + 363[Al] - 357[Si] \quad (13.1.)$$

$$A_{r3} = 910 - 310[C] - 80[Mn] - 20[Cu] - 15[Cr] - 80[Mo] + 0,35(h - 8) \quad (13.2.)$$

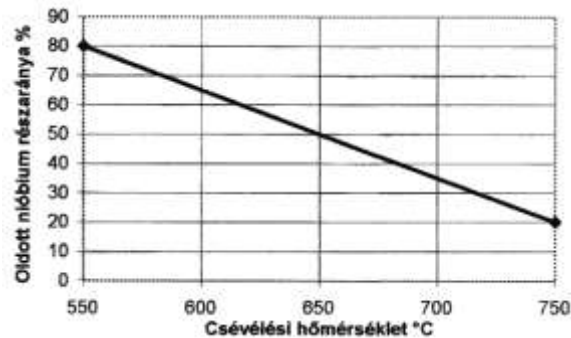
ahol:

h- vastagság.

Az utóbbi évek kutatásai alapján Ronaldo A. N. M. figyelembe veszi a Nb oldott (Nb_o) vagy precipitálódott (Nb_p) állapotát:

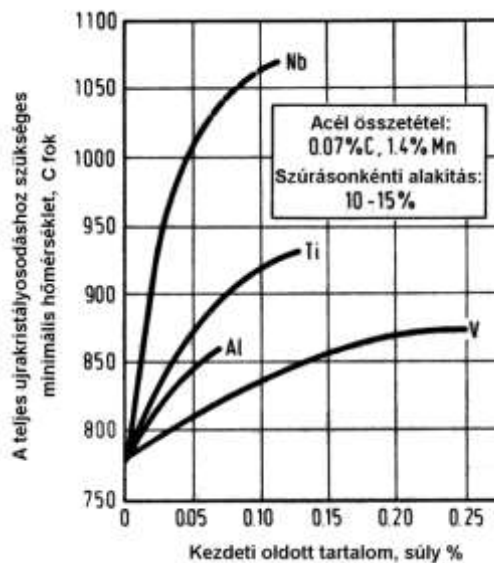
$$T_{nr} = 892 + 460[C] + (723[Nb_o] - [Nb_p]) + (723[V] - [V^{0.5}]) + 371[Al] - 348[Si] \quad (13.3.)$$

Az oldott Nb részarányának függését a csévélési hőmérséklettől mutatja a 13.6. ábra.



13.6. ábra Az oldott Nb részarányának a függése a csévélési hőmérséklettől

Az egyes mikroötvözőknek az ausztenit újrakristályosodását gátló hatását (a T_{nr} hőmérsékletet) mutatja be a 13.7. ábra.

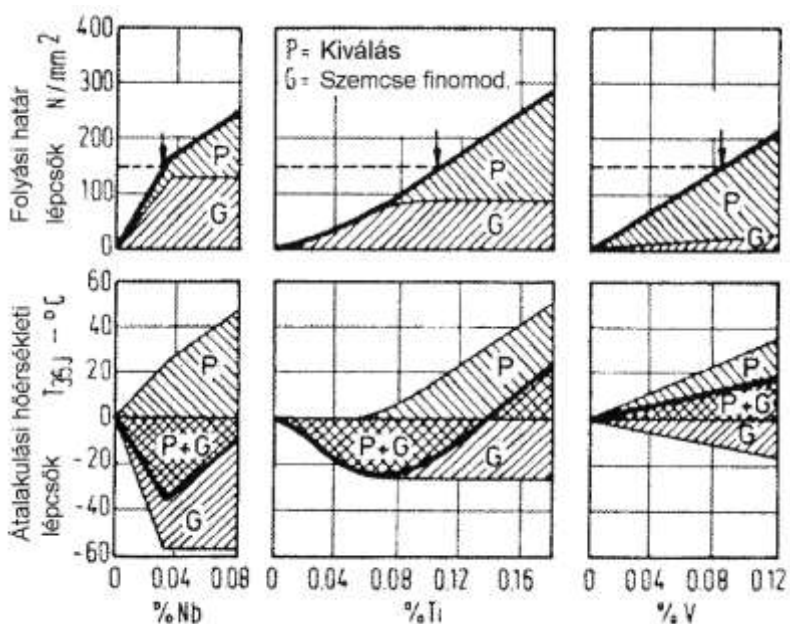


13.7. ábra Újrakristályosodási határhőmérsékletek mikroötvözött acélok esetén

Normalizáló hengerlés az ausztenit statikus újrakristályosodási határhőmérséklete (T_{nr}) felett fejeződik be, majd a szélesszalagot a csévélig lehűtik A_{r1} alatti hőmérsékletre. Így a kemencében történő normalizálással egyenértékű fémtani állapot jön létre, az anyag megalakításra a mechanikai tulajdonságok romlása nélkül alkalmas.

Termomechanikus hengerlés az ausztenit statikus újrakristályosodásának határhőmérséklete (T_{nr}) alatt fejeződik be. A végső szúrások olyan hőmérséklet-tartományban és alakítással történnek, ahol az ausztenit újrakristályosodása nem, vagy csak részleges mértékben megy végbe. Olyan fémtani állapot jön létre, amelyet utólagos hőkezeléssel nem lehet megvalósítani. Melegen nem alakítható, feszültségmentesítő hőkezelése maximum 570°C-ig alkalmazható.

A szilárdság növelésével az acélok alakíthatósági tulajdonságai romlanak. Ezért az alakíthatósági tulajdonságok javítása és a hegeszthetőség biztosítása érdekében a szilárdság növelését nem a karbontartalom növelésével, hanem éppen a perlitartalom csökkentése mellett a mikroötvözők precipitációs mechanizmusának hatása biztosítja. A 13. 8. ábra a Nb, V és a Ti mennyiségének a hatását mutatja a folyáshatárra a szemcsefinomítás (G) és a kiválásos keményítés (P) eredményeként. Az ábrán jól látszik, hogy a Nb a leghatékonyabb eszköz a három ötvöző között, a gyakorlati ismeretek alapján 380 MPa folyáshatárig elégséges a Nb mikroötvöző egyedüli alkalmazása. A szilárdság további növeléséhez V és Ti szükséges 550 MPa folyáshatár eléréséhez. A 600 – 700 MPa folyáshatár eléréséhez diszlokációs felkeményítéssel (pl.: Mn, Mo ötvözéssel és 500-550 °C-os gyors hűtéssel) bénites szerkezet szükséges.



13.8. ábra A mikroötvözők fajtáinak, mennyiségének hatása a folyáshatárra a szemcsefinomítás és a kiválásos keményítés eredményeként.

A szabályozott hőmérsékletvezetésű hengerlés kutatása és fejlődése tette lehetővé a csőacélok minőségének a változását. (13.1. táblázat)

13. 1. táblázat Élenjáró gyártók csőacéljainak fő paraméterei

Év	Acél min.	C %	Nb %	V/Ti %	Egyéb %	ReH MPa	DWTT °C	Ütő 20°C J
1960	X52N	0,18	-	-	-	360	-	-
1970	X60N	0,18	0,04	0,07/-	-	415	-	40
1975	X60TM	0,12	0,04	0,03/-	-	415	0	60
1980	X70TM	0,09	0,03	0,05/-	-	480	-20	80
1990	X70TMCP	0,08	0,035	-/-	-	480	-20	80
2000	X80TMCP	0,07	0,045	-/0,02	0,15Mo	550	-20	120
2000	X65TMCP	0,05	0,05	0,05/-	-	450	-30	150

N-normalizáló hengerlés,

TM-termomechanikus hengerlés,

TMCP-termomechanikus hengerlés gyorsítva hűtéssel,

DWTT –(Drop-Weight Tear Test) ejtősúlyos vizsgálat, amelyet elsősorban olaj és gázvezetékek lemezanyagainak a vizsgálatára használják. Eltörve a próbadarabot, a törési felület szívós részaránya eléri-e a szabványok által előírt minimálisan 85%-ot.

A hengerlés kezdő hőmérsékletének a meghatározása:

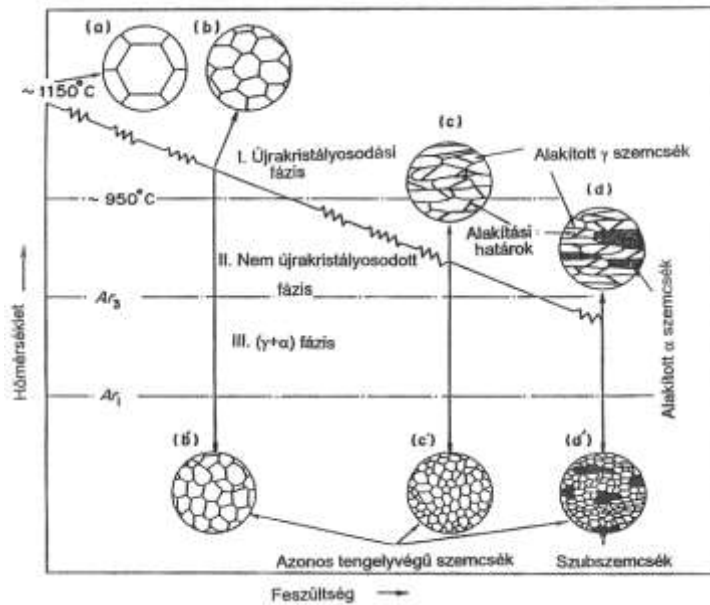
Az izzítási hőmérsékletnek elegendőnek kell lenni ahhoz, hogy az egymást követő fémtani reakciók végbemenjenek, azaz a mikroötvöző elemek szilárd oldatba mehessenek. Ezért az izzítási hőmérséklet minimális értékét a nióbbium- és a karbontartalom határozza meg.

Készori hengerlés:

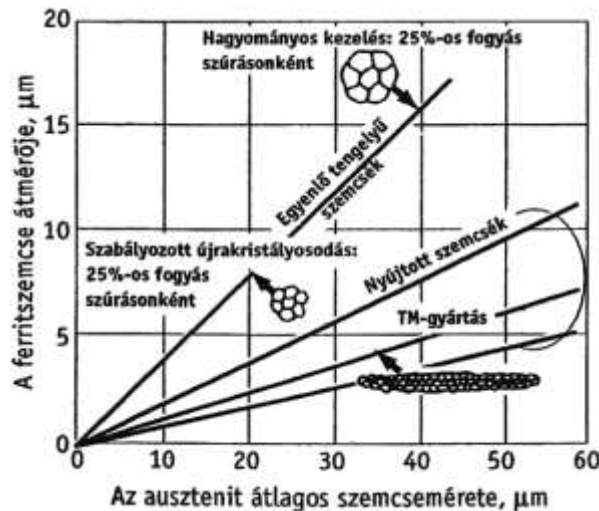
A késztermék szilárdsága attól függ, hogy az ausztenit alakítása után megtörténik-e az újrakristályosodás a következő szűrésig, vagy elmarad. Lényeges az újrakristályosodási hőmérséklet alatti alakváltozások nagysága és az egyes szűrésok hőmérséklete.

A termomechanikus eljárást a nem újrakristályosodott ausztenit tartományában, a T_{nr} hőmérséklet alatti alakítás jellemzi, de lényeges szerepe van az alakváltozás mértékének is. A szívóssági tulajdonság értékének a javítása érdekében a beadási hőmérséklet csökkentésével, az össz alakváltozás növelésével (az előlemez vastagság növelésével) a készsoron a termomechanikus alakítás mértékével az ütőmunka értéke is nő. A szabályozott hőmérsékletvezetésű hengerléskor a mikrostruktúra alakulását szemlélteti a 13.9. ábra.

A 13.10. ábra a ferrit szemcseméretének a kialakulását szemlélteti a hengerlési technológiák függvényében. [13.10.]



13.9. ábra A mikrostruktúra változása szabályozott hőmérsékletvezetésű hengerléskor



13.10. ábra A ferrit szemcseméretének a kialakulása a hengerlési technológia függvényében

Példák a nagyszilárdságú acélok gyártástechnológiájának kialakításához:
[12.5.][13.8.][13.11.]

Az EN 10149-2 szabvány a termomechanikusan hengerelt (TM) jól alakítható nagyszilárdságú acélokat tartalmazza S700MC minőséggel bezárólag.

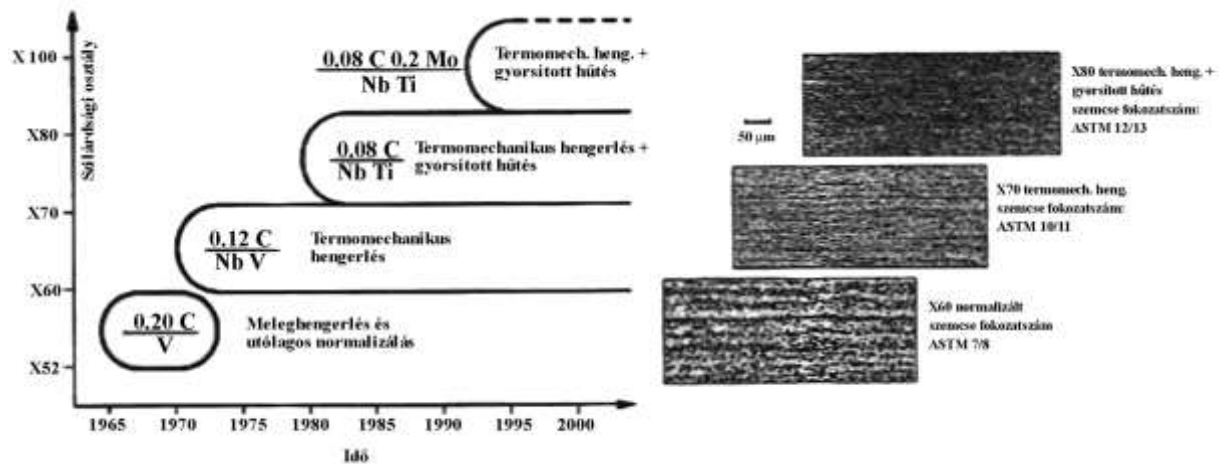
Az alacsony karbon tartalmú (C – 0,04%) nagyszilárdságú acélok ötvözési koncepciójának egyik változata:

- R_{eH} – min. 700 MPa, TM hengerlés, kiválasztott keményítés, diszlokációs szilárdságnövelés, Nb, Ti, Mo ötvözés,
- $500 \leq R_{eH} < 700$ MPa, TM hengerlés, kiválasztott keményítés, Nb, Ti ötvözés,

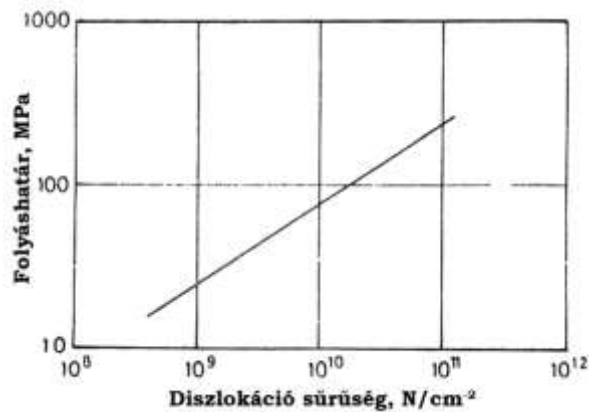
A 13.11. ábrán három különböző gyártástechnológiával készült HSLA acél szövetszerkezete látható. A legnagyobb szilárdság és az egyenletes, rendkívül finom mikrostruktúra a termomechanikus hengerlés végén gyorsított hűtéssel érhető el.

A gyorsított hűtésű hengerlés esetén a Mo ötvözéssel nyert bénites acél szilárdsága lényegesen nagyobb, mint a ferrit perlites acéloké, mert nem poligonális ferrit, hanem nagy diszlokáció sűrűségű bénit keletkezik. A Mo ötvözés a vastagabb, durvalemezek esetében

biztosítja a teljes keresztmetszetben az egyenletes bénites szövetet. A diszlokációsűrűség szilárdságnövelő hatását a 13.12. ábra mutatja be.[13.11.]



13.11. ábra HSLA acélok gyártástechnológiájának a fejlődése



13.12. ábra. Diszlokációsűrűség szilárdságnövelő hatása

A hidegen hengerelt lapos termékek nagy folyáshatárú, mikroötvözött acélokból hidegalakításra minőségeit az MSZ EN 10268 szabvány tartalmazza. A szabványban a minőséjél a minimális folyáshatár értékét tartalmazza Nb és Ti mikroötvözéssel, pl.:

- H 240 LA R_{eH} min. 240 MPa, - a minőségsor első tagja,
- H 400 LA R_{eH} min. 400 MPa, - a minőségsor utolsó tagja.

A hidegen hengerelt, nagy szilárdságú, gyengén ötvözött acélok mindazok az acélminőségek, amelyeknek a folyáshatára meghaladja a sima karbonacélok minimális folyáshatárát (>185 MPa). Ezeknek a minőségeknek a gyártásához szilárdságnövelő mechanizmusokat használnak.

A vákuumozott IF acélok külön csoportot képeznek.

A hidegen hengerelt nagy szilárdságú gyengén ötvözött acéloknál kiváló keményedést alkalmaznak. A kiváló keményedés létrehozására a Nb és a Ti mikroötvözés a megfelelő. Harangkemencés hőkezelés szemcsenövekedést eredményez és csökkenti a hideglemez folyáshatárát a melegszalaghoz viszonyítva. A korszerű áthúzó kemencés hőkezelés gyorsított hűtéssel a melegszalag alapanyag szilárdságánál nagyobb szilárdságú és finomabb szemcsézetű hideglemezt állít elő. Az áthúzó hőkezelő berendezésen a nagy hűtési sebességek a szilárdsági tartomány és a termékválaszték jelentős bővülését eredményezik.

A mikroötvözők hatásmechanizmusának rövid összefoglalása: [13.5.]

Nióbium

- a NbCN-ek az ausztenitben akadályozzák a szemcsék növekedését és csökkentik az Ar_3 átalakulási hőmérsékletet,
- a NbCN-ek akadályozzák a melegalakítás közbeni újrakristályosodást, ezzel hozzájárulnak a ferritszemcsék finomításához,
- az újrakristályosodás hőmérsékletének növelésével a Nb nagyon finom szemcsézetet, majd a ferritben kiválásos keményedést eredményez,
- ha a Nb az ausztenitben oldva van, erősen késlelteti a ferritté való átalakulást, ezáltal javítja az edzhetőséget,
- a hidegen hengerelt és újrakristályosított finomlemezben a Nb nem okoz szilárdságnövekedést, mert a kiválások eldurvulnak,
- a lágyacélban oldott C-nak és N-nek NbCN-alakban való lekötéséhez szükségesnél több Nb adagolása esetén „interszticiós elemektől” mentes (IF-acél) kristályszerkezetű acél gyártható, mely kitűnő képlékenységi tulajdonságokkal rendelkezik.

Titán

- a Ti olyan elem, amely erős hajlamot mutat az oxidok és szulfidok képződésére, valamint a nitridekére és karbidokéra is.
- nagy a nitrogénnel szembeni affinitása, TiN –eket képez, az öntött acél lehülésekor az ausztenitben nem oldódó nagy szögletes zárványok formájában van jelen, akkor szilárdságnövelés szempontjából kevésbé hatásos, a jelentős szilárdságnövelés nanométeres kiválásokkal érhető el, melyek az ausztenit – ferrit átalakulás közben jönnek létre.
- a Ti koncentrációjával arányosan növelhető az acél szilárdsága, a szilárdságnövelő hatásában a kiválási keményítés erősebb, mint a szemcsefinomítás.
- stabil TiN-diszperziók javítják a hegesztés hőhatásövezetének tulajdonságait nagy energiabevitel mellett is,
- már kis Ti-tartalom is öregedésállóvá teszi az acélt,
- a Ti a S-nel stabilis $Ti_4C_2S_2$ karbo-szulfidot hoz létre, ennélfogva akadályozza a mangánszulfidok kialakulását.
- a TiC képződés a γ/α átmenet után jön létre.

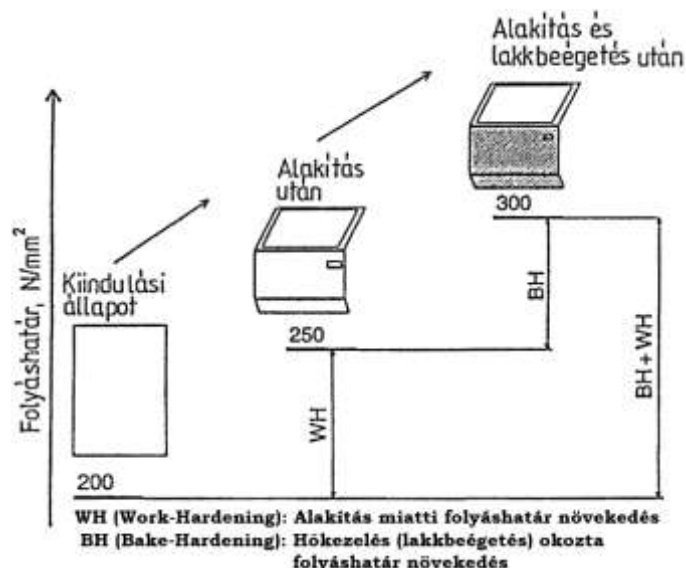
Vanádium

- a V enyhén akadályozza az újrakristályosodást, termomechanikus alakításnál a V jelenléte erősíti a Nb hatását,
- a V viszonylag nagy oldékonysága az ausztenitben abból a szempontból előnyös, hogy a ferritben való kiválással keményíti az acélt.

13.4. Korszerű nagyszilárdságú acélminőségek – lakkbeégetéssel keményedő BH acélok, többesfázisú acélok, TRIP és martenzites acélok

13.4.1. BH – Bake hardening – lakkbeégetéssel keményedő acélok

A BH effektus és a BH acélok kifejlesztése jelentős fejlődés volt a járműgyártásban. Az alkatrész mélyhúzását lágyacél lemezen végzik, lakkbeégetéskor 40-70 MPa – értékkel nő az alakítás utáni folyáshatára a darabnak (13.13. ábra).

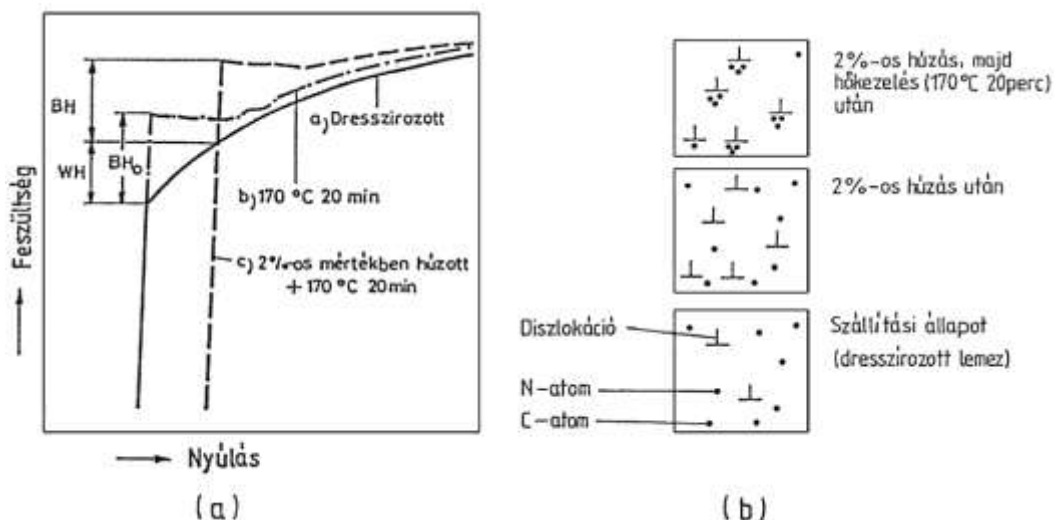


13.13. ábra BH acélok folyáshatár növekedése

A BH effektust meghatározza:

- a ferritben oldott C, N, P mennyisége - legalább 6 ppm-nyi oldott C szükséges a legalább 30 MPa – BH hatáshoz. Nb-al stabilizált IF acélok esetében az egyszer már kivált NbC egy részét újra oldatba kell vinni magas 870°C-os lágyítási hőmérsékleten, ezért az áthúzó kemencékben a hőkezelés kedvezőbb, de a P-os acélok esetében a harangkemencei hőkezelés is megfelelő eredményt ad,
- a lemezalakítás mértéke - ha a lemez megnyúlását 2 %-ról 10 %-ra növeljük, akkor a BH érték 50 MPa – ról 150 MPa-ra nő, az acél rugalmassági modulusa is nő,
- a ferrit szemcsemérete,
- a beégetés hőmérséklete.

A BH hatást szemlélteti a 13.14. ábra.



13.14. ábra A BH effektus

a) Feszültség-nyúlási diagramok, b) A jelenség magyarázata

A BH hatás szabványos vizsgálata – a próba 2%-os alakítása és hőkezelése 170°C-on 20 min.-ig, majd szakító vizsgálat. A folyáshatár növekedést az ugyanabból az anyagból kivett normál dresszírozott próba értéke közötti különbség adja.

Alkalmazásuk – motorháztető, csomagtartó tető, személygépkocsi ajtó, stb.

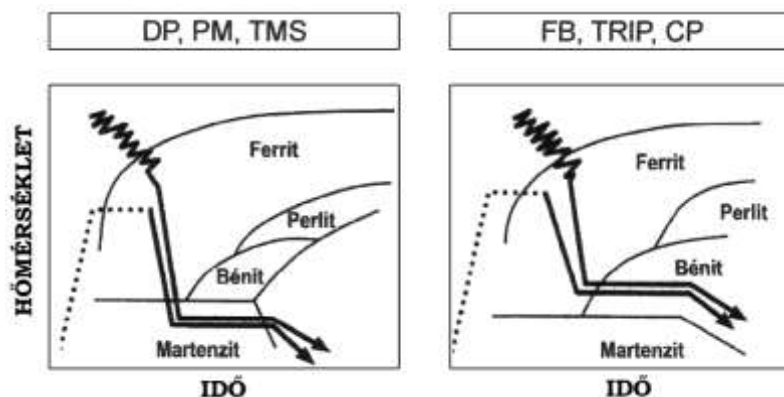
A megfelelő minőségeket a járműipar és az acélgyártók saját szabványaikban rögzítették, gyakorlatilag minden nagyobb műnek saját házi szabványa van a BH és foszforötvözésű minőségekre.

13.4.2. DP és TRIP többes fázisú acélok és martenzites acélok

Elsősorban a járművek gyártmányfejlesztésében a kezdeti nagy lépés a mikroötvözött lemezek kifejlesztése volt. Ezután sorban következtek a további fejlesztések, a foszfor ötvözésű acélok, a duál fázisú (DP) és a Bake-hardening (BH) acélok kifejlesztése, amelyek közé a nagyobb szilárdságú IF acélok is hozzátartoznak. 1990 körül kezdték alkalmazni a gépkocsi-karosszéria gyártásban a továbbfejlesztett mikroötvözött acélokat izotróp acélok fogalma alatt, majd követte a TRIP acélok, a komplex fázisú (CP) és a martenzites acélok (MART) fejlesztése.

A jól alakítható és nagyszilárdságú acélok megvalósításának újabb lépése a komplex fázisú (CP) acélok kifejlesztése. A nagyon finom szövetben a lágy alkotórészek mellett nagyon nagy mennyiségben vannak kemény fázisok

A többesfázisú acélok gyártását vázlatosan a 13.15. ábra szemlélteti. Az ábrában a melegszalag gyártást a cikk-cakk alakú vonal a hidegen hengerelt szalag hőkezelését a pontozott vonal szemlélteti.



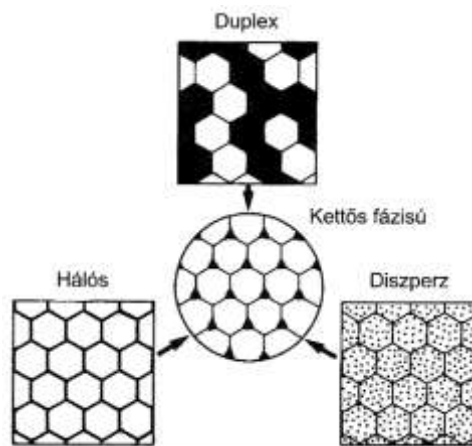
13.15. ábra A többes fázisú acélok gyártási sémája melegen és hidegen hengerelt szalagként

A DP – acélokra a ferrit+martenzit, vagy a ferrit+bénit+martenzit szövet a jellemző. (A ferrit mátrixban 10-20% martenzit) Melegen hengerelt szalagok esetében szabályozott hőmérsékletvezetésű meleghengerléshez kapcsolódó szabályozott hűtéssel elérhető az ilyen szövetszerkezet. Hidegen hengerelt szalagok esetén a kívánt tulajdonságok szavatolása érdekében csak interkritikus lágyítás és az azt követő gyors hűtés lehetséges. Az interkritikus lágyításnál a hevítés az $\alpha + \gamma$ tartományban, ahol 10-15 % ausztenit keletkezik, mely C-ban dúsul (0,6-0,7%) és ha a lehülési sebesség nem túl kicsi martenzitté alakul. Az interkritikus lágyítás A_{c3} közelében végzett hőntartást, majd gyors hűtést jelent. A folyáshatár/szakítószilárdság hányados 0,55-0,60 körüli érték. Összehasonlításként a HSLA N-hengerlésű acéloknál a hányados 0,80-0,85, a TM- hengerlésű acéloknál 0,90-0,95.

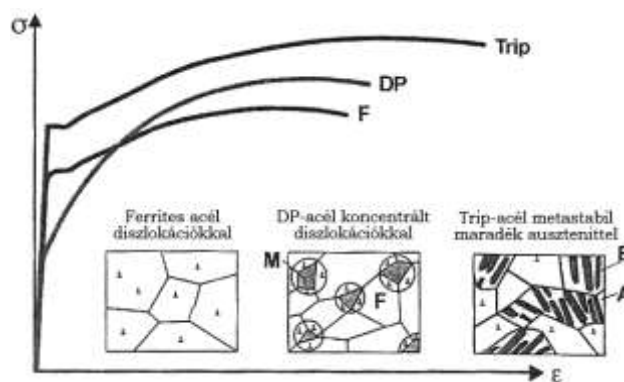
A duális fázis mikroszerkezetére jellemző, hogy a ferrites mátrixban valamely második fázis eloszlása hálós, diszperziós és duplex jellegű lehet. (13.16. ábra) Ez a szövetszerkezeti

elrendeződés meghatározza az acél szakítódiagramjának jellegét. (13.17. ábra) A folyáshatárt a lágy fázisban, azaz a ferritben lejátszódó képlékeny alakváltozás kezdő feszültsége határozza meg. Ebben a szakaszban a kemény fázis még rugalmas alakváltozási állapotban van. Az alkalmazott feszültség növelésével az anyag alakítási keményedése egyre nagyobb lesz. A kettős fázisú acélok részletes metallográfiai vizsgálata azt mutatta, hogy a szövetben bizonyos mennyiségű maradék ausztenit is kimutatható, mely szintén hozzájárul az alacsony folyáshatárhoz.

A *TRIP* – acélok gyártástechnológiája feltételezi az interkritikus lágyítást, így csak a legmodernebb meleghengerművekben van esély a közvetlen gyártásra. Egy 0,20% C - tartalmú TRIP acél szövete szobahőmérsékleten kb. 12% ausztenitet, 38% bénitet és 50% ferritet tartalmaz. A szobahőmérsékleten is stabil ausztenitet az ausztenit karbondúsulása teszi lehetővé. Az ilyen többszfázisú szövetet az interkritikus lágyítás hőmérsékletéről végzett lépcsős lehűléssel lehet elérni. A maradék ausztenitnél a képlékeny deformáció során allotróp átalakulás következik be, részben vagy teljesen martenzitté alakul át. Az átalakulás jelentős keményedéssel jár együtt.



13.16. ábra A két fázis alkotta szövetszerkezetek lehetséges típusai



13.17. ábra A többszfázisú és a HSLA acél szakítódiagramjai

A fő ötvöző elem a **karbon**, amely minden átalakulást jelentősen befolyásol, meghatározza a szövetszerkezetet és a mechanikai tulajdonságokat. A C stabilizálja az ausztenitet, ez a hatás a DP-acélok esetében martenzit képződéshez, TRIP acélok esetében az ausztenit stabilizálódásához vezet. A C ötvözés a hegeszthetőséget rontja, ezért 0,3%-ban maximalizálják.

A DP-acélok és a TRIP acélok további fontos ötvözői a **Si** és a **Mn**. A DP acéloknál a Si a ferrit kialakulását segíti, a Mn késlelteti a bénites átalakulást. Miután a Si a cementitben nem oldódik, a TRIP acéloknál késlelteti a karbidkiválásokat a bénit képződése során, a Mn elősegíti a karbondúsulást és szilárdoldatos keményítéssel növeli a szilárdságot. A nagyobb Si tartalom rossz felületi minőséget okoz ezért, hideghengerlésnél sem kedvező, ezért a szilíciumot *foszforral kombinált Al*-al csökkentik, vagy helyettesítik.

Meleg és hideghengerlés, interkritikus lágyítás

Az MP-(DP) és TRIP – szövetű melegen hengerelt szalag gyártásakor az utolsó készsori állványokban a szalag hőmérsékletének az ausztenit T_{nr} újrakristályosodási határhőmérséklet alatt kell lenni. Oka, hogy az alakított állapotú ausztenit ferritképződésére gyorsabban zajlik le, mint az alakítatlané és az átalakuláshoz rendelkezésre álló idő korlátozott.

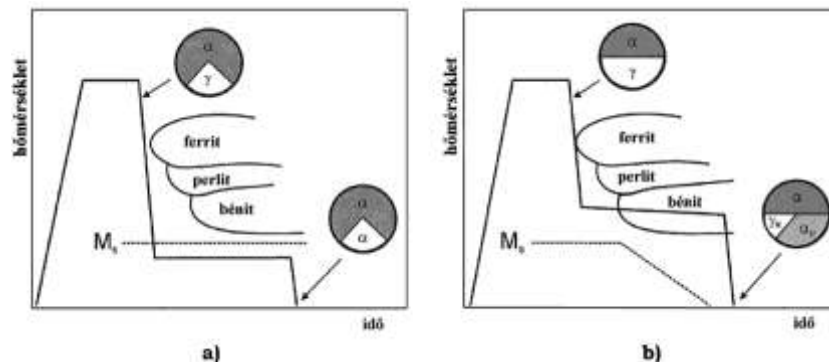
A kettősfázisú acélok (DP) esetében a szalaghűtésnek biztosítania kell először az ausztenit 85%-nak - az ausztenit karbondúsulásával együtt járó – átalakulását ferritképződésé, úgy hogy perlit és bénit ne jöjjön létre, majd kb 200°C-os csévézési hőmérsékleten a martenzit kialakulását. Ezért egy hőntartási lépcsőt kell beiktatni azon a hőmérsékleten, ahol a ferritképződés kinetikája a maximumot mutatja, vagy az ötvözést úgy kell kialakítani, hogy a ferritképződés gyorsabb legyen.

A TRIP acélok esetében alacsonyabb hűtési sebességet alkalmaznak, mivel a ferrites átalakulás az ötvözők jelenléte és a magasabb karbon tartalom miatt késik és bénitre is szükség van a szövetben. Ezért a szalaghűtést 500°C-os tartományban végzik.

Hideghengerműi alapanyag hengerlésére két féle technológia alakult ki. Az első ferrit – perlit szövetet hoz létre 700°C-os csévézési hőmérséklettel. Az anyag lágy, kiválóan alkalmas hideghengerlésre. A második technológia szerint a csévézési hőmérséklet a bénites átalakulási tartományban van. Az így kapott melegszalag hideghengerlésekor jóval magasabb hengerlési erők lépnek fel, mert keményebb szövetelem jön létre. Ennél az eljárásnál a hideghengerlés utáni lágyítás finomabb mikroszerkezetet és jobb tulajdonságokat eredményez.

Hideghengerlés után a tekercsokat hőkezelní kell, amely folyamatos lágyító soron, vagy tűzi horganyzó sorokon valósítható meg.

A 13.18. ábra a kétfázisú és a TRIP acélok hideghengerlés utáni hőkezelési technológiájának az elvi ábráját mutatja.



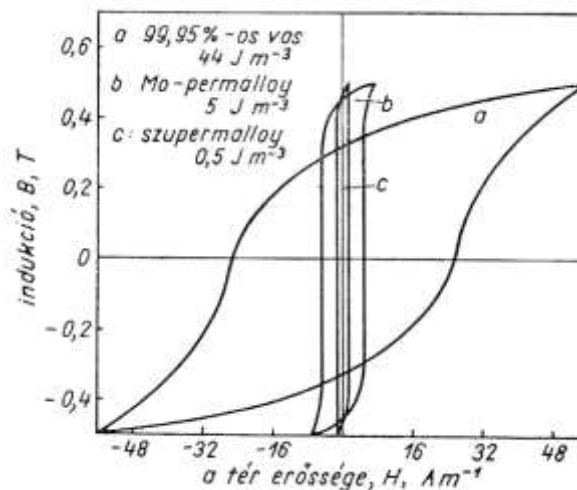
13.18. ábra Hidegen hengerelt szalagok elvi hőkezelési diagramja
a) DP acélra, b) TRIP acélra

Az MP- és a TRIP acélok közvetlen melegghengerléssel való előállításuk csak akkor lehetséges, ha a melegghengermű technológiai adottságai és a gyártandó acélokban lejajló és megfelelő szövetszerkezeti állapotot eredményező fémteni folyamatok harmonizálnak egymással. Mivel a DP – és a TRIP – acélok akkor jelentek meg, amikor a lapos termékeket előállító kohászati üzemekben már letelepítették a folytatólagos vagy a félfolytatólagos hengersorokat, az előbb említett harmonizálás csak a legújabb sorokon teljesül. Alapvető problémát az átalakulási

folyamatok viszonylag nagy, 10 s nagyságrendű időszükséglete okozza. Az ausztenit ferritté, illetve bénitté való átalakulásának nagy időszükséglete értelmetlenül hosszú gyártósorokhoz vezetne. E probléma áthidalására lehetőség a kifutóoldalon egy második csévéelőberendezés telepítése. A szalag feltekereselt állapotban gyakorlatilag állandó hőmérsékleten marad, így az ausztenit-ferrit és az ausztenit-bénites átalakulás feltételei biztosíthatók. Különösen fontos szempont az ausztenit– ferrit átalakulás idő időszükségletének a csökkentése. Így ezeknek a minőségeknek a melegen hengerelt állapotú előállítás is lehetséges a félfolytatólagos sorok korszerűsítésével.

13.5. Elektrotechnikai acélok

Az elektrotechnikai acélok a dinamó- és transzformátor acélok, melyekből elektrotechnikai berendezések alkatrészeit, pl.: villamos forgógépek álló- és forgórészeit készítik. A villamosgépgyártó ipar az alapanyagot hasított szalag és táblalemez formában dolgozza fel. Az elektrotechnikai acéloknál kis mágneses térerősség mellett nagy indukciós érték érhető el és a hővé alakult átmágnesezési veszteség csekély. Ezek a lágymágneses anyagok. Az átmágnesezési veszteséget két tényező okozza, a hiszterézis- és az örvényáram veszteség. A hiszterézis veszteséget a hiszterézis görbék által bezárt terület alapján lehet meghatározni (13.19. ábra).



13.19. ábra Mágnesek hiszterézise

Az örvényáram veszteség arányos a lemez villamos vezetőképességével. Hatásosan csökken a veszteség a lemezvastagság csökkenésével, ezért a forgógépeknél 0,50mm, a transzformátoroknál 0,23mm vastag, egymástól szigetelőanyaggal elválasztott lemezt használnak.

Az elektrotechnikai acélok követelményeit a legjobban a **Fe-Si** ötvözetek elégítik ki.

A **Si** a legfontosabb ötvöző elem, csökkenti a mágneses térerősséget, az örvényáram és a hiszterézis veszteséget. Ferritképző, ezért szűkíti a gamma mezőt. Az acél szemcsedurvulási hajlamát erősen növeli, ugyanakkor a szilárdságot és a keménységet is növeli. A Si tartalom az elektrotechnikai acéloknál a lágycélok Si tartalmától 6,0 %-ig változik a gyártott minőségtől függően.

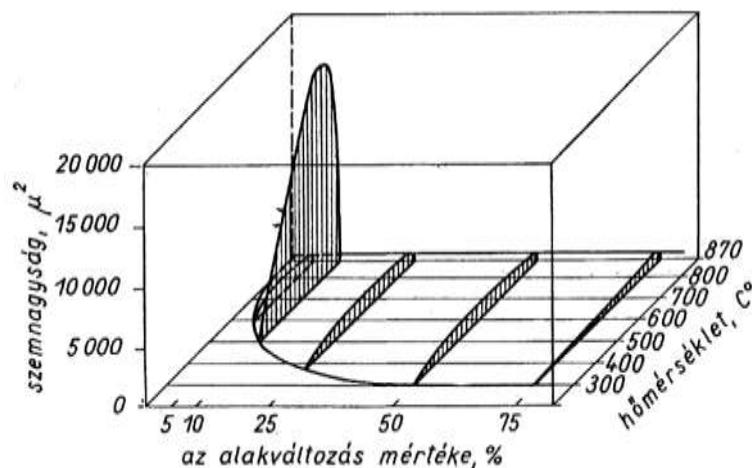
Al és a **P** szintén ferritképző. Az Al-ot a Si helyettesítésére alkalmazzák a dinamó minőségeknél, a P a stancoláshoz szükséges ridegséget javítja.

Az elektrotechnikai acélok gyártásánál a **C, Mn, S, Cr, Cu, N** káros elemek.

A dinamó minőségek nem szemcseorientáltak, a szemcsenövekedés szempontjából nincs kitüntetett irány.

A transzformátor minőségek szemcseorientáltak. A szemcseorientációt ún. inhibitorok hozzáadásával és vertikális gyártástechnológia megfelelő szabályozásával lehet elérni. Az inhibitorokat acélgyártás közben kell az adaghoz hozzáadni, de a legújabb irodalmak szerint hőkezelés közben is hozzáadhatók.

A hiszterézis veszteség függ még a karbon tartalomtól kívül a szemcsenagyságtól, valamint a zárványok és szennyező elemek kristályhatár menti kiválásaitól is. A karbon nemcsak a veszteséget növeli, hanem mágneses öregedést is okoz, ha a durva kristályok belsejében a hő hatására finom részecskék alakjában ϵ -karbid válik ki és rontja a mágneses tulajdonságokat. A durva nagy kristályos szövetszerkezetet a nem irányított szemcsészetű dinamó szalagoknál kritikus (8-10%-os) hidegalakítás utáni újbóli hőkezeléssel lehet elérni (13.20.ábra). A transzformátor szalagoknál dekarbonizáló lágyítást és magas hőmérsékletű hőkezelést alkalmaznak a szemcsedurvítás érdekében. Az elektrotechnikai minőségeket hidegen hengerelt szalagból állítják elő. A lemezzavastagságnak is jelentős szerepe van a veszteségek csökkentésében, pl.: 0,35mm vastagságú transzformátor lemez átmágnesezési vesztesége 1,4 W/kg, míg a 0,23mm vastag lemezé 0,85 W/kg 50 Hz és 1,7 T mellett. A transzformátor lemezek kocka és Goss - textúrával készülnek.



13.20. ábra 0,08% C, 0,02% Si, 1,13%Mn, 0,002% P, 0,35%S tartalmú lágyvas újrakristályosodási diagramja

13.5.1. A nem irányított szemcsés szerkezetű dinamószalagok gyártása

Ötvözött dinamószalagok gyártása

A nem irányított szemcsészetű, izotróp tulajdonságú **full-finished** dinamószalagok gyártási sémája:

Acélgyártás
Üstmetallurgia
Folyamatos öntés
 (Melegbeadás)
Betéthevítés
Szélesszalag meleghengerlés
 (Előzetes hőkezelés)
Pácolás
Hideghengerlés I. fázis

Hőkezelés harangkemencében

Kritikus alakítás 8-12%

Véghőkezelés

Szigetelőréteg felvitele

Hasítás

(Szállítás a felhasználóhoz)

Stancolás

Alkatrész összeállítás

A full-finished gyártás a felhasználás számára kész dinamószalagot jelet. A folyamatosan öntött brammák melegbeadását – közvetlenül az izzítókemencébe adását 300-400 °C-on – a hőfeszültségi repedések elkerülése miatt 1,5 % Si tartalom fölött alkalmazzák. A melegtekercek pácolás előtti előzetes homogenizáló hőkezelését a lecsévélti törések elkerülése miatt 2,5 % Si tartalomtól alkalmazzák. A véghőkezelést általában szalag hőkezelő áthúzó kemencében végzik dekarbonizáló lágyítással A_{c1} fölötti magas hőmérsékleten. A dekarbonizálás nem szükséges, ha az acélgyártásnál vákuumozással 0,003% C tartalmat elérték. Az elektrotechnikai tulajdonságok jelentős javulása érhető el az acél tisztaságának a növelésével, a MnS zárványok csökkentésével. Ebben az esetben 0,10 %-Sn ötvözással részben kocka textúrák szemcsézett érhető el. A dinamószalagoknál a Si ötvözés mellett a 0,20 - 0,45 % Al ötvözést is alkalmazzák, mely ebben a mennyiségben már szemcsedurvító hatású és az átmágnesezési veszteséget csökkenti.

Meleghengerlési technológia jellemzői:

- melegbeadás 1,5% Si - tartalom fölött,
- hengerlési véghőmérséklet 860-900 °C,
- csévélti hőmérséklet 680-720 °C,
- jellemző készméret 2,50 mm

Hideghengerlési technológia jellemzői:

- előzetes hőkezelés 2,5% Si - tartalomtól,
- tompahegesztés esetén fedőporral,
- jellemző készméret 0,50 és 0,70 mm,
- hideghengerlés készmérete a 8-12% kritikus alakítást is figyelembe véve 0,53 és 0,74 mm,
- reverzáló hideghengerlésnél a 0,53 mm –re hengerlésnél 78,8% összefogyás és a felkeményedés miatt közbenső hőkezelést is alkalmaznak,
- kritikus alakítás 8-12%,
- harangkemencei véghőkezelés előtt a tekercsmenetek összetapadásának elkerülése miatt zsírtalanítást célszerű alkalmazni,
- dekarbonizációs véghőkezelés áthúzó kemencében,

A stancoláshoz megfelelő felületi keménység biztosítása érdekében rendszerint P ötvözést alkalmaznak.

A **semi-finished** típusú gyártásnál a gyártómű befejezi a gyártást a kritikus alakítást követő hasítással. A felhasználóra maradó tevékenységek:

Alkatrészek kisajtolása

Dekarbonizációs véghőkezelés,

Szigetelőréteg felvitele

Alkatrészösszeállítás

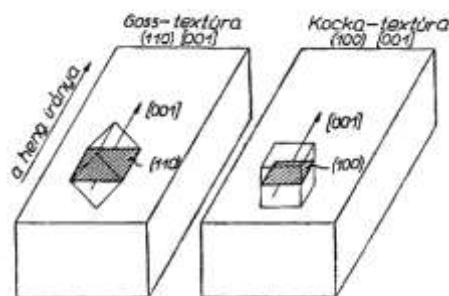
A végfelhasználó a kistancolt darabokat hőkezeli.

Ötvözetlen dinamószalagok gyártása

A rövid és szakaszos üzemű berendezésekhez alkalmazzák a Si ötvözés nélküli lágyacélból gyártott elektrotechnikai minőségeket. A gyártási folyamat megegyezik a semi-finished folyamatával, a stancoláshoz a felületi keménységet és a kívánt felületi érdességet dresszírozással állítják be. A semi-finished minőségek esetén a mágneses lemezvizsgálatot dekarbonizációs kemencében végzett véghőkezelés után Epstein készülékkel végzik.

13.5.2. Ötvözött irányított szemcsészetű elektrotechnikai acélok – transzformátor acélok – gyártási lehetősége

A lágyacélok hideghengerlése és újrakristályosodása után a (110) [001] Goss-textúra a leggyakoribb. Ez a textúra csak mérsékelt, 50%-alatti alakításkor jelenik meg, nagyobb alakítás után általában vegyes textúra jön létre, a Goss-helyzetén kívül más textúrák is jelen vannak. Lágyacéloknál a Goss-textúra nem kedvező, mert a lemez különböző irányaiban a mechanikai tulajdonságok eltérőek, így a lemez **r-értéke** is alacsony. Az elektrotechnikai lemezeknél a követelmény ellentétes, mint a lágyacéloké. A különböző kristálytani irányokban a mágnesezhetőség eltérő. A ferritkristályok a legkisebb veszteséggel az (100) irányban, kevésbé jól az (110) irányban és legrosszabbul az (111) irányban mágnesezhetők. Goss N.P. gondolt elsőként arra, hogy a ferrit mágneses irányítottságát az újrakristályosodási textúra révén a vasmag készítésére szánt szalagoknál felhasználja. Ha a hidegen hengerelt és újrakristályosodott lemezekben kocka-textúra keletkezik, vagyis az (100) irány a hengerlés irányával és a keresztiránnyal is megegyezik, akkor a lemez két fő irányában a mágneses tulajdonságok igen kedvezőek lesznek. Ha csak a hengerlés irányában helyezkedik el az (100) irány, és keresztirányban egy kevésbé előnyös, pl. az (110) irány, ami a Goss-textúrára jellemző, akkor a lemezek kedvező mágnesezési tulajdonságai csak az egyik irányban találhatóak. Tehát mind a kocka-, mind a Goss-textúrás lemezek kedvezőbbek elektrotechnikai felhasználásra, mint a textúra nélküliek. Különösen a Goss-textúrás lemezek gyártása terjedt el, mivel a gyártása ipari méretekben jobban kézben tartható. A kocka-textúra gyártása az alapanyag rendkívül magas tisztasági követelményei és a gyártástechnológia nehézsége, valamint szabadalmi védettsége miatt nem terjedt el. A 13.21. ábra szemlélteti a hidegen hengerelt lemezek újrakristályosodási textúrájában a rácselem helyzetét Goss- és kocka-textúrában.



13.21. ábra A ferrit Goss- és kocka – textúrája

Éles Goss-textúrát egyszeri hidegalakítással és azt követő hidegalakítással nem lehet elérni, mert finomszemcsészetű textúra keletkezik, melyben az irányítottság nem nagy. A Goss-textúrához magas hőmérsékletű hőkezelésre van szükség és ennek hatására szekunder

újrakristályosodásra. A szekunder újrakristályosodás alatt durvaszemcsék keletkeznek, melyek irányítottága igen magasfokú.

Hogy a magashőmérsékletű hőkezelésig szövetszövetdurvulás ne lépjen fel **inhibitorokat** alkalmaznak. Az inhibitorok zárványok, elsősorban AlN és MnS zárványok, de vannak cégek, melyek Se, Sb és B elemeket is felhasználják zárványok képzésére. A stabil vegyületek, amelyek magas hőmérsékleten nem oldódnak károsak, pl. TiN. A magas nitrogén tartalom miatt N-öblítést alkalmaznak, de ez kevés a megfelelő N-szint beállításához. Ezért CaCN₂ kalcium-cianamidot használnak a nitrogénszint pontos beállítására. A transzformátor acél jellemző kémiai összetétele: C - 0,024-0,045%; Si - 3,0-4,0%; Al - 0,012-0,018%; N - 100-140 ppm. Az alacsony C-tartalom miatt ezeket az acélokat vákuumozással gyártják. Vákuumozás nélkül az alacsony C-tartalom miatt az oxigén-tartalom magas és növeli a nem oldódó Al₂O₃ zárványok mennyiségét és rontja a textúráltságot. Az öntött bugákat azonnal át kell szállítani a meleghengerműbe és betolni az izzítókemencébe a hőfeszültségi repedések elkerülése érdekében. A brammák hevítése magas 1400 °C-os hőmérsékleten történik, mely a MnS és az AlN vegyületek oldódása miatt szükséges. Kifejlesztették már az alacsonyabb brammahevítési technológiával történő gyártást is. Ezeknél a technológiáknál az elvesztett inhibitorokat a hideghengerlés utáni hőkezeléskor NH₄ atmoszférában történő hőkezeléssel pótolják.

A Goss-textúrás elektrotechnikai lemezek gyártásának vázlatos menete:

Acélgvártás

(3,0-4,0% Si tartalommal)

Üstmetallurgia

(Vákuumozás)

Folyamatos öntés

Melegbeadás

Hevítés 1400°C - on

Szalaghengerlés

Melegtekerics hőkezelés

Pácolás

Hideghengerlés I.

(~60 %-os összfogyással)

Újakristályosító hőkezelés

(Lágypítés 850-930°C-on hidrogén atmoszférában)

Hideghengerlés II. - 0,23 – 0,35 mm-re

(Kialakul a zömmel (111)[112] textúra,)

Dekarbonizációs hőkezelés

(áthúzó hőkezelés 800 °C-os nedves hidrogéngázban, finomszemcsés vegyes textúra részben Goss-helyzetű kristályokkal, 0,002-0,05 mm szemcseátmérővel)

Hőszigetelőréteg felvitele

Magashőmérsékletű hőkezelés

(1200°C-on hidrogéngázban, szekunder újrakristályosodás, szemcseátmérő 1-3 mm-re növekszik, durvaszemcsés Goss-textúra (110)[001])

Felület tisztítás

Elektromos szigetelő réteg felvitele

Feszültségcsökkentő nyújtó hőkezelés

(800°C-on újrakristályosodás, szövetszövetváltozás nélkül)

Kikészítés

(Darabolás, hasítás)

Meleghengerlési technológia jellemzői:

- melegbeadás,
- magas hőmérsékletű izzítás, 1400°C,
- Tvég – 850 – 900 °C,
- Tcsév – 650-700 °C

Hideghengerlési technológia jellemzője:

- melegtekerics hőkezelése, korábban a vákuum-metallurgia hiányában dekarbonizálták is a tekerceket, egyenlőtlen dekarbonizációt eredményezett, ezért ma már nem alkalmazzák,
- hideghengerlés előtt a tekercek felmelegítése 65°C fölé az alakítási szilárdság csökkentése miatt,
- nyújtó hőkezelés a magas hőmérsékletű hőkezelésnél a tekercesalakra görbült szalag kiegyenesítése húzás

Kocka textúrás elektrotechnikai lemezek gyártásának vázlatos menete:

Melegen hengerelt tekerics

(0,8-2,5% Si tartalom, nagy tisztaság, kis C-, N-, és S-tartalom.)

Melegtekerics izzítása

(Izzítás 1200°C-on hidrogénatmoszférában – a zárványok koagulálnak.)

Pácolás

Hideghengerlés I.

(70-90%-os alakítással.)

Lágvitás

(Izzítás lassú felmelegítéssel 800-850°C-on. Vegyes textúra (210)[001]; (300)[001] és (410)[001] helyzetű kristályokkal.)

Hideghengerlés II.

(Alakítás 60-75%-os összefogyással 0,20-0,30 mm vastagságra. A hengerlési textúra túlnyomórészt (111)[112] helyzetű kristályokkal.)

Újrakristályosító hőkezelés

(550-600 °C-on száraz hidrogénatmoszférában, finomszemcsés textúra, részben kocka helyzetű kristályokkal.)

Szekunder újrakristályosító izzítás

(Izzítás 1150 - 1200°C-on tiszta hidrogénben, vagy argonban. Szekunder újrakristályosodással éles kockatextúra kialakulása(100)[001]

13.6. Felületbevonás alapanyagai

13.6.1. Szalag tűzi horganyzás anyagminőségei

A szalag tűzi horganyzáshoz elsősorban hideghengerelt alapanyagokat használnak, de újabban vékony (0,8-1,5 mm) melegen hengerelt pácolt szalagokat horganyoznak.

A horganyzott lemezek egyik fontos felhasználója és a szalag tűzi horganyzási technológia fejlesztésének a rugója az *autóipar*, mely 1970 –óta használ horganyzott acéllemezt alapanyagként, kezdetben Zn-Ni-Fe bevonatú elektrolitikusan horganyzottat, majd a tűzi horganyzó sorok fejlesztései lehetővé tették az autóiipari magas igények kielégítését. Az alaptéchnológiák (acélgyártás, meleg- és hideghengerlés) fejlesztésével összhangban kifejlesztették a bevonatos IF és ULC lágyacélok és a nagy szilárdságú mikroötvözött kiválóan keményedő acélok, a lakkbeégetés hőmérsékletén keményedő acélok(BH), a

többesfázisú acélok (DP , TRIP), ferrit bénites (FB) és martenzites (MS) acélok gyártását. Az autóipar követelményei a horganyzott lemezekkel szemben – jó hegeszthetőség, megfelelő keménység, kopásállóság, élkorrózióval szembeni ellenállás. Ezeket a felsorolt tulajdonságokat az EN 10336 szabvány tartalmazza. A lágyacélok meleghengерlési technológiájánál a folytatólagos hőkezelés miatt A₁ fölötti csévélési hőmérsékletet alkalmaznak. A nagyszilárdságú acéloknál a hideghengерléshez kedvező szilárdsági tulajdonságok kialakítása határozza meg a csévélési hőmérsékletet.

Az építőiparban a légköri korrózióknak ellenálló acélokot kiszorították az Al-ot tartalmazó horganybevonatokat, melyek a sérülés helyén védőréteget képeznek és megakadályozzák a további korróziót, a felületre a műanyag alapú bevonatok jól tapadnak. A hidegen jól alakítható és a szerkezeti acélokot az EN 10327 és az EN 10326 szabványok tartalmazzák. A háztartásigépgyártó iparban és az autóiparban a környezetvédelmi előírásoknak meghatározzák, hogy a felület passzíválásához [Cr(VI)]mentes kis szervesanyag tartalmú bevonatokat lehet használni.

13.6.2. Elektrolitikus fémbevonások alapanyagai

A legismertebb eljárás az **elektrolitikus ónozás**, melynek terméke az ónozott lemezből készülő konzervdoboz. Korábban, a 70-es évekig a tűzi ónozást is alkalmazták, de gazdaságosabb és jobb minőségű elektrolitikus eljárás teljesen kiszorította.

Elektrolitikusan ónozott lemezeknél a szalagok felületi keménysége az egyik minősítő jellemző. A szabvány hét féle temper fokozatot különböztet meg. A hidegen hengerelt alapanyag gyártás sémája az alábbi:

pácoló
4 állványos tandem sor
áthúzó hőkezelő
2 állványos dresszírozó
tekerceselőkészítés, átcsevélés
elektrolitikus ónozás
kikészítés

A 0,14 – 0,18 mm vastag alapanyagokat, melyek felületi keménysége 73-77 HR30T kétszeres hengerlési eljárással állítják elő.

Az első hengerlés 0,22-0,35 mm – ig, a hőkezelés után a két állványos emulziós rendszerrel is ellátott dresszírozó soron hengerlik tovább készméretre.

Az elektrolitikus horganyzás a járműipar igényei szerit fejlődött ki, de szalag tűzi horganyzásának korszerűsödése gyakorlatilag kiszorította a felhasználásból.

13.6.3. Zománcozás

A zománcbevonat nagyon jó víz- és vegyszerálló, kopásálló, karbantartási igénye minimális, ezért széles körben alkalmazzák korrózióvédő bevonatként.

Zománcbevonattal általában hidegen hengerelt lemezből készült alkatrészeket (edények, háztartási készülékek, stb.) látják el, de higiéniai, esztétikai és korrózióvédelmi okokból melegen hengerelt alkatrészeket és régebben az öntöttvas fürdőkádakat is zománcozhatják.

Zománcnak nevezik azokat a szerves bevonatokat, amelyek üvegszerűek és a kötés 425 °C felett alakul ki. A zománcozással foglalkozó szakterület a zománc alapanyagot frittnak nevezi.

Hibajelenségek a zománcozott acéllemezen

A zománcozott lemezeken, alkatrészekben található felületi hibák oka lehet zománcozási technológiai hiba, valamint a zománcozásra nem megfelelő alapanyag.

A zománcozott acéllemezekben a legjelentősebb hiba a „**halpikkelyesedés**”. A zománcozott felületen pikkelyszerű alakban megjelenő hibák a környezettel szembeni ellenállóság drasztikus csökkenését idézi elő, sok esetben a terméket használhatatlanná teszi, pl.: edények. A pikkelyesedés a zománcozást követően napokkal, akár hetekkel később is bekövetkezhet. A pikkelyesedést pikkelyesedésre nem hajlamos acéllemez zománcozásával lehet elkerülni.

A pikkelyesedés akkor jelenik meg az acéllemezen, amikor a beégetés során az acéllemezbe diffundáló hidrogénatomok a lehűlés során a fém-zománc határfelületen rekombinálódnak és felgyülemlekednek. Ezek után a határfelületen olyan belső nyomás alakul ki, amely a zománcréteget megrepeszti, majd halpikkely alakban leválik. Ez a nyomásnövekedés akár hetekig is eltarthat. Az egyoldali zománcozásnál a hidrogénatomok el tudnak távozni.

A vas és a hidrogén kölcsönhatásánál két jelenséget kell figyelembe venni, egyik a hidrogénnek a vasban való oldhatósága, a másik a hidrogén diffúziója. Nagymennyiségű hidrogén atom tárolódhat a belső hibahelyeken, a nemfémek zárványok körüli mikroüregekben, a diszlokációk és a szemcsehatárok mentén. Azokat a helyeket ahol a hidrogén atom megkötődik, hidrogéncsapdának nevezzük. A csapdák által megkötött hidrogént a diffúziós folyamat szempontjából mozgásképtelennek tekinthetjük.

Az erősen alakított anyagban $10^{12}/\text{cm}^2$ a diszlokációsűrűség. Ennyi diszlokáció 10^3 ppm hidrogént tud lekötni.

A beégetés hőmérsékletén a zománcozás előtti alakításból (mélyhúzás, sajtolás) származó diszlokációk a hő hatására mozgékonyak lesznek, a lemezek felületére vándorolnak hibátlan anyagot hagyva maguk után, ezért a gyakorlati zománcozás szempontjából a diszlokációk nem minősülnek stabil hidrogéncsapdának.

A szemcsehatárok fajlagos felületének növelése (szemcsefinomítás). A szemcsefinomítás hatékony módszere a mikroötvözés.

Mikroüregek az acél belsejében csak mikroszkópos módszerrel mutathatók ki. Az acéllemez felületén atomosan keletkező hidrogén a mikroüregekben rekombinálódik. A zománcozás beégetési hőmérsékletén sem tűnnek el a mikroüregek, ezért stabil csapdák. A durva perlit cementitlemezekéinek töredezése hoz létre stabil mikroüreget. A finomlemezes perlitben kialakuló mikroüregek a további alakváltozás során megszűnnek. Mikroüreg keletkezik valamilyen belső hiba (endogén, exogén zárvány, kiválás) körül, vagy azok belsejében. kemény rideg fázisok körül, illetve fázisokban, mint a masszív karbidok.

Az olyan zárványok, amelyek sem meleg-, sem hideghengerléskor nem töredeznek és változatlanul megtartják a dermedéskor kialakult alakjukat alkalmasak a mikroüregek létrehozására. A zárvány körül képlékeny alakítások az acél „áramlása” mikroüregeket hoz létre. A zárványok alakján túlmenően azok mennyisége is lényeges. Bár területhányaddal is meg lehet adni a pikkelymentesség szempontjából kívánatos határértéket, célszerű ezt az acél oxigéntartalmával megadni. Ha csak oxidzárványokkal akarjuk elérni a pikkelymentességet, az acél oxigéntartalmát 250 ppm körül kell tartani.

Masszív karbidok kialakulása

A folyamatos öntés bevezetésével az acélok nagy metallurgiai tisztaságuk és kémiai homogenitásuk miatt egyenletes tulajdonságúak. Ezekben az acélokban zománcbeégetés után kevés hidrogén csapda van. Ha a hideghengertermői lágyacél alapanyagot a jó mélyhúzóhatóság érdekében meleghengerléskor $550\text{ }^\circ\text{C}$ –on csévélik, mikroüregek nem keletkeznek. Ha azonban a csévélést $720\text{--}780\text{ }^\circ\text{C}$ -on végzik, legalább 60% fogyással hidegen hengerlik és lehetőség szerint dekarbonizáló atmoszférában lágyítják akkor ezt a technológiát *pikkelymentességet biztosító termomechanikus kezelésnek* nevezhetjük és masszív karbid keletkezik. A masszív karbidban a mikrorepedések már kismértékű hidegalakítás hatására is

kialakulnak. A ferrit-perlites acélokban a mikroüregek csak nagy alakváltozások esetén alakulnak ki. A hidegalakítás során létrejött mikrorepedések miatt a lágyítás során mikroüregek képződnek. Ha a lágyítást dekarbonizáló atmoszférában végezzük, akkor mikroüregek képződhetnek, vagy a korábban kialakult mikroüregek tovább nőnek.

A zománczothatóságra való alkalmasság eldöntésére az MSZ EN 10209 szabvány a hidrogén áthaladási idejének a meghatározását írta elő. Először a t_0 értéket vizsgálják, a minősítést a $T_H = \frac{t_0}{h^2}$ érték alapján kell végezni. T_H érték minimum 6-7 kell legyen.

A vertikális gyártástechnológia rövid összefoglalása:

Alapanyag: kis karbontartalmú Al-al csillapított lágyacél (DCO5EK), bórral mikroötvözött alacsony karbontartalmú acél (DCO5EK-B) és IF acél.

Az MSZ EN 10130 szabvány DCO6 (FePO6) Ti mikroötvözésű vákuumozott vagy dekarbonizált acélminősége IF acél- egyrétegű zománczothatósra alkalmas.

Meleghegerlés: hegerlési véghőmérséklet A_3 fölött, csévélési hőmérséklet 720-760 °C.

Hideghegerlés 60-70%-os összefogyással

Hőkezelés – lehetőleg dekarbonizáló atmoszférában,

Dresszírozás

Zománचेégetés 800 °C-felett a megfelelő csapdák létrejötte érdekében.

A bór mikroötvözésű zománczotható minőségeknél a bór-karbonitrid kiválásokat, a ferrit karbontartalmát csökkentik és hidrogéncsapdaként szerepelnek.

13.6.4. Acélminőségek tűzi mártó horganyzáshoz

A tűzi mártó technológiánál felületelőkészítés után a horganyzó kádba mártják a korrózió ellen védeni kívánt bevonandó darabot. A védeni kívánt acéltárgyat a horgany olvadékba merítik, miközben lejátszódnak az acél és a cink közötti termodiffúziós folyamatok. A hő hatására kisebb-nagyobb mélységig cink atomok diffundálnak az acél szövetszerkezetébe és vas atomok lépnek át a bevonatba. A kétirányú diffúzió következményeként az acélfelületen ötvözetrétegek alakulnak ki, melyek az acél és a horgany oldhatatlan kötését biztosítják.

Az acél szilícium és foszfor tartalma és a bevonat vastagsága között egyértelmű a kapcsolat. Az acél szilícium tartalma és a horganyréteg közötti összefüggést a Sandelin effektus tartalmazza. A foszfor tartalom - hacsak nem szándékos a bevitele az acélba – nem éri el azt az értéket, hogy a Sandelin effektust befolyásolná, hatása elhanyagolható 0,02% alatt.

A legújabb kutatások szerint a szilícium és a foszfor tartalom mellett a hidrogén diffúziójának is jelentős a szerepe, hogy a vas/bevonat határfelületen kialakul-e olyan határréteg, ami akadályozza a vas és a cinkolvadék reakciót és ennek megfelelően változik a bevonat vastagsága. Az acélban lévő szilícium mennyisége nagymértékben befolyásolja az anyagszerkezetben a hidrogén diffúziójának lehetőségeit. A szilícium-tartalom függvényében a következő zónákat alakították ki:

- alacsony szilícium-tartalmú zónában (**max. 0,03% Si**) a vas és a δ_1 fázis között vékony határréteg alakul ki, mely gátolja a diffúziós folyamatokat, így vékonyabbak lesznek a bevonatok,
- Sandelin-zóna (> **0,03 – 0,12 Si%**) acéljainál nem alakul ki határréteg, a hidrogén diffúziója szabadon zajlik a vas/bevonat határfelületről az ötvözet fázisba, majd az olvadékba, laza szerkezetű bevonat alakul ki. A hőmérséklet csökkenésével a Sandelin effektus csúcsértéke is csökken.
- Sebisty zóna (> **0,12 – 0,28 Si%**) acéljainál a rétegeképződés a hőmérséklet függvénye.
- Magas szilícium tartalmú zóna (> **0,28 Si%**) acéljainál a hidrogéndiffúzió csökken, termodinamikai folyamatok dominálnak. A vas/bevonat határfelület a horganyzási

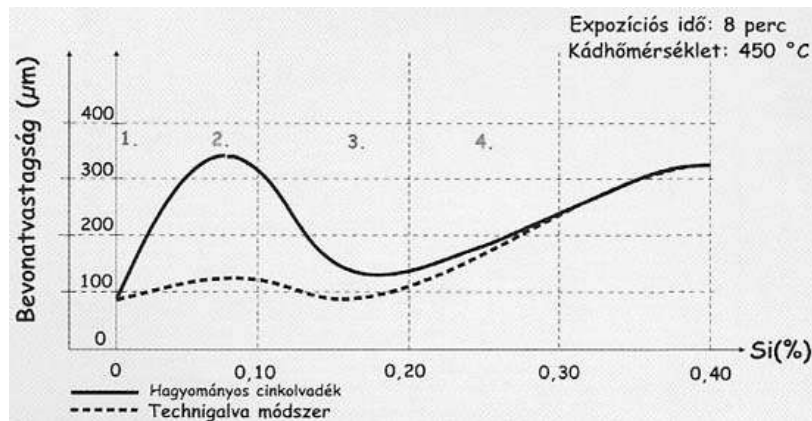
folyamat során szilíciumban feldúsul és korlátozza a $\delta 1$ fázis kialakulását, ezért a bevonat laza és nagykristályos lesz.

A szilícium-tartalom függvényében a horganyréteg vastagságát a Sandelin effektus írja le (13.22. ábra – folytonos vonal).

Az EN 10025:2004 szerkezeti acélokat tartalmazó szabvány foglalkozik a horganyozhatóság kérdésével is (13.2. táblázat).

13.2.táblázat EN 10025-2004 szabvány előírásai a tűzi mártó horganyzás szerkezeti acél alapanyagára

Ötvöző(%)	1.osztály	2. osztály	3. osztály
Si (%)	$\leq 0,030$	$\leq 0,035$	$0,14 \leq Si \leq 0,25$
Si + 2,5P(%)	$\leq 0,090$	-	-
P (%)	-	-	0,035



13.22. ábra Sandelin effektus hatása

Irodalomjegyzék

- [1.1.] Illés Péter: A hengerlés alapfogalmai – Acélhengerész szakmai ismeretek – Dunaferr Zrt. 2006.
- [2.1.] Dr Gulyás József: Hengerlés II. – ME jegyzet 1991.
[2.2.] Dr Kiss Ervin: Képlékeny alakítás – Tankönyvkiadó 1987.
[2.3.] Rédei András: Hengerlés I. – Tankönyvkiadó 1979.
- [3.1.] Dr Geleji Sándor: A fémek képlékeny alakításának elmélete – Akadémiai Kiadó 1967.
[3.2.] Dr Voith Márton: A képlékeny alakításának elmélete, nagy alakváltozások tana – ME Egyetemi kiadó 1998.
[3.3.] M. Hajduk: Spotfibel sily – Dum Technika CSVTS Ostrava 1973.
- [5.1.] H. Neumann: Kalibren von Walzen – VEB Leipzig 1969.
[5.2.] Dr Kiss Ervin, Dr Schummel Rezső, Dévényi György: Képlékenyalakítás III. NME Kohómérnöki Kar Tankönyvkiadó Budapest 1983.
[5.3.] Dr Scummel Rezső: Hengerlés II. NME KFFK Dunaújváros Tankönyvkiadó Budapest 1981.
[5.4.] Dévényi György: Képlékenyalakítás II. – Tankönyvkiadó 1970.
- [6.1.] Rédei András: Hengerlés I. NME KFFK Dunaújváros 1979.
[6.2.] Gulyás József: Finom- és drótsorok üregezésének sajátos elméleti vonatkozásai – BKL. 96.évf. 1973/7. szám.
- [9.1.] Lőrinczi József, Szabó Zoltán, Zsámbok Dénes, Horváth Ákos: Acélok fejlesztési irányai – BKL. 137.évf. 2004/3. szám.
- [10.1.] Dr Sziklavári János és az OMBKE által felkért szakértő csoport: Az integrált acélművek szerepe a világ acélfogyasztásának növelésében és a termékválaszték bővítésében. -Tanulmány 2001.
[10.2.] Szabó Zoltán: Alacsony zárványtartalmú acél gyártásának a feltétele.- DMGK 2006/4.
[10.3.] Vaskohászati Kézikönyv – Műszaki Könyvkiadó 1985.
[10.4.] Molnár József, Bánhegyesi Attila: 45 éves a meleghengermű – DMGK 2006/2. szám.
[10.5.] Grega Oszkár, Győri Mária, Králik Gyula, Zsámbok Dénes: szélesszalag öntő hengerlő technológiák – DMGK 1988/1-2. szám.
[10.6.] Voith Márton: Korszerű meleghengerlési technikák és technológiák . BKL. 124.évf. 1991/4. szám.
[10.7.] D.Rosenthal, P. Sudau: Új tehológiák a nagyszilárdságú melegen és hidegen hengerelt vékonyzalagok előállítására – DMGK 2005/2. szám, Stahl und Eisen 124.évf. 2004/10. szám.
[10.8.] Varga Ottó: Hideghengerműi fejlesztések – ISD DMGK 2008/1. szám.
[10.9.] Nyikes Csaba: Léptékváltás az ISD Dunaferr hideghengerműben – ISD DMGK 2008/3. szám.
[10.10.] Varga Ottó, Dömötör Zsolt: A hideghengermű története – ISD DMGK 2012/1-2-3. szám.
- [11.1.] Dr Rempert Zoltán: Durvalemezgyártás – Dunai Vasmű kiadása 1983.
[11.2.] Lontai Attila: Az ISD DUNAFERR Zrt. meleghengerművének fejlődési pályája a XXI. században – BKL. 141. évf. 2008/3. szám.

- [11.3.] Szücs László, Szabo Zoltán, Kokas Tibor: Az Acélművek Kft. távlati fejlesztés egyik irányzata a bramra torlóprés – DMGK 1998/1. szám.
- [11.4.] Bárczy Pál, Gácsi Zoltán, Tranta Ferenc: A mikroötvözött acéllemezek meleghengерlése – BKL. 124. évf. 1991/4. szám.
- [11.5.] Molnár József, Illés Péter, Kovács Árpád: Melegen hengerelt szalagok szelvényalakjának javítása – DMGK 2005/1. szám.
- [11.6.] Meleghengерlési tervező rendszer (METER) – ME Anyag- és Kohómérnöki Kar, Képlékenyalakítástani Tanszék: 2003.
- [11.7.] J. Jonas: Előadás a IX. Országos Hengerész Konferencián – Ózd 1993.
- [11.8.] Dernei László: Melegen hengerelt szélesszalag alakjának a meghatározása – BKL. 115. évf. 1982/1-2. szám.
- [12.1.] Voith Márton: A hidegszalaghengerlési technológia optimalizálása – BKL. 115. évf. 1982/2. szám.
- [12.2.] Farkas Péter: A Dunai Vasmű Hideghengermű 1700-as hengersorának szűréstervei – NME KFFK Alakítástechnológiai Tanszék 1990.
- [12.3.] Kőhalmi Kálmán: Szűréster készítés gyakorlata reverzáló hideghengерsorokon – BKL. 103. évf. 1970/12. szám.
- [12.4.] Gulyás József: A hengerbelapulás és az állványdeformáció együttes hatása a hidegen hengerelt szalag vastagságára – BKL. 123. évf. 1990/3. szám.
- [12.5.] Varga István, Marko Zsolt: Hideghengerműi munkahengerek domborításának köszörülése az átlagos szelvényalakot leíró függvénygörbe alapján – ISD DMGK 2007/2.
- [12.6.] Dr Verő József, dr Káldor Mihály: Vasötvözetek fémtana – Műszaki Könyvkiadó Budapest 1987.
- [12.7.] Mucsi András, Földi József, Kardos Ibolya, Felde Imre, Palkovics Miklós: Hidegen hengerelt szalagok lágyítási műveletének gyártástechnológiai felülvizsgálata, optimalizálása – ISD DMGK 2012/2. szám.
- [12.8.] Horváth Ákos: A minimálisan hengerelhető szalagvastagság elméletének alkalmazása a hengerléstechnológiában – ISD DMGK 2012/2. szám.
- [12.9.] Horváth Ákos, Verő Balázs: A dresszírozósori technológia vizsgálata, fejlesztése és eredményei a Dunai Vasműben – BKL. 121. évf. 1988/2. szám.
- [12.10.] J.S.Lake: Control of discontinuous yielding temper rolling – Journal of Mechanical 1261985.
- [12.11.] Mihaldinecz László: Melegen hengerelt acélszalagok görgős egyengetése – Dunaфerr tanulmány – 2006.
- [12.12.] Dr Gulyás József: Korszerű húzva egyengetés elméleti kérdései – Mérnöktovábbképző előadás Dunaújváros 1987.
- [13.1.] Lőrinczi József, Szabó Zoltán, Zsámbok Dénes, Horváth Ákos, Verő Balázs: Acélok fejlesztési irányai – DMGK 2003/2. szám.
- [13.2.] Dr Tisza Miklós: Lemezanyagok fejlesztési irányzatai különös tekintettel az autóipari felhasználásra – XIV. KÉPLÉKENYALAKÍTÓ KONFERENCIA előadás és kiadványa Miskolc 2012.
- [13.3.] Dr Szabó Zoltán, dr Horváth Ákos: Metallurgiai és hengerléstechnológiai eszközök az acélok tulajdonságainak biztosítására – előadás, X. Acélfeldolgozási és acélépítési konferencia 2009.
- [13.4.] Verő Balázs, Hirka József, Horváth Ákos, Zsámbok Dénes: Ultrafinom és nanoszemcsés acélok – BKL 137. évf. 2004/2. szám.

- [13.5.] Sziklavári János: Az acélokkal szemben támasztott követelmények fokozódása, az igények kielégítésének technológiai vonatkozásai – DMGK 0994/1-2. szám.
- [13.6.] Hardy Mohrbacher: Melegen hengerelt mikroötvözött, növelt folyáshatárú acélok gépkocsiban és kamionokban való alkalmazáshoz – ISD DMGK 2009/1.
- [13.7.] Hardy Mohrbacher: A nióbiummal mikroötvözött acélok alkalmazása gépjármű karosszériákban - BKL.139. évf. 2006/2. szám.
- [13.8.] Gulyás József, Horváth Ákos, Lőrinczi József, Sebő Sándor, Szélig Árpád, Verő Balázs: A 700 MPa folyáshatárú acélminőségek kifejlesztése – BKL. 136. évf. 2003/6. szám.
- [13.9.] B. Ginzburg: HIGH-QUALITY STEEL ROLLING 1993.
- [13.10.] John G. Lenard/Waterloo, Canada: A mikroötvözött acélok szabályozott hőmérsékletű hengerlése – OMBKE Konferencia Balatonszéplak 2008.
- [13.11.] Portász Attila: HSLA acélok szívósságának javítása – ISD DMGK 2011/2.
- [13.12.] W. Bleck, R. Kaspar, W. Müschenborn, F. Rakosi: Grundlagen der integrierten Wärmebehandlung – Stahl und Eisen 117 (1997) Nr.4.
- [13.13.] M. Streidl, P. M. Willrab: Einfluß der Lackier – und Reparatur Schweißwärme auf die Festigkeit höherfest Stahlblech im Automobilbau – Stahl und Eisen 105(1985) Nr.2.
- [13.14.] Horváth Ákos, Sebő Sándor, Verő Balázs: Többesfázisú és a TRIP acélok gyártása meleghengerléssel – BKL. 139. évf. 2006/3. szám.
- [13.15.] Horváth Ákos, Kovács Mihály, Sebő Sándor, Szélig Árpád, Kopasz László, Török Péter, Verő Balázs, Hirka József: A DP és TRIP- acélok nagyüzemi kísérleteinek jelenlegi állása – DMGK 2004/4.
- [13.16.] Dr Szabó Zoltán, Lukácsi István, Kállai Gábor, Sebő Sándor, Kovács Mihály, Fábrián Imre: Útjelentés, az elektrotechnikai acélok gyártásának tanulmányozása – Csehország 1997.
- [13.17.] Nagy Istvánné, Toth Edit, dr Horváth Ákos, Narancsik Zsolt, Kovács Mihály: Elektrotechnikai acélok gyártása a Dunaferrben – Alkotó Alapítvány Pályázat 2004.
- [13.18.] Verő Balázs, Fauszt Anna, Gyüre László, Horváth Ákos, Szücs Lajos, Hanák János: A vas és a hidrogén kölcsönhatása. Pikkelyesedésre nem hajlamos gyártás elméleti háttere – BKL. 119. évf. 1986/7-8. szám.
- [13.19.] Verő Balázs: A pikkelyesedésre nem hajlamos acéllemezek gyártástechnológiájának fémteni háttere – doktori értekezés 1994.
- [13.20.] Török Tamás, Dénes Éva, Fajger János: Fejlesztések a folyamatos tűzi mártó horganyzásban – BKL. 145. évf. 2012/3. szám.
- [13.21.] Dénes Éva, Török Péter: Folytatólagos tűzi – mártó horganyzási technológiák, bevonattípusok és fejlesztési irányuk – DMGK 2005/2. szám.
- [13.22.] Tűzi horganyzás – Magyar Tűzihorganyzó Szövetség kiadása 2006.