

TÓTH JÁNOS

A melegen hengerelt acél szélesszalag alakhűsége

Viszonylag kevés szakirodalmi utalás található a hengerelt lapostermék (szalag) alakjának a vizsgálatára. A jelen cikk az eddig elért eredményeket továbbfejlesztve, acélok meleghengerlésére érvényes összefüggéseket kialakítva, és tényleges üzemi vizsgálatokkal igazolva az optimális lencsésességhez tartozó paraméterek előzetes meghatározására alkalmas tervező algoritmust ismertet.

1. Bevezetés

A hengerelt szalag méretpontossága „kétirányú”: egyrészt mindenképpen biztosítani kell azt, hogy a szalag névleges (átlagos) vastagsága a kihengerelt szalag-hossz mentén állandó legyen (a tűrésmezőn belül maradjon). Ezt a hengerrés(ek) szabályozásával, a kívánt nagyságú hengerlési erők kifejtésével lehet elérni. További követelmény a szalag szélesség menti méretpontosságának, azaz lencsésességének a tűrésmezőn belül való tartása. Ez az előző feltétel betartásával némileg ellentétes követelményt jelent, hiszen ha a hengerlési erőt változtatják (szabályozzák), a többi paraméter állandósága esetén a lencsésesség azonnal megváltozik. A szalag lencsésége a mechanikai terhelésen (a hengerek rugalmas alakváltozásán) kívül a hengertestre ráköszörült alapdomborítástól és a hengertestek térbeli (!) hőállapotától is függ. A hődomborítás (tengelyirányban is és sugárirányban is változó hőállapot) a köszörült alapdomborítással és a hengerlési erőttől függő rugalmas hengerrésváltozással együtt eredményezi a szalagon mérhető lencséséget. Állandó lencsésesség elérése csak vi-

szonylag állandósult hőállapotú hengertestekkel lehetséges, vagyis a hengerlésnek mindenképpen „ütemesnek” kell lennie annak érdekében, hogy a nagy tömegű és így nagy hőtehetetlenségű (nagy időállandójú) hengerek hődomborodás-változása ne befolyásolja a hengerrést, illetve a hengerelt szalag alakját. A hőállapot stabilizálásának feltétele a hengertestbe bejutó és az abból elvezetett hőmennyiségek (hőáramok) azonossága.

2. A hengerléstechnológiai paraméterek meghatározása

Az irodalomból ismert számítási módszerek zöme csak a hengerelt szalag mindenkori hőmérsékletének a meghatározására alkalmas [1], [2], [3], [4]. Nem teszik lehetővé azt, hogy segítségükkel a szerszámok, azaz jelen esetben a hengertestek hőállapotát is meg lehessen állapítani. A hengerek hőállapotára és a kész szalag alakjára vonatkozó kísérleti mérések is szükségesek tehát annak bizonyítására, hogy a számítógépi program megbízható eredményeket szolgáltat, azaz a tényleges üzemi viszonyokat helyesen reprodukálja. Ennek, és csak ennek igazolása után sza-

bad megkísérelni a meleghengerlési technológiák tervezési alapelveire javaslatokat kidolgozni.

A kidolgozott, az acél szélesszalag meleghengerlésére alkalmazható új, interaktív technológiatervező számítógépi algoritmus és program helyességét kísérleti mérésorozatokkal [3], [5], [6], [7] kell/kellett ellenőrizni. A hengertest hőmérsékletét a hengertestbe beáramló hőmennyiség, valamint a hűtéssel elvont hőmennyiség egyensúlyából lehet meghatározni. A hengerpalást közepe és a hengerelt szalag szélével érintkező helyen elhelyezkedő keresztmetszetek között hőmérséklet-különbség mutatkozik, mert a szalagszéleken túlnyúló hengertestrészek, illetve a henger-csapok fokozott hűtőhatása miatt axiális hőáramlás is kialakul a hengertestben. A munkahengeren a szalag közepe és a szalag széle (ezt nevezzük $b/2$ helynek) közötti hőmérséklet-különbség jelölésére kis kerek deltát célszerű használni: $\delta T_{mh}^{(b/2)}$. Ennek nagysága a munkahengerek hűtési viszonyaitól (hűtőfűvókák helyzete, víznyomás, áramlás, hengergeometria stb.) is függ, a vizsgált hengersorra jellemző és kísérletek eredményeivel pontosítható.

A hengerrésből kilépő szalag alakját a munka- és támhengerekből álló rendszer-együttes rugalmas és hőtágulási alakváltozása határozza meg. A rugalmas alakváltozás számítására alkalmas és megbízható mechanikai összefüggésekről először Oláh Z. [8], míg az alumínium meleghengerlési körülményeire vonatkozó szalagalak számítására Dernei L. [9] publikált használható eredményeket.

3. A hengerelt szalag alakja

A hengerrésből kifutó szalag „átlagos” vastagsága a beállított terhelésen hengerrés (s_0 , [mm]) nagyságától, a henger-

Tóth János 2002-ben a Miskolci Egyetem Anyag- és Kohómérnöki Karán szerzett okleveles technológus kohómérnöki diplomát. 2006-ban abszolutóriumot szerzett a Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskolában dr. Voith Márton tudományos vezető irányítása mellett. Jelenleg a Fémtani és Képlékenyalakítástani Tanszéken egyetemi tanársegéd. Kutatási területe: saválló acélszalagok meleghengerlése.

állvány eredő rugóállandójától (C , [mm/kN]), valamint az aktuális hengerlési erőből (F , [kN]) függ:

$$h_{ki} = s_o + C \cdot F \quad [mm]$$

Ennek a szalaghossz mentén állandónak kell lennie (pontosabban: viszonylag szűk szórásmezőbe kell esnie). Ezt a feltételt vagy folyamatosan működő vastagszabályozó automatikával lehet biztosítani, vagy a fellépő hengerlési erő lehető legszorosabb állandóságáról kell gondoskodni. Ennek alapvető feltétele a magasságcsökkenés állandósága mellett a hőmérséklet állandóságának az elérése annak érdekében, hogy a hengertestek hődomborodása állandó maradjon.

A hossz menti méretpontosság mellett igen fontos tulajdonsága a hengerelt terméknek a szélesség menti méretkülönbség, az úgynevezett lencsésesség:

$$\delta l = h^{közép} - h^{b/2} \quad [mm] \quad \text{esetleg} \quad [\mu m]$$

A lencsésesség kialakulásában a hengerrendszer (munka- és támhengerek) alakváltozása játszik szerepet, mégpedig két, egymással ellentétes hatással:

- a hengerlési erő hatására (közel) két-támaszú tartónak tekinthető hengerek kihajlanak, vagyis a hengerrés közepe megnövekszik (a szalagközép vastagsága nagyobb lesz mint a szalagszélé);
- a hengertest melegezésének hatására a hengerrés csökken (értelemszerűen csak akkor, ha közben nem történik hengerrésállítás), mégpedig úgy, hogy a hengerátmérők növekedése a középső keresztmetszetükben a legnagyobb (a tengelyirányú hőáramlás miatt), ezért ennek a hatásnak a következtében a hengerrés közepe lecsökken (a szalagközép vastagsága kisebb lesz, mint a szalagszélé).

A fenti két hatást befolyásolja a hengerekre ráköszörült alapdomborítás, amelyik negatív, pozitív, esetleg zérus lehet. Ennek nagyságát – állandónak tartott hődomborodás és rugalmas kihajlás mellett – úgy lehet (kell) megválasztani, hogy a szalag kívánt lencsésességét biztonságosan el lehessen érni.

A munka- és támhenger a hengerrés kialakításában különböző szerepet játszik: a munkahenger teljes átmérője részt vesz az alakképzésben, azonban a támhengernek csak a szalag felé eső sugara számít ebbe bele. Ezen túlmenően a két henger egymás felé eső mindenkor sugara sem

teljes egészében „képződik le” a hengerelt szalagon, mivel azok a hengerlési erőből származó jelentős nagyságú terhelés hatására egymásba nyomódnak (beágyazódnak). A beágyazódás, illetve az ezzel járó rugalmas hengerdeformáció a munkahengernek a szalag felé eső, illetve a támhenger felé eső sugaránál egymástól eltérő, mivel megalakításkor a hengerelt darab képlékenysége nagy, míg a támhenger felülete kemény. Ez az eltérő alakváltozási mechanizmus késztet arra, hogy a rés kialakulásában szerepet játszó három hengersugarat külön-külön kell kezelni.

A fentiek szerint tehát a hengerrés szalagszélességre eső teljes alakváltozásának a fele (az alsó és a felső hengerek azonosan alakváltoznak), és egy-egy sugárra [$y = D/2$] vonatkozóan a nagysága:

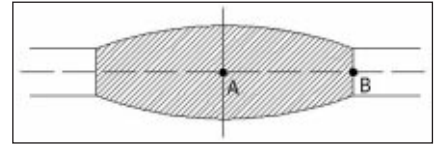
$$y_{rés}^{b/2} = y_{mh}^{b/2, szalag\ oldal} + y_{mh}^{b/2, th\ oldal} + y_{th}^{b/2, mh\ oldal}$$

Itt valamennyi összetevő az alábbi részekből áll:

- Köszörült alapdomborítás (sugárra vonatkozóan: y_0). Amennyiben ez akár a munkahengeren, akár a támhengeren pozitív, a hengerrés közepét csökkenti (negatív alapdomborítás értelemszerűen növeli). Más megfogalmazás szerint a pozitív alapdomborítás a hengerelt szalag középvastagságát csökkenti a szélén mért értékhez képest. Megjegyzem, hogy célszerűségi okokból a támhengereket nem domborítják, vagyis azok alkotója egyenes (azaz a támhengerek rendszerint cilindrikusak, mivel ritkán cserélik azokat).
- Hődomborítás, vagy pontosabban hődomborodás (sugárra vonatkozóan: $y_{hő}$). Hatása a szalagalakra hasonló előjelű mint a köszörült alapdomborításé. A hődomborodás csak pozitív lehet.
- Rugalmas kihajlás (sugárra vonatkozóan: y_{rug}). Szalagalakra gyakorolt hatása az előző kettőhöz képest éppen ellenkező előjelű: mindig a szalag közepének a vastagságát növeli (negatív nem lehet).

A hengerrésből kifutó szalag alakja pozitív lencsésesség esetén elvileg az 1. ábra szerint alakul.

Az eddigiek alapján egyetlen szűrésra vonatkozólag lehetett meghatározni az optimális hengerdomborítást. Viszont egy adott alapdomborítású hengerekkel egy kívánt lencsésességű szalagot csak egymás-



1. ábra. A hengerrésből kifutó szalag alakja

sal összetartozó sebességgel és magasságcsökkenéssel lehet hengerelni (minden más, pl. anyagminőség, hőmérséklet stb. változatlanok feltételezve). A magasságcsökkenés növelésével ugyanis elsősorban a hengerlési erő növekszik, ami a hengerek rugalmas behajlását és a hengerrés közepét növeli. A hengerlési sebesség növelésével pedig elsősorban felmelegsenek a hengerek, ami azok hőtágulását növeli, illetve a hengerrés közepét szűkíti. Az előzők alapján például a kívánt geometriai feltételeknek megfelelő hengerrés kialakításához szükséges hengerlési erő meghatározható.

Egy konkrét hengerlési technológia tervezésekor tehát meg kell választani a melegen hengerelt szalag kívánt lencsésességét. Célszerű, ha a lencsésége minimális. Zérus lencsésesség nem tervezhető, mert ekkor a hengerrésben futó szalag szélesség menti „központosítása” (középen tartása) nem biztosított. A magyar szabvány lencsésesség szempontjából három kategóriát különböztet meg:

- Fokozott síkfekvésű az a szalag, amelynek a közepe kevesebb mint 0,5%-kal vastagabb, mint a széle (a %-os érték átlagos!)
- Síkfekvésű az a szalag, amelynek a közepe kevesebb mint 1,0%-kal vastagabb, mint a széle.
- Nincs minősítve az ennél nagyobb lencsésességű termék.

Célszerű tehát a melegen hengerelt termék középvastagságát eleve 0,5%-nál kisebbre tervezni. A tűrésmezők miatt ez az érték tervezéskor például 0,35...0,45% között vehető fel. Ennek értelmében a készállvány hengerléstechnológiai paramétereit úgy kell megtervezni, azaz a paraméterek összhangját úgy kell megválasztani, hogy a kész szalag lencsésége + 0,40% legyen, ± 0,05% eltéréssel.

Egyetlen termék hengerlésekor ez az összhang viszonylag könnyen megteremthető, ugyanis a hengerpárok szükséges köszörült alapdomborítása kiszámítható, illetve előírható. Egy következő termék esetén (pl. más anyagminőség, más szélesség vagy vastagság stb.) viszont a be-

épített hengerek alapdomborítása már adott; nem változtatható, kivéve, ha a hengerállvány automatikus résszabályozó berendezéssel van ellátva.

4. A számítógépes modell működése

A hengerléstechnológiai paramétereket csak olyan fizikai és matematikai számítógépes modellel lehet/szabad optimalizálni, melyben a számított (rész-)eredmények megegyeznek vagy jól közelítenek a tényleges (üzemi körülmények között fellépő és ilyen viszonyok között mért) eredményekhez. A lencséséget megadó készre-hengerlés rendszerint egy, az előnyújtó hengersonból kikerülő úgynevezett előlemez folytatólagos hengerson történő továbbalakítását jelenti, azaz ez az előlemez „hozza” magával valamennyi ismérvet (geometria, hőmérséklet). Az összehasonlítás céljára itt egy jellemző, a szokásos üzemi technológia szerinti hat szűrős, folytatólagos hengerlés során mért adatokat használunk fel. Ezek:

a hengerek közszőrült alapdomborítása:
 $0,0 \mu\text{m}$ (cilindrikusak);
 anyagminőség: ASTM A 36;
 az előlemez vastagsága: 25,3 mm;
 az előlemez hőmérséklete: 1042 °C;
 késméret: 1230 x 2,03 mm;
 a szűrősterv: 25,3 → 12,12 → 6,87 → 4,24 → 3,06 → 2,35 → 2,00 mm;
 kifutó (kész) sebesség: 6,26 m/sec.

A számított hengerlési erők összehasonlítását az üzemi körülmények között mért adatokkal a 2. ábra mutatja.

A számított és mért hőmérsékletek összehasonlítása azt mutatja, hogy a számítógépes program a hőmérsékletek alakulásában is helyesen modellezi a valóság viszonyait. E szerint például a kész állványból kifutó szalag számított hőmérséklete 844,4 °C, míg a mért érték: 835 °C. A kismértékűnek mondható eltérés oka az, hogy a számított érték a hengerrésből történő kilépés helyére vonatkozik, míg a mérés helye ettől kb. 2 méterrel távolabb volt (csak ott lehetett mérni), így ez alatt a szalag mintegy 10 °C-os lehűlése reális.

Külön ki kell emelni a hődomborodás számításánál lényeges hengertest-hőmérsékletek meghatározását. Erre vonatkozóan is össze kell hasonlítani a mért és a számított értékeket. A munkahenger felületi hőmérsékletének mérése 2,0 x 1230 mm-es szalag folyamatos kihengerlése után, stabilizálódott állapotban történt

[10]. A hőmérsékletméréseket megelőzően a hengerlési sebesség az üzemszerű körülmények között végzett hengerlések során átlagosan kb. 6,0...6,6 m/s között volt. A hőmérsékletek mérése a palást közepén és a hengerelt szalag „széle” helyén (jelölése: b/2) történt. A folyamatos mérés a hengerlés befejezése után mintegy 20 perccel kezdődhetett meg. A hét órán át végzett mérés adataiból szerkesztett lehűlési görbe lehetővé teszi az extrapolálást az üzemi viszonyok alatti (azaz a 0 időpontban meglévő) hőmérsékletekre. Ezek:

| | Mért palásthőmérséklet, °C | Számított palásthőmérséklet, °C |
|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Munkahenger közepén, $T_{mh}^{köz}$ | 55,0 | 57,0 |
| Munkahenger szélén, $T_{mh}^{b/2}$ | 45,0 | 46,7 |

A fenti táblázatban a program segítségével kiszámított hőmérséklet is szerepel. A mért és számított értékek egyezése igen jó. A hengertest-hőmérsékletekre vonatkozóan is megállapítható az, hogy a folytatólagos hengerlésre kidolgozott számítási módszer helyesen követi a valóságot: a mért és a számított értékek igen jól közelítik egymást.

5. A hengerelt szalag alakjának vizsgálata

Az alakhűség számításának az ellenőrzése érdekében is szükség van tényleges, mért adatokra. Mért értékek csak a készállványból kifutó szalagalakra vonatkozóan lehetnek a folytatólagos hengerlés jellegéből következően, és csak a készállvány hengertestjének a hőmérsékletét mérték [10] a hengerpalást közepén és a szalagszél helyén.

A lencséség alakulására vonatkozó mérések eredményeit, egy szalagtekercsre a szalag hossz mentén sok helyen, a 3. ábra mutatja be. A mérések általában minden 50 méter kifutó hosszánál ismétlődtek meg. Ezenkívül a szalag elején és végén 5, 10 és 15 m-nél is történtek mérések.

A bemutatott, és a 600 méteres szalag hosszánál példaként kivett, mért szelvényvastagságokat tartalmazó 4. ábrán látható, hogy a szalagszél közelében hirtelen csökken a vastagság, ezért a kiértékelést a szalagvastagság szempontjából már viszonylag „stabilizálódott”, (b/2 - 40)

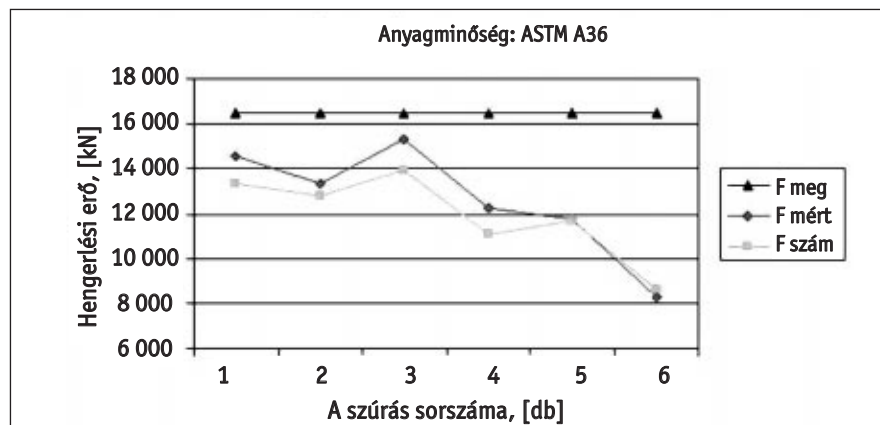
mm-es, két-két szélső helyen érdemes elfogadni. A vastagság mérése további 100 mm-es lépésekben történt. A technológiai előírások szerint (éppen a vékonyodás miatt) a kihengerlés után a szalag mindkét széléről levágnak kb. 20...20 millimétert.

Hasonlóképpen el kell hagyni a több száz méter hosszú szalagtekercs elején és végén mért értékeket is, mivel ezek kihengerlése közben az állványok közötti feszítőerő még nem alakult ki, ezért a vastagság lépcsőzetesen „ugrál”. Ez a figyelembe nem veendő szalagvastagság a szalag elején is és a végén is kb. 15 méterre választható.

A mért vastagsági értékek feldolgozása az alábbi szempontok szerint történt:

Egy-egy mért szalagprofil átlagos lencsésége:

$$\delta h_{mért}^{b/2-40} = h^{köz} - h^{átl} \quad [mm] \text{ esetleg } [\mu m]$$



■ 2. ábra. A mért és a számított hengerlési erők összehasonlítása

Ahol: $h^{köz}$ a szélesség szempontjából közepeán mért tényleges szalagvastagság, míg $h^{átl} = (h_{jobb}^{b/2-40} + h_{bal}^{b/2-40}) / 2$, a két szélen mért vastagság átlaga.

Ezzel a kiértékelési módszerrel ki lehet kerülni a szalag ékességének a lencsés-ségre gyakorolt hatását. Az ékesség definiója:

$$h_{ék} = h_{jobb}^{b/2-40} - h_{bal}^{b/2-40}$$

A kiértékelés eredményét az 5. ábra mutatja az átlagos méretkülönbség a szalag közepén és a szélétől 40 mm-rel beljebb, vagyis a (b/2-40) mm-es helyen : mért érték:

$$\delta h_{mért}^{b/2-40} = h^{köz} - h^{átl} = 35,9 [\mu m],$$

számított érték:

$$\delta h_{szám}^{b/2-40} = h^{köz} - h^{átl} = 35,0 [\mu m],$$

vagyis az eltérés mindössze -2,5 %.

Megállapítható, hogy a számítógépi program jól írja le a valóságos lencsés-séget. Más kérdés az, hogy ez a lencsés-ség nem optimális, de a cikknek éppen az a célkitűzése, hogy a kifutó lencsés-ségek optimális nagyságát a hengerléstechnológiai paraméterek összhangján (megválasztásán) keresztül minden esetben biztosítsa.

Az 5. ábráról az is leolvasható, hogy bár a számított szalagalak (a lencsés-ség) jól kiadja a ténylegesen mért értéket, azonban ez a +40 μm körüli érték a 2 mm névleges szalagvastagság esetén „túl sok”, mert mintegy 2%, pedig a feldolgozóipar és a jó értékesíthetőség +0,5%-nál kisebb lencsés-séget igényel. Javítani a hengerléstechnológiai paraméterek változtatásával lehet. A magasságcsökkenéseket változtatlanul tartva módosítani legkönnyebben a folytatólagos hengerekbe belépő előlemez hőmérsékletének a változtatásával, vagy a hengerlési sebesség-szint változtatásával lehet. A továbbiakban ennek a két, viszonylag könnyen beállítható paraméternek a hatását vizsgáljuk.

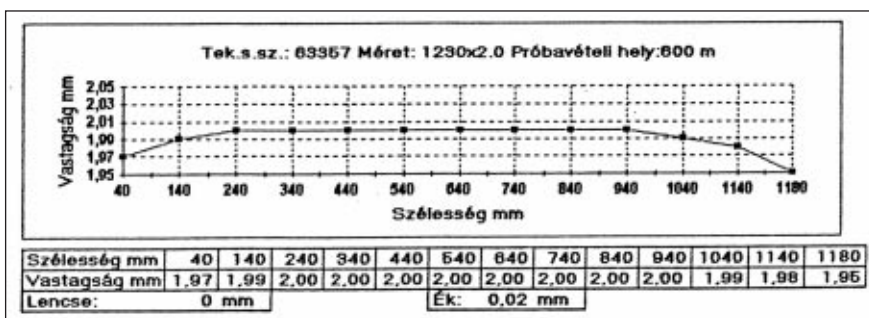
6. A szűrőstervek optimalizálása

A munkahengereknek a fenti szalagalak-mérés során az üzemben alkalmazott profilját változatlanul tekintve (ez zérus köszörült alapdomborítást, azaz cilindrikus hengeralkotókat jelent), és az üzemben járatos technológia szerinti hengerlés viszonyait elfogadva, a végzett számítások végeredményeit az 1. táblázat foglalja össze és a 6. ábra szemlélteti.

A táblázatban azok a cellák, amelyekhez tartozó T_{el} előlemez-hőmérséklet és $v_{kész}$ kifutó (kész)sebesség esetén a szalagalak optimális, vagyis a lencsés-sége a kívánt $h = (0,4 \pm 0,05) \%$ -os tartományba esik, világos háttérűek. Az optimálisnál nagyobb pozitív lencsés-séget (nagyobb közepvastagságot) eredményező $[T_{el} - v_{kész}]$ paraméterpárokhoz tartozó lencsés-ség cellái pontozott háttérszínűek; míg a kisebbeket eredményezőké szürke alapszínű. Minden színes cella között kell találni optimális lencsés-séget jelentő „világos” cellát, azonban a számításokban alkalmazott viszonylag nagy léptetések miatt ezek a „találatok” a táblázatból esetleg kimaradhatnak. Az 1. táblázat adatai-

| MÉRT LENCSESSÉGEK | | | | | | | | | |
|--|---------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--|----|
| Egy hatállványos meleghengersoron hengerelt szalag alakja | | | | | | | | | |
| Tekercsszám: 63357 | | | | | Anyagminőség: ASTM A-36 | | | | |
| Előlemez mérete: h_{el} = | | 25,3 mm | | | b_{el} = | | 1215 mm | | |
| Névl. (kész) vastagság, h_{neu} = | | 2,03 mm | | | Névleges szélesség, b_g = | | 1230 mm | | |
| Kifutó sebesség a készállványból, v_g = 6,26 m/s | | | | | | | | | |
| A hengerállvány száma: | | I. | II. | III. | IV. | V. | VI. | | |
| Munkahengerek alapdomborítása: | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | μ | |
| Kifutó vastagság: | | 12,12 | 6,87 | 4,24 | 3,06 | 2,35 | 2,00 | mm | |
| Mért kifutó szalaghőmérsékletek: | | | | | | | | | |
| A mérés helye a szalagon: | | Eleje | Vége | | | | | | |
| A Coil-Box után, T_g | | 1042 | 1042 | | °C | | | | |
| A készállvány után, T_g | | 835 | 835 | | °C | | | | |
| A regisztrátum ábra-száma | A próbafeleleje L m | Kifutó hőm. T_g °C | Vastagság a (b-40) helye | | | Ékes-ség $h_{ék}$ μ | Vastagság közepén $h^{köz}$ mm | Lencsés-ség $\delta h_{mért}^{b/2-40} = h^{köz} - h_{átl}^{szél}$ mm | |
| | | | bal $h_{bal}^{b/2-40}$ mm | jobb $h_{jobb}^{b/2-40}$ mm | átlag $h_{átl}^{szél}$ mm | | | | |
| 1 | 5 | 835 | 2,00 | 2,04 | 2,020 | 40 | 2,11 | 0,090 | 90 |
| 2 | 10 | 835 | 2,02 | 2,00 | 2,010 | -20 | 2,09 | 0,080 | 80 |
| 3 | 15 | 835 | 1,95 | 1,97 | 1,960 | 20 | 1,99 | 0,030 | 30 |
| 4 | 50 | 835 | 1,97 | 1,95 | 1,960 | -20 | 1,99 | 0,030 | 30 |
| 5 | 100 | 835 | 2,00 | 2,01 | 2,005 | 10 | 2,04 | 0,035 | 35 |
| 6 | 150 | 835 | 2,02 | 2,05 | 2,035 | 30 | 2,07 | 0,035 | 35 |
| 7 | 200 | 835 | 2,01 | 2,00 | 2,005 | -10 | 2,05 | 0,045 | 45 |
| 8 | 250 | 835 | 2,02 | 2,02 | 2,020 | 0 | 2,06 | 0,040 | 40 |
| 9 | 300 | 835 | 2,03 | 2,01 | 2,020 | -20 | 2,06 | 0,040 | 40 |
| 10 | 350 | 835 | 2,03 | 2,02 | 2,025 | -10 | 2,06 | 0,035 | 35 |
| 11 | 400 | 835 | 2,00 | 2,00 | 2,000 | 0 | 2,05 | 0,050 | 50 |
| 12 | 450 | 835 | 2,01 | 1,99 | 2,000 | -20 | 2,04 | 0,040 | 40 |
| 13 | 500 | 835 | 2,00 | 1,98 | 1,990 | -20 | 2,03 | 0,040 | 40 |
| 14 | 550 | 835 | 2,01 | 1,99 | 2,000 | -20 | 2,03 | 0,030 | 30 |
| 15 | 600 | 835 | 1,97 | 1,95 | 1,960 | -20 | 2,00 | 0,040 | 40 |
| 16 | 650 | 835 | 1,99 | 1,98 | 1,985 | -10 | 2,01 | 0,025 | 25 |
| 17 | 700 | 835 | 1,99 | 1,99 | 1,990 | 0 | 2,01 | 0,020 | 20 |
| 18 | 750 | 835 | 1,96 | 1,97 | 1,965 | 10 | 1,99 | 0,025 | 25 |
| 19 | 800 | 835 | 1,95 | 1,97 | 1,960 | 20 | 2,00 | 0,040 | 40 |
| 20 | 850 | 835 | 1,96 | 1,96 | 1,960 | 0 | 2,00 | 0,040 | 40 |
| 21 | -15 | 835 | 1,95 | 1,96 | 1,955 | 10 | 2,00 | 0,045 | 45 |
| 22 | -10 | 835 | 2,23 | 2,25 | 2,240 | 20 | 2,27 | 0,030 | 30 |
| 23 | -5 | 835 | 2,46 | 2,46 | 2,460 | 0 | 2,50 | 0,040 | 40 |
| ÁTLAGOS MÉRT VASTAGSÁG (az első és utolsó 15 m-es szakaszok nélkül): | | | | | | | | | |
| | | | a b/2 helyen: ... | | 1,993 | | | | |
| | | | a szalag közepén: ... | | 2,029 | | | | |
| ÁTLAGOS MÉRT LENCSESSÉG (az első és utolsó 15 m-es szakaszok nélkül): 35,9 | | | | | | | | | |

■ 3. ábra. Mért lencsés-ségek a szalag adott szelvényeinél



■ 4. ábra. Üzemi mért eredmények a szalag 600 m-es szelvényénél [10]

hoz a program a felvett hengerlési sebességet rendre 1,0 m/s-mal, az előlemez hőmérsékletét pedig 100 °C-kal léptette.

A 6. ábra megmutatja, hogy mit lehet tenni az optimális szalagalak elérése érdekében. Az üzemben a vizsgált hengerlési technológiához alkalmazott egyenes alkotójú (cilindrikus) munkahengerekkel (ezeknél a köszörült alapdomborítás zérus) a lencséség kívánt túrésemezejét csak igen nagy hengerlési sebességek, és szintén igen nagy előlemez-hőmérsékletek alkalmazásával lehetne elérni. Az alapul vett hengersoron mindkettő irreális követelményt jelent, a sebességszint ugyanis meghaladja a gépészetileg megvalósítható felső határt, és a több szúrásban végzett előnyújtó hengerlés után a folytatólagos hengersorba belépő előlemez hőmérséklete sem lehet 1150 °C, vagy még nagyobb.

A 6. ábrán háromszög jelöli meg a „munkapontot”: az előzőekben ismertetett szalagalakmérés során alkalmazott technológiában $v_{kész} = 6,26$ m/s volt a kifutó (kész) sebesség és $T_{elő} = 1042$ °C az előlemez-hőmérséklet; míg a kész szalag átlagos méretei a 3. ábrából:

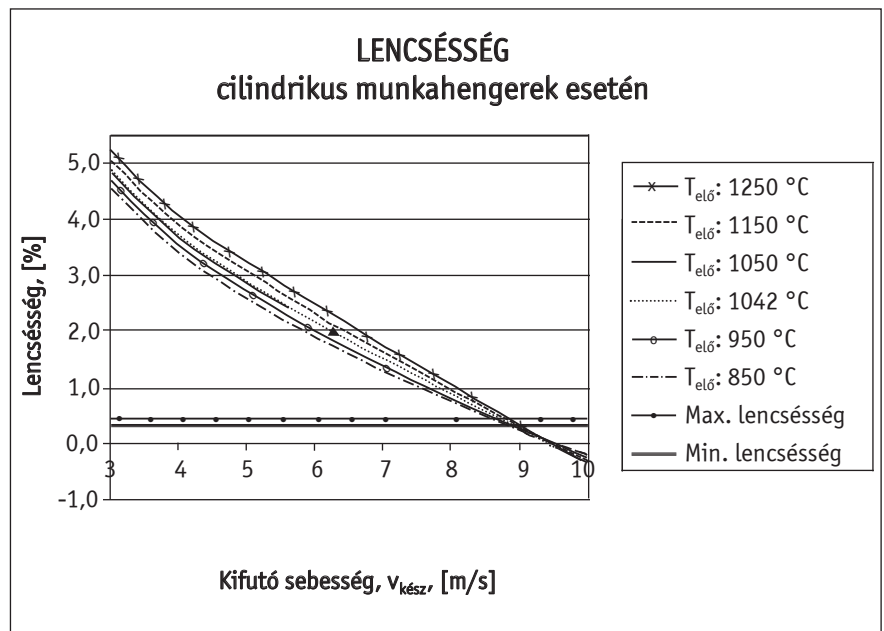
átlagos vastagság közepén:
 $h_{kész}^{közép} = 2,029$ mm;
 átlagos vastagság a szélektől 40 mm-rel beljebb: $h_{kész}^{b/2-40} = 1,993$ mm;
 mért lencséség a szélektől 40 mm-rel beljebb:
 $\delta h^{b/2-40} = h_{kész}^{közép} - h_{kész}^{b/2-40} = 2,029 - 1,993 = 0,036$ mm = + 36 μ m;
 a mért lencséség a szélektől 40 mm-rel beljebb százalékosan:
 $\delta h^{b/2-40} = + 1,81\%$;
 átlagos vastagság szélen:
 $h_{kész}^{b/2} = 1,989$ mm;
 mért lencséség a széleken (extrapolálva):

| Tekercs-szám | Anyag-minőség | Szélesség | Vastagság | MÉRT | | SZÁMÍTOTT | | Eltérés |
|--------------|---------------|-----------|-----------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------|---------|
| | | | | lencséség a (b/2-40) helyen | $\delta h_{mért}^{b/2-40}$ | lencséség a b/2 helyen | $\delta h_{szám}^{b/2}$ | |
| 63357 | ASTM A-36 | 1230 | 2,00 | 35,9 | 40,0 | 35,0 | -2,50 | |

■ 5. ábra. Mért és számított eredmények összehasonlítása

1. táblázat. Lencséség ($\delta h_{szám}$) %-ban, üzemi hengerdomborítás esetén

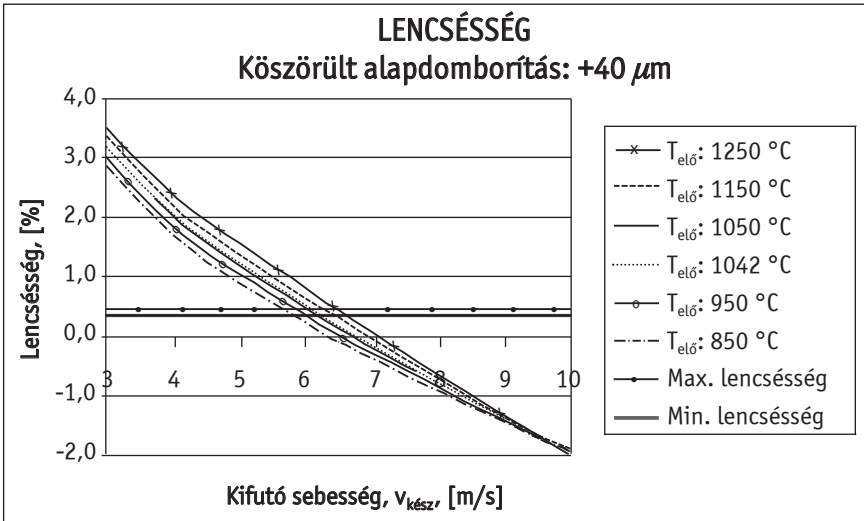
| Előlemez hőm. $T_{elő}$ [°C] | Számított lencséség, $\delta h_{szám}$ %-ban, a teljes b szalagszélességre vonatkozóan A munkahengerek köszörült alapdomborítása: 0 μ m (nincs) | | | | | | | | | |
|------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|-------|--|
| | Kifutó sebesség, $v_{ki,6}$ [m/s] | | | | | | | | | |
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 6,26 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 1250 °C | 4,67 | 3,40 | 2,59 | 1,91 | 1,74 | 1,30 | 0,76 | 0,25 | -0,23 | |
| 1150 °C | 4,71 | 3,64 | 2,73 | 2,02 | 1,85 | 1,39 | 0,81 | 0,27 | -0,25 | |
| 1050 °C | 4,88 | 3,71 | 2,89 | 2,17 | 1,99 | 1,50 | 0,88 | 0,29 | -0,28 | |
| 1042 °C | 4,89 | 3,72 | 2,91 | 2,18 | 2,00 | 1,51 | 0,89 | 0,29 | -0,28 | |
| 950 °C | 5,06 | 3,89 | 3,08 | 2,33 | 2,14 | 1,63 | 0,96 | 0,32 | -0,31 | |
| 850 °C | 5,24 | 4,07 | 3,26 | 2,49 | 2,30 | 1,76 | 1,05 | 0,35 | -0,34 | |



■ 6. ábra. A lencséség változása cilindrikus munkahengerek esetén. Az üzemi munkapontot két háromszög jelöli

2. táblázat. Lencséség ($\delta h_{szám}$) %-ban, +40 μ m pozitív hengerdomborítás esetén

| Előlemez hőm. $T_{elő}$ [°C] | Számított lencséség, $\delta h_{szám}$ %-ban, a teljes b szalagszélességre vonatkozóan. A munkahengerek köszörült alapdomborítása +40 μ m | | | | | | | | | |
|------------------------------|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--|
| | Kifutó sebesség, $v_{ki,6}$ [m/s] | | | | | | | | | |
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 6,26 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 1250 °C | 2,90 | 1,73 | 0,92 | 0,23 | 0,07 | -0,37 | -0,92 | -1,43 | -1,91 | |
| 1150 °C | 3,03 | 1,86 | 1,05 | 0,35 | 0,18 | -0,28 | -0,86 | -1,41 | -1,93 | |
| 1050 °C | 3,20 | 2,04 | 1,22 | 0,49 | 0,32 | -0,17 | -0,79 | -1,38 | -1,95 | |
| 1042 °C | 3,22 | 2,05 | 1,23 | 0,51 | 0,33 | -0,16 | -0,78 | -1,38 | -1,96 | |
| 950 °C | 3,38 | 2,22 | 1,40 | 0,65 | 0,47 | -0,04 | -0,71 | -1,35 | -1,98 | |
| 850 °C | 3,56 | 2,39 | 1,59 | 0,82 | 0,62 | 0,08 | -0,63 | -1,33 | -2,01 | |



■ **7. ábra.** A lencsesség változása +40 μm pozitív domborítású munkahengerek esetén

$$\delta h^{b/2} = h_{\text{kész közép}} - h_{\text{kész b/2}} = 2,029 - 1,989 = 0,040 \text{ mm} = +40,0 \mu\text{m};$$

a mért lencsesség a széleken (extrapolálva) százalékosan:
 $\delta h^{b/2} = +2,01\%$

Ez a lencsesség látszik az 1. táblázatban a keretezett üzemi paraméterek ($v_{ki,6} = 6,26 \text{ m/sec}$ és $T_{elő} = 1042 \text{ °C}$) „metszéspontjában”, keretezéssel kiemelve, és értéke +2,0%, vagyis a mért és a számított értékek jól egyeznek.

A pozitív lencsesség – a felhasználók oldaláról nézve – kedvezőtlenül nagy. Megoldást a köszörült alapdomborítás optimalizálása hozhat. A számítógépi program alkalmas arra is, hogy segítségével az optimális szalagalakot eredményező köszörült alapdomborítás nagyságát tetszőleges hengerléstechnológiai paraméterekhez meghatározzuk. Például a fent vizsgált üzemi technológiában, az ott alkalmazott [$T_{elő} - v_{kész}$] paraméterpárokhoz ($T_{elő} = 1042 \text{ °C}$ és $v_{kész} = 6,26 \text{ m/sec}$ volt) a 6. számú kész hengerállványban a munkahengereket $2y_0 = +40 \mu\text{m}$ (átmérőre vonatkozó) köszörült alapdomborítással kellene beépíteni. Az eredményül kapott köszörült munkahenger-alapdomborításra vonatkozó konkrét számításokat a 2. táblázat tartalmazza és a 7. ábra diagramja szemlélteti.

Az utóbbi táblázat az 1. táblázatnál ismertetett iterációs lépésekkel készült, és az alkalmazott színkódok is megegyeznek az ott ismertettekkel. A nagy „lépések” miatt látszólag csak egyetlen találat (egy fehér alapszínű mező) van a táblázatban. Annak érdekében, hogy a „találatok” látható számát növeljük, azaz számszerűsít-

sük mindazokat a technológiai paraméterpárokat, amelyekhez tartozó $T_{elő}$ előlemez-hőmérséklet és $v_{kész}$ kifutó (kész)sebesség esetén a szalagalak optimális, vagyis a lencsége a kívánt $\delta h = (0,4 \pm 0,05)\%$ os pozitív tartományba esik, a programban a felvett hengerlési sebességet rendre 0,25 m/s-mal, az előlemez hőmérsékletét pedig 50 °C-kal lépteti. A kapott eredményeket a 3. táblázat foglalja össze (a színkód változatlan).

A 6. és a 7. ábrákon a „Max. lencsesség” (0,45%), illetve a „Min. lencsesség” (0,35%) vonala is szerepel. Ezek a vonalak kimetszik azokat az összetartozó technológiai paramétereket [$T_{elő} - v_{kész}$], amelyeket egy-egy köszörült alapdomborítás esetén be kell tartani annak érdekében, hogy a kész szalag alakja optimális legyen, vagyis a középvastagsága $\delta h = (0,4 \pm 0,05)\%$ -kal legyen nagyobb, mint a szalagszél vastagsága. Ezt a feltételt úgy is be lehet tartani, hogy egy választott (tényleges) előlemez hőmérsékletre állítják be a hengerlési sebességet, vagyis a mindenkor megmérhető

3. táblázat. Lencsesség ($\delta h_{\text{szám}}$) %-ban, +40 μm pozitív hengerdomborítás finomabb sebességléptetés esetén

| Előlemez hőm. T_{el} [°C] | A munkahengerek köszörült alapdomborítása: +40 μm | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Kifutó sebesség, $v_{ki,i}$ [m/s] | | | | | | | | | |
| | 5,25 | 5,5 | 5,75 | 6 | 6,25 | 6,5 | 6,75 | 7 | 7,25 | 7,5 |
| 1200 °C | 0,80 | 0,62 | 0,45 | 0,29 | 0,13 | -0,03 | -0,18 | -0,33 | -0,47 | -0,61 |
| 1150 °C | 0,87 | 0,69 | 0,52 | 0,35 | 0,19 | 0,03 | -0,13 | -0,28 | -0,43 | -0,58 |
| 1100 °C | 0,94 | 0,76 | 0,59 | 0,42 | 0,25 | 0,09 | -0,07 | -0,23 | -0,38 | -0,53 |
| 1050 °C | 1,03 | 0,85 | 0,67 | 0,49 | 0,32 | 0,16 | -0,01 | -0,17 | -0,33 | -0,48 |
| 1000 °C | 1,12 | 0,93 | 0,75 | 0,57 | 0,40 | 0,23 | 0,06 | -0,11 | -0,27 | -0,43 |
| 950 °C | 1,21 | 1,02 | 0,84 | 0,66 | 0,48 | 0,30 | 0,13 | -0,04 | -0,21 | -0,38 |
| 900 °C | 1,30 | 1,11 | 0,92 | 0,74 | 0,55 | 0,37 | 0,20 | 0,02 | -0,16 | -0,33 |
| 850 °C | 1,39 | 1,20 | 1,01 | 0,82 | 0,63 | 0,45 | 0,26 | 0,08 | -0,10 | -0,27 |

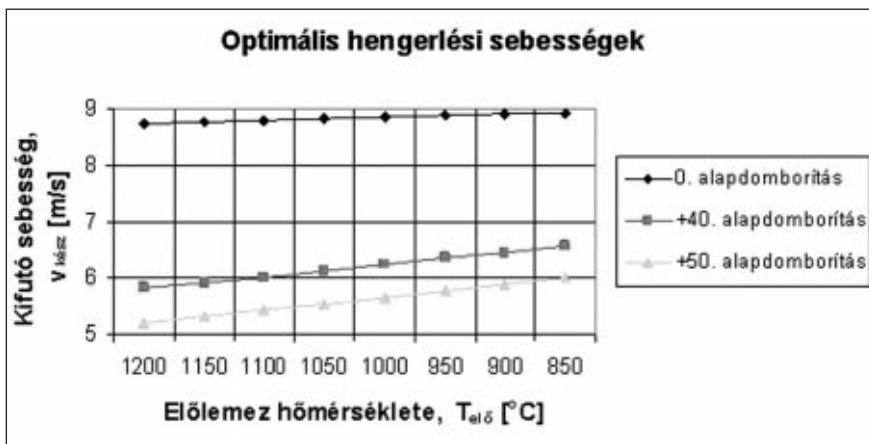
befutó előlemez hőmérsékletének az ismeretében (ez üzem közben mérhető, de már nem változtatható) a megválasztható és gyorsan beállítható sebességszintet kell ismerni és értelemszerűen betartani.

Az eredmények könnyebb kezelhetősége érdekében a program az előlemez hőmérsékletének a függvényében megadja azt a kifutó sebességet, amelyet ha a hengerész beállít, a kilépő szalag várható lencsége optimális lesz: $\delta h_{opt} = (0,4 \pm 0,05)\%$. Az eredményeket a 8. ábra mutatja be. Az ábrán a +50 μm köszörült alapdomborításhoz tartozó számított értékek is szerepelnek. Ez az a „határérték”, ameddig a vizsgált gépészeti berendezéssel és a vizsgált technológiával „el lehet menni”. A készsebességet az ábrán látható 5,5...6,0 m/s értékre célszerű választani, ugyanis az első állványban olyan kicsire adódna a hengerlési sebesség (folytonossági feltétel), amely egyrészt a gépészeti „beépített” minimum alá esne, másrészt a rendkívül kis sebesség a hengertest erőteljes felmelegedése és így intenzívebb hűtése miatt annak tönkremenetelét jelentené.

Összefoglalás

A fent kidolgozott és „letesztelt” (a mért adatokat jól reprodukáló), vagyis megbízhatóan működő számítógépi program lehetőséget ad a meleghengerlési technológia leglényegesebbnek nevezhető jellemzőjének, az alakhűségnek az optimalizálására.

Ez azt jelenti, hogy: a program segítségével kiszámított és összetartozó technológiai paraméterek tényleges beállítása (betartása) azt eredményezi, hogy az alakhűség valamennyi esetben megfelelő lesz, vagyis a hengerek közül kifutó darab tetszőleges mértékben közép-vastag lehet, lencsége kisebb lehet, mint +0,5%.



■ 8. ábra. Az optimális + 0,4 %-os lencssésgyet eredményező technológia paraméterei

Felhasznált irodalom

- [1] Kiss E. – Voith M.: Kohógéptan. Tankönyvkiadó, Budapest, 1974.
 [2] Kiss E. szerk.: Képlékenyalakítás. Egyetemi tankönyv. Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
 [3] Farkas K. – Voith M.: Model for hot-rolled wide strip taking the thermal effect into more precies consideration. 10th Process Technology Conference

- Proceedings. Toronto, 1992. p. 453-459.
 [4] Beagles, A. E. – Hewitt, E. C., – Mizban, S. I.: Szélesabroncs-hengerművek termikus modellezése. BKL Kohászat, 126. évf. (1993), 4- 8. old.
 [5] A DV Meleghengesorán gyártott szélesszalag vastagságtérzéseinek meghatározása. Kutatási jelentés. NME Kohógéptani és Képlékenyalakítástani Tanszék, Miskolc, 1988.
 [6] A DUNAFERR Acélművek Kft. Meleg-

hengesorán a szabályozott hőmérsékletvezetésű hengerrés technológiájának kidolgozása. Kutatási zárójelentés, Miskolci Egyetem Kohógéptan- és Képlékenyalakítástani Tanszék, Miskolc, 1995.

- [7] Braun G.: Az acél szélesszalag meleghengerrési technológia tervezésének újszerű alapelvei. Ph.D. értekezés, Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Miskolc, 2003.
 [8] Oláh Z.: A tām- és munkahenger egységes rendszer eredő rugalmas alakváltozásának elméleti és kísérleti vizsgálata. Egyetemi doktori értekezés. NME Miskolc, 1977.
 [9] Dernei L.: Alumínium meleghengerrés... Doktori értekezés. Miskolci Egyetem, 1992.
 [10] A DUNAFERR Acélművek Kft. Meleghengesorán hengerelt szalag optimális keresztmetszetprofiljának feltételei. Kutatási zárójelentés. ME Anyagtechnológiai Intézet, Kohógéptani és Képlékenyalakítástani Tanszék, Miskolc, 1994.

STEFÁN MÁRIA – DR. TARDY PÁL – ZÁMBÓ JÓZSEF

Az acélpipar helyzete és várható alakulása 2008-ban

A világgazdaság évek óta erőteljesen növekszik, ebben meghatározó szerepe van Kínának. Hasonló a helyzet az acélpiacon: az acélfelhasználás dinamikus növekedésének döntő hányada Kínára esik, és a világ acéltermelésében Kína részaránya már meghaladja az 1/3-ot. A hagyományos ipari országok acéltermelése és -felhasználása ennél sokkal lassabban nő, részarányuk ezért csökken. 2008-ban ez a trend folytatódik. A hazai gazdaság acélfelhasználása 2007-ben erőteljesen nőtt, ezen belül az import növekedése volt a meghatározó. Az egyes termékcsoportok között jelentős különbségek voltak. 2008-ban várhatólag lassul a hazai felhasználás növekedési üteme.

1. Bevezetés

Az acélpipar nemzetközi és nemzeti szervezetei rendszeresen értékelik az acélpiac helyzetét, változásait, rövid és hosszabb távú kilátásait. Az elemzések felhasználhatók a vállalatok termelési, kereskedelmi stratégiájának kialakításában, a hosszabb távú trendek azonosítása pedig segítséget

nyújthat a beruházási és fejlesztési koncepciók kidolgozásához. Nemzetközi szinten a Nemzetközi Vas- és Acél Intézet (IISI), valamint az EUROFER elemzései, előrejelzései a legismertebbek; a jelentős acélpiparral rendelkező országok saját elemzései általában szintén publikusak, és széleskörű érdeklődésre tartanak számot.

Az acélpiacon elemzések abból indulnak

ki, hogy az acélfelhasználás és a gazdaság teljesítménye között határozott összefüggés van; ez az összefüggés azonban korántsem egyértelmű, hiszen a gazdaság különböző szektorainak acélintenzitása (az egységnyi hozzáadott értékhez felhasznált acél mennyisége) jelentősen eltér egymástól. A gazdasági teljesítmény alakulása mellett ezért érdemes figyelembe venni magának az acélfelhasználásnak az időbeli változásait is, ami árnyalja, ill. pontosítja az elemzéseket. A tapasztalat azt mutatja, hogy a nagy, globális értékelések és előrejelzések esetében a gazdaság és az acélpiac helyzete között jobb az összefüggések, mint a kisebb (országos) piacok esetében.

A Magyar Vas- és Acélpipari Egyesülés minden év elején elkészíti és tagjai ren-