

Az MP- és TRIP-acélok interkritikus hőkezelésen alapuló gyártástechnológiája

A dolgozat a „Többes fázisú acélok kifejlesztése” rövid című téma néhány eredményét mutatja be. Ez a téma részét képezte a Nemzeti Kutatás-Fejlesztési Programnak. A szerzők dolgozatukban azt elemzik, hogy már működő folyamatos hőkezelő soron vagy folyamatos tűzihorganyzó soron lehetséges-e az MP- és TRIP-acélok hőkezelése. Az elemzés során az acélok átalakulási folyamataira vonatkozó ismereteken túlmenően elsősorban a számítógépes folyamatmodellezés eredményeire építenek. A folyamatos hőkezelő soron MP- és TRIP-acél egyaránt eredményesen hőkezelhető, míg az izotermás bénítes szakaszt nélkülöző tűzihorganyzó soron csak MP-szalag gyártható.

1. Bevezetés

A többes fázisú acélok (MP-acélok, MP = multi-phase) ma már az acélművek termékínálatának integráns részét képezik. Fő felhasználójuk az autóiipar. A többes fázisú acélokhöz bizonyos mértékig hasonló tulajdonságkombinációjú és alkalmazási területű TRIP-acélok (TRIP = Transformation Induced Plasticity = átalakulás által kiváltott képlékenység) széleskörű elterjedése még várat magára. A hazai vaskohászat termékválasztékának nagy hozzáadott értékű termékcsaláddal való kibővítése érdekében egy NKFP-téma (Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program) keretében [1] vizsgáltuk meg az MP- és TRIP-acélok gyártásának technikai és technológiai feltételrendszerét. Az NKFP-téma feladatainak teljesítésével az MP- és TRIP-acélok közvetlen meleghengerrésszel történő előállításával kapcsolatban elért eredményeinket egy korábbi dolgozatunkban [2] már ismertettük.

Ebben a dolgozatban az interkritikus lágyításon alapuló technológia bevezetésének lehetőségeivel és az eredmények bemutatásával foglalkozunk. Az interkritikus

lágyításon alapuló technológia folyamatos hőkezelő soron vagy folyamatos tűzihorganyzó soron valósítható meg. A megvalósíthatóságot a vizsgált sor egyes részeinek elrendezése, egymásutánisága, ezek méretei, az egyes egységek termikus viszonyai mellett döntően a szalag sebessége határozza meg. Dolgozatunkban ezeknek a tényezőknek a szerepét részletesen elemezzük.

2. A kiinduló anyagok lehetséges változatai

A kérdéses acélok interkritikus hőkezelésen alapuló technológiájának háromféle kiinduló anyaga lehet. Az egyik lehetséges alapanyag a hidegen hengerelt, 0,5–2,5 mm vastag szalag. A megfelelő ferrit/ausztenit arányt biztosító hőmérsékletet szobahőmérsékletre kiindulva érjük el, az interkritikus hőmérsékletre való felhevítésig a szalag újrakristályosodik, majd részben ausztenitesedik. A hidegen hengerelt szalag alapanyagául szolgáló melegen hengerelt szalag mechanikai tulajdonságainak és szövetszerkezetének az előbb említett két folyamatra – és így a végtermék tulajdonságaira is

– jelentős hatása van. A kiindulásként szolgáló melegen hengerelt szalag jellemzőit elsősorban technológiai és technikai sajátosságok szabják meg, nevezetesen az, hogy a melegen hengerelt szalag lehetőleg közbülső lágyítás nélkül a végméretre hidegen kihengerelhető legyen. Ezért általában az MP- és TRIP-acélok alapanyagának meleghengerrésszel lehetőleg lágy, ferrit-perlites szövet elérésére törekednek.

A második lehetséges kiindulási féltermék a melegen hengerelt vékony szalag (1,0–2,5 mm) lehet, ahol értelemszerűen a hidegalakíthatósággal kapcsolatos követelmény nem merül fel.

Harmadik esetnek azt tekinthetjük, ha a kiinduló féltermék ferrit-bénítes, esetleg teljesen bénítes állapotú. Ekkor a részleges ausztenitesedés végére a ferrit-perlites kiindulási szövetű szalagétól eltérő szemcseméretű és esetleg ötvözőfém-eloszlású szövet jön létre. Ez a körülmény a készre hőkezelt lemez tulajdonságaiban is érzékelhető.

3. Az interkritikus lágyításon alapuló technológia kritikus pontjai

A lehetséges kiindulási anyagok áttekintése után vizsgáljuk meg, hogy egy általános célú folyamatos hőkezelő soron (pl. egy Ebner-típusú), valamint egy folyamatos tűzihorganyzó soron (pl. egy Sendzimir-típusú) melyek az interkritikus hőkezelés végrehajtásának kritikus pontjai. A két gyártástechnológia közös jellemzője, hogy a szalag a technológia adott szakaszában fémfürdőn halad át. A két fémfürdő paraméterei eltérőek, ezt mutatják az 1. táblázat adatai.

Verő Balázs, Felde Imre és Takács Márton a BAYATI Fémtani és Szimulációs Osztályának munkatársai. Török Péter és Kopasz László a Dunaferri Fémbevonó- és Feldolgozóüzemben dolgozik, Dobránszky János az MTA-BME Fémtéchnológiai Kutatócsoport kutatója, Szabó Dávid egyetemi hallgató; BME Vegyészmérnöki Kar.

1. táblázat. Az Ebner- és a Sendzimir-típusú sor fémfürdőjének jellemzői

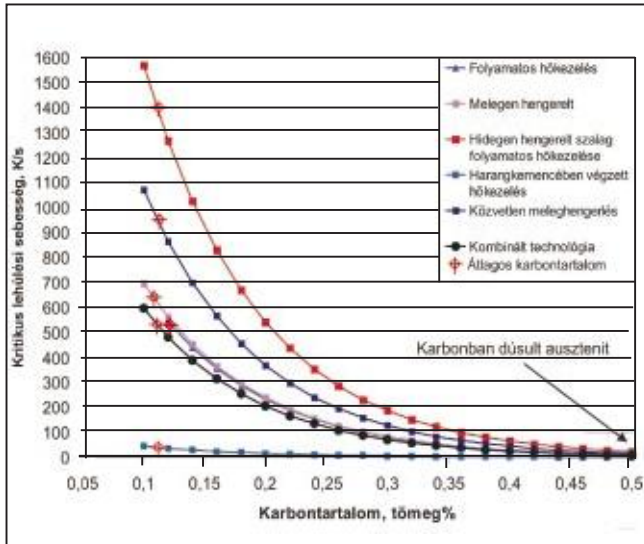
	Fémfürdő összetétele	Áthúzási sebesség	Fémfürdő hőmérséklete	Áthúzási hossz
Ebner-sor	Pb-Bi	0,5 - 5 m/perc	240 - 460 °C	~ 1 m
Sendzimir-sor	Zn-Al	10 - 60 m/perc	450 - 480 °C	~ 12 m

Hőkezelő kemence			Ólomfürdő	Légfúvó
1. zóna	2. zóna	3. zóna		
3,3 m	3,3 m	3,3 m	0,5 m	16,0 m

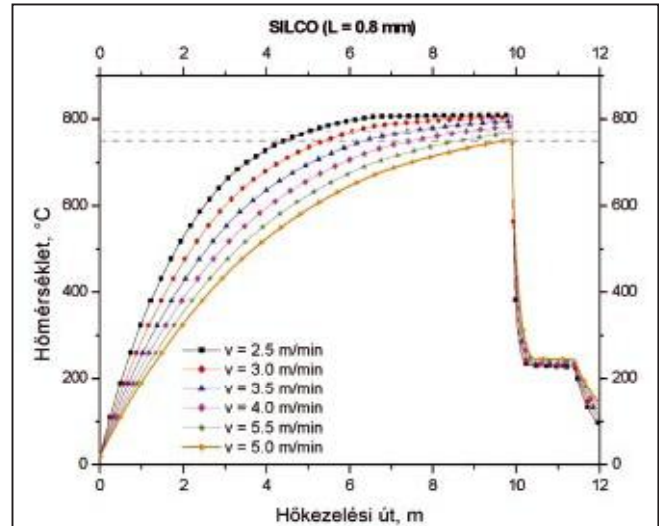
■ 1. ábra. Az Ebner-típusú folyamatos hőkezelő sor elrendezési vázlata

Hőkezelő kemence				Horganyfürdő
Előmelegítő	Leégető	Izzító és hőntartó	Hűtő	
3,7 m	1. zóna 4,5 m	2-6. zóna 17,8 m	7-10. zóna 21,0 m	4,5 m

■ 2. ábra. A Sendzimir-típusú tűzi horganyzó sor elrendezési vázlata



■ 3. ábra. Néhány MP-acél kritikus lehűlési sebessége



■ 4. ábra. A szalag interkritikus hőmérsékletéről való lehűlésének lefutása szimuláció alapján, az Ebner-sorra vonatkozóan

Az MP- és a TRIP-acélok hőkezelésekor egyaránt követelmény, hogy a technológiai folyamat adott pontjában a szövet kellő arányban tartalmazzon ausztenitet. Mivel az ausztenitesedési folyamat lényegesen gyorsabb, mint az ausztenit → ferrit átalakulás [3], technológiai szempontból elfogadható az az állítás, hogy a felhevítés közben keletkező ausztenit térfogathányadát lényegében a szalag maximális hőmérséklete szabja meg.

A hűtési időtartam idejének e tekintetben csak másodlagos szerepe van, nem felelkezhetünk meg azonban a hűtési időtartam során lejátszódó folyamatokról és azok hatásairól sem [3]. Szobahőmérsékletre indulva, az interkritikus lágyításnak megfelelő izotermán a hűtési időtartam függvényében a következő folyamatok követik egymást:

- a felfűtés közben keletkezett ausztenit mennyiségének kis mértékű növekedése,
- az ötvözőelemek megoszlásának módosulása az ausztenit és a ferrit között,
- az alapanyag szövetében jelen lévő karbidok durvulása, majd részleges oldódása,
- a szövetet alkotó ferrit és ausztenit szemcsedurvulása.

A hűtésre használt fémfürdők eltérő jellemzőiből adódó kötöttségek rögzítése után az MP- és TRIP-acélok gyárthatóságát a két eltérő adottságú technológiai soron külön-külön tárgyaljuk.

4. MP-acélok folyamatos hőkezelési technológiájának általános követelményei

Egy szokásos, pl. Ebner-típusú folyamatos hőkezelő sor elrendezési vázlata a 1. ábrán látható. A Pb-Bi fémfürdőben a szalagnak a hőkezelendő acél M_s -hőmérséklete alá kell kerülnie, hiszen a hőkezelés alapvető célja a részlegesen ausztenitesített szalag ausztenitjének martenzitté való átalakítása. A Sendzimir-típusú folyamatos tűzihorganyzó soron (2. ábra) az MP-acélszalag gyártásakor az alábbi

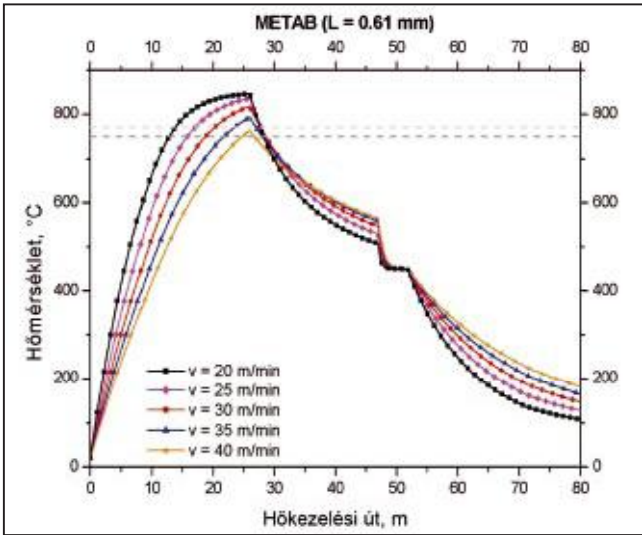
kötöttségeket kell figyelembe vennünk, ha a szalag bevonatának minőségét is biztosítani akarjuk:

- A Zn-Al fürdőbe való belépéskor a szalag hőmérséklete a fürdő 470-480 °C-os hőmérsékleténél csak kevéssel (~10-15 °C) lehet nagyobb.
- A szalagnak a Zn-Al fürdőben le kell hűlnie a fürdő hőmérsékletére.

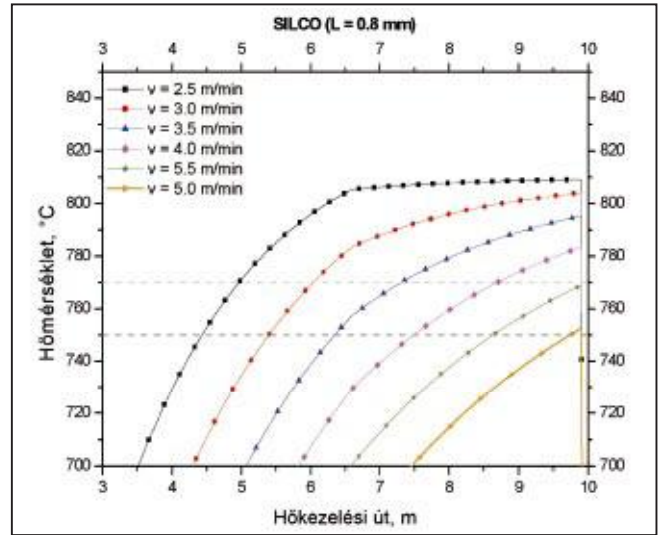
Mivel a szalag sebessége 10 m/perc nagyságrendű, és a szalag a fürdőben ~12 métert tesz meg, a tartózkodási idő 15-60 s hosszúságú. Ez a közel izotermikus szakasz a viszonylag vékony szalagok lehűlési viszonyait alig módosítja, mégis az MP- és főleg a TRIP-acélok Sendzimir-soron való hőkezelésekor kiélezett helyzetekkel találkozunk szemben magunkat.

2. táblázat. Néhány MP-acél számított B_s és M_s hőmérséklete

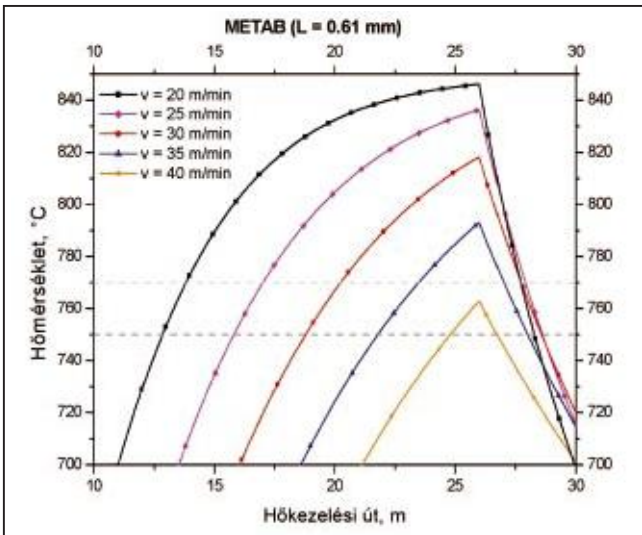
Acél	C	Mn	Si	Al	Cr	Nb	B_s	M_s	B_s'	M_s'
									C-ban dúsult	
MP1	0,07	1,4				0,03	640,1	466,8	604,6	348,4
MP2	0,1	1,5	0,1	1,2	0,5		617,8	445,1	567,0	275,9
MP3	0,12	1,2	0,1		0,8	0,04	622,2	442,1	561,2	239,0
TRIP1	0,15	1,5	0,1	1			625,0	430,0	605,9	366,5
TRIP2	0,2	1,5	1,5			0,04	618,6	408,8	593,2	324,2
TRIP3	0,3	1,5	0,3	1,2			605,9	366,5	567,8	239,6



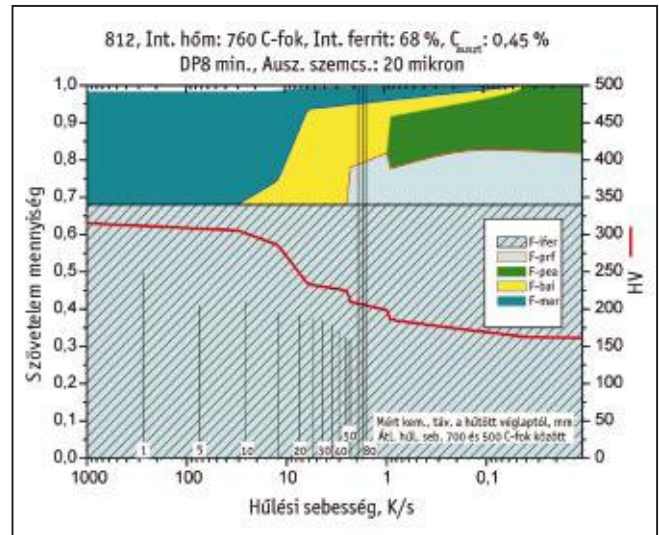
■ 5. ábra. A szalag interkritikus hőmérsékletre való lehűlésének lefutása szimuláció alapján, a Sendzimir-sorra vonatkozóan



■ 6. ábra. Az íztítási szakasz végén kialakuló szalaghőmérsékletre vonatkozó szimulációs eredmények az Ebner-soron



■ 7. ábra. Az íztítási szakasz végén kialakuló szalaghőmérsékletre vonatkozó szimulációs eredmények a Sendzimir-soron



■ 8. ábra. A DP01-jelű acél interkritikus Jominy-vizsgálattal meghatározott átalakulási diagramja

4. táblázat. Az MP-acél Ebner-soron végzett üzemi kísérleteinek technológiai paraméterei

	1. kísérlet	2. kísérlet	3. kísérlet	4. kísérlet
Szalag jellemzői				
Húzásebbesség	3 m/perc	3,5 m/perc	5 m/perc	1 m/perc
Vastagság	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm	2 mm
Szélesség	32 mm	32 mm	32 mm	396 mm
Termikus adatok: hőmérsékletek [°C]				
Hevítés	810	810	810	810
Pb-Bi fürdő	230	230	230	260
A hőkezelt szalag mechanikai jellemzői				
R _m [MPa]	860	805	625	846
R _{p0,2} [MPa]	405	370	288	428
A ₈₀	-	-	-	16
R _{p0,2} / R _m	0,471	0,459	0,461	0,506

A két különböző technológiai sor fémfördőjében, illetve a fémfördőt elhagyó szalag levegőn való lehűlése közben a lehűlési sebességnek meg kell haladnia a kritikus lehűlési sebesség értékét. Néhány MP-acél B_s és M_s, valamint az adott acél összetételének megfelelő, de karbonra nézve kb. ötszörösére feldúsult ausztenit B_s és M_s hőmérsékletét a 2. táblázat

össze foglaljuk. A 3. táblázat pedig a v_{kr} kritikus lehűlési sebesség nagyságát tüntetett fel. Az adatokból kiolvasható, hogy a martenzitképződés kezdési hőmérséklete az acélmínőségétől függően 240-350 °C közötti tartományban van. A martenzites átalakulás befejezési hőmérséklete pedig a tapasztalat szerint mintegy 120 °C-kal kisebb, mint az MS hőmérséklet.

Az elérhető legnagyobb fajlagos kemenceteljesítmény miatt a szalagot olyan sebességgel kell húzni, amely mellett a szalag hőmérséklete a Pb-Bi fürdőben, illetve a horganyfürdő elhagyását követően rövid időn belül eléri az M_s hőmérsékletet. Az interkritikus ausztenitesítés hőmérsékletéről (720-760 °C) való lehűlés

3. táblázat. Az Ebner-soron végzett üzemi kísérletek MP-acéljának kémiai összetétele

Acéltípus	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Nb	Mo	Ni
DP01	0,1	1,39	0,374	0,014	0,003	0,037	0,28	0,042	0,241	0,029

viszonyait matematikai szimulációval tanulmányoztuk, így kaptuk a 4-5. ábrák görbeseregeit. A görbék 0,8 mm, illetve 0,61 mm vastagságú lemezekre vonatkoznak.

A 4. ábra alapján megállapítható, hogy a 720-760 °C-os szalag lehülési sebessége 25 °C/s nagyságú – abban az esetben, ha a szalag ilyen hőmérsékleten lép be a Pb-Bi fürdőbe, és a fémfürdő hőmérséklete 240°C-os –, és a fémfürdőből kilépő szalag hőmérséklete pedig már a fémfürdőből való kilépés előtt eléri a fürdő hőmérsékletét. Ebből az következik, hogy a szalagot 1,0-3,5 m/perc sebességgel lehet húzni, és ez a szalagsebesség benne van a berendezésen beállítható sebességtartományban. Ezek után már csak azt kell megvizsgálni, hogy a folyamatos hőkezelő kemencénél az első, hevítési szakaszban az adott szalagsebesség-tartományon biztosítható-e a részleges ausztenítéshez szükséges hőmérséklet. Az Ebner-sorra vonatkozó termikus szimuláció azt mutatta, hogy az interkritikus hőmérsékletnél mintegy 40 °C-kal nagyobb kemence-hőmérsékletnél a kívánt hőmérséklet biztonságosan elérhető, amint azt a 6. ábra mutatja.

A Sendzimir-típusú horganyzósonon a hevítési szakaszt követő hűtőszakaszban kell a szalagot a 720-760 °C-os hőmérsékletre 470-490 °C-ra lehűteni. Ebben a szakaszban az elérhető hűtési intenzitás viszonylag kicsi, és a beépített hűtés a lágyacélok tűzi horganyzása által megszabott követelményeknek megfelelő, viszonylag lassú, fokozatos hűtést biztosít.

A hűtőszakasz 25 m-es hosszát és a szalag szokásos, 20 m/perc sebességét ala-

6. táblázat. Az MP-acél Ebner-soron végzett üzemi kísérleteinek technológiai paraméterei

I. zóna	II. zóna	III. zóna	Pb-Bi fürdő	Vasaló	Megeresztő kemence	Húzási sebesség
860 °C	850 °C	830 °C	430 °C	440 °C	440 °C	2 m/min

8. táblázat. A TRIP-szalagok Sendzimir-soron történő hőkezelésének technológiai paraméterei

Vastagság	2. zóna	3. zóna	4. zóna	5. zóna	6. zóna	7. zóna	8. zóna	9. zóna	10. zóna	Horganyfürdő	Sebesség
0,61 mm	850 °C	850 °C	840 °C	820 °C	780 °C	520 °C	490 °C	480 °C	470 °C	450 °C	30 m/perc
1,23 mm	850 °C	870 °C	900 °C	900 °C	700 °C	500 °C	480 °C	470 °C	470 °C	450 °C	18 m/perc

5. táblázat. Az MnSiAlP-ötvözésű TRIP-szalag alapanyagának kémiai összetétele

Acéltípus	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr
MnSiAlP	0,203	1,68	0,354	0,112	0,008	0,5	0,038

pul vége a mintegy 300 °C-os hőmérséklet-csökkenésre 20-30 s áll rendelkezésre, vagyis a lehülési sebesség 5-10 °C/s közötti. Említettük már, hogy a Zn-Al fürdőben csak csekély hűlés következik be. A fürdőből ~470-480 °C-on kilépő szalag lényegében levegőn hűl, a nyugvó levegőn való hűlésnél azonban gyorsabban, hiszen egy ún. levegőkéssel a felesleges horganyt eltávolítják, továbbá a szalag relatíve nagy sebességgel szalad. E három, eltérő körülmények között lezajló hűlésnek kell megfelelő sebességűnek lennie, és a szalagnak a fürdőből való kilépéstől számított kb. 15 m-re el kell érnie az M_s hőmérsékletet (5. ábra).

Az Ebner-típusú és a Sendzimir-típusú hőkezelő berendezés telepítési hossza között nincs akkora különbség, mint amennyi a szalagsebességi értékek arányából adódna. Ezért a Sendzimir-soron sokkal kritikusabb a technológiai ablak pontos kijelölése, különös tekintettel a részleges ausztenítéshez szükséges hőmérséklet elérésére, hiszen a Sendzimir-soron nincs hőntartási lehetőség. A hevítési szakasz lehetséges térhőmérsékletének és a szalag sebességének függvényében mutatja a 7. ábra a lemez középvezetési és a lemezvastagság felénél a szalag hőmérsékletét 1 mm vastag szalagra nézve. Látható, hogy a szokásos, 900 °C-os térhőmérséklet esetén max. 30 m/perc húzási sebesség képzelhető el. Mivel ezen a soron nincs lehetőség hőntartásra, a max. 30 m/perc sebességgel haladó szalagnak a 25 m hosszú hűtőszakaszban le kell hűlnie 470-480 °C-ra. Ez a tapasztalat és a számítások szerint el is érhető. Önmagában ez a lehülési sebesség nem bizto-

sítja azt, hogy a karbonban dús ausztenit lehűlés közben ne alakuljon át részben ferrit vagy perlitte, és a horganyfürdőbe való belépés előtt bennit. A részlegesen ausztenitesített MP-acél átalakulási viszonyait speciális Jominy-vizsgálattal, és az erre az esetre kidolgozott matematikai modellel követve megállapítható (8. ábra) [4], hogy legalább 15 °C/s lehülési sebesség kell a végeredmény szempontjából káros, előzetes átalakulási folyamatok elkerüléséhez. Ez pedig csak akkor lehetséges, ha a szalag a hűtőszakaszban 20-30 s alatt szalad végig, ~ 300 °C-os hőmérséklet-csökkenést elszorítva. Egyértelmű tehát, hogy a részleges ausztenítéshez szükséges hőmérséklet elérésének és a megfelelő hűlési sebesség biztosításának követelménye a szalag sebessége tekintetében ellentétes követelményt támaszt.

A részlegesen ausztenitesített MP-acél átalakulási viszonyait speciális Jominy-vizsgálattal, és az erre az esetre kidolgozott matematikai modellel követve megállapítható (8. ábra) [4], hogy legalább 15 °C/s lehülési sebesség kell a végeredmény szempontjából káros, előzetes átalakulási folyamatok elkerüléséhez. Ez pedig csak akkor lehetséges, ha a szalag a hűtőszakaszban 20-30 s alatt szalad végig, ~ 300 °C-os hőmérséklet-csökkenést elszorítva. Egyértelmű tehát, hogy a részleges ausztenítéshez szükséges hőmérséklet elérésének és a megfelelő hűlési sebesség biztosításának követelménye a szalag sebessége tekintetében ellentétes követelményt támaszt.

4.1. MP-acél gyártásának üzemi kísérletei egy Ebner-típusú folyamatos hőkezelő soron

A hőkezelési kísérleteket a 3. táblázat szerinti összetételű, 32 mm, illetve 396 mm széles, 0,8 mm, illetve 2,0 mm vastag keskenyszalagokon hajtottuk végre. A kísérleti gyártás legfontosabb paraméterei a 4. táblázatban olvashatók.

A 0,8 mm vastag, interkritikusan hőkezelt szalag legfontosabb mechanikai

7. táblázat. Az Ebner-soron hőkezelt TRIP-szalag tekercseinek mechanikai jellemzői

Tekercs	$R_{p0,2}$	R_m	A_{80}
	[MPa]	[MPa]	[%]
28670/2E	452,9	743,7	26,6
28671/3E	455	734,4	28
28671/3V	465,8	728,3	27,4
28672/6E	478,5	735,3	28,6
28672/6V	458,6	730,2	26,7

jellemzőit a szalagsebesség függvényében a 9. ábra mutatja. Látható, hogy helyes paraméterek esetén a technológia stabilis, vagyis a legfontosabb paraméternek, a húzási sebességnek a vizsgált tartományban nincs lényeges hatása a mechanikai jellemzőkre. Az MP- (korábban DP-) acél szövetére a 10. ábra szerinti kép a jellemző.

Az acélban rejlő, szinte kiaknázhatalan lehetőségek bizonyítékaként megemlítjük, hogy ugyanebből az összetételű szalagból kötőzópánt szalagot is elő lehetett állítani [5].

4.2. MP-acél gyártásának üzemi kísérletei egy Sendzimir-típusú folyamatos horganyzó soron

A Sendzimir-típusú folyamatos tűzihorganyzó soron ún. "full hard" hidegen hengerelt szalagot hőkezeltünk. A szalag névleges vastagsága 0,6 illetve 1,2 mm volt. A vékonyabb szalagot 30 m/perc sebességgel, míg a vastagabbat 17 m/perc sebességgel húztuk át. A hevítési szakasz végén a kemence térhőmérséklete 850 °C volt, míg a horganyfürdő hőmérséklete 450 °C.

A hőkezelési kísérlet alapvetően eredményesnek bizonyult. Megfelelő tapadású és esztétikai megjelenésű bevonat alakult ki a lemezen. A részletes mechanikai és metallográfiai vizsgálatok a ferrit-perlites szövet kialakulását bizonyították. Bár a Sendzimir-soron nem értük el az Ebner-soron kapott eredményt, de a 0,6–0,65 $R_{p0,2}/R_m$ arány mellett 650–690 MPa szakítószilárdságot mértünk. A tűzihorganyzott MP-szalag a további feldolgozás so-

rán is kedvezően viselkedett, élhajlíthatósága is megfelelt az előírásoknak.

5. TRIP-acélok folyamatos hőkezelési technológiájának általános követelményei

A TRIP-acélok hőkezelései a B_S - B_F hőmérsékletközre való lehűtés sebességét, és ebben a hőmérséklet-tartományban való hűn tartás időszükségletét tartjuk specifikusnak, hiszen a TRIP-acélok interkritikus hőkezelésének döntő mozzanata a részlegesen ausztenitesített szövetű szalag ausztenitjének bénitté való átalakítása úgy, hogy az átalakulás során a bénittúk között kellő mennyiségű maradék ausztenit legyen (lásd 2. táblázat, $B_F \sim M_S$). A karbonra nézve feldúsult ausztenit esetében B_S - B_F hőmérsékletköz a 600–240 °C tartományban helyezkedik el, és dilatométeres méréseink szerint a TRIP-acélok interkritikus izzításakor alkalmazandó 820–850 °C-ról általában ~15 másodperc áll rendelkezésre ahhoz, hogy a bénites átalakulás kezdetére vonatkozó C-görbeág előtt elérjük a kívánt hőmérsékletet. Az elérendő átlagos lehűlési sebesség így 40 °C/s körüli érték.

A TRIP-acélok interkritikus hőkezései a MP-acélokhoz viszonyítva nagyobb ausztenithányadot kell elérni, ennek megfelelően a szalag hőmérséklete az izzító szakasz végén mintegy 80–100 °C-kal nagyobb, mint az MP-acélok esetében. Az 1,2 mm vastag, 820–860 °C hőmérsékletű szalagnak a Pb-Bi fémfürdőben való lehűlését termikus szimulációval követtük. A bénites átalakulás leggyorsabb lezajlását biztosító

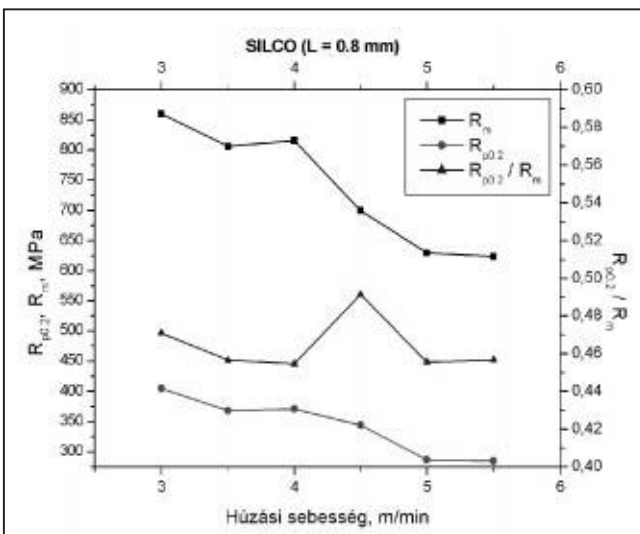
hőmérsékletű fémfürdőt feltételezve, a szalag hőmérsékletének időbeli változását a szalagsebesség függvényében a 11. ábra mutatja. A lehetséges sebességek közül a bénites átalakulás időszükséglete és a kemence izotermás szekciójának hossza alapján kell a megfelelőt kiválasztani.

A 12. ábra az MnSiAlP-ötvezésű szalag bénites átalakulására jellemző diagramrészletét is mutatja, 820 °C-os részleges ausztenitesítés után. A bénites átalakulás időtartama perc nagyságrendű, az adott esetben 9 perc. Az IBS hosszát figyelembe véve, ez a körülmény a kisebb húzási sebesség körüli választást preferálja.

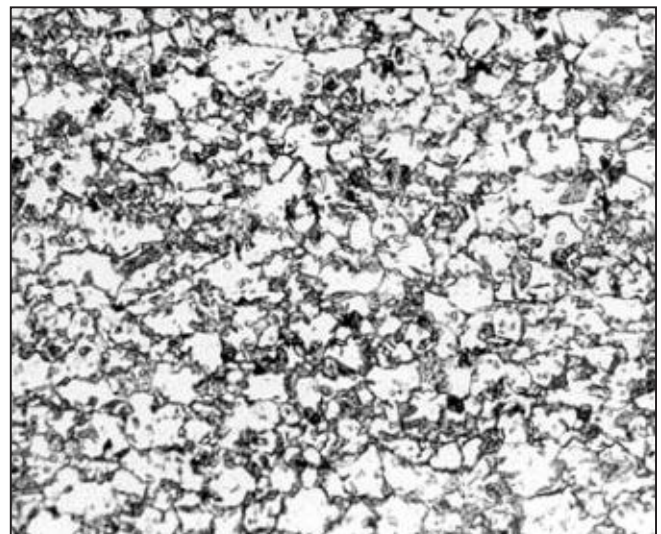
Az MP-acél hőkezelésével kapcsolatban elmondottak szerint a viszonylag kis húzási sebességek esetén a szalag részleges ausztenitesedésére megfelelő idő áll rendelkezésre, ha a hevítési szakasz hőmérsékletét az interkritikus hőmérsékletnél mintegy 20–40 °C-kal nagyobbra választjuk. Hasonló megfontolások alapján a TRIP-acélok interkritikus hőkezései is a kemencetér hőmérsékletét mintegy 20–40 °C-kal nagyobbra választottuk, az elméletihez képest.

5.1. TRIP-acél gyártásának üzemi kísérletei egy Ebner-típusú folyamatos hőkezelő soron

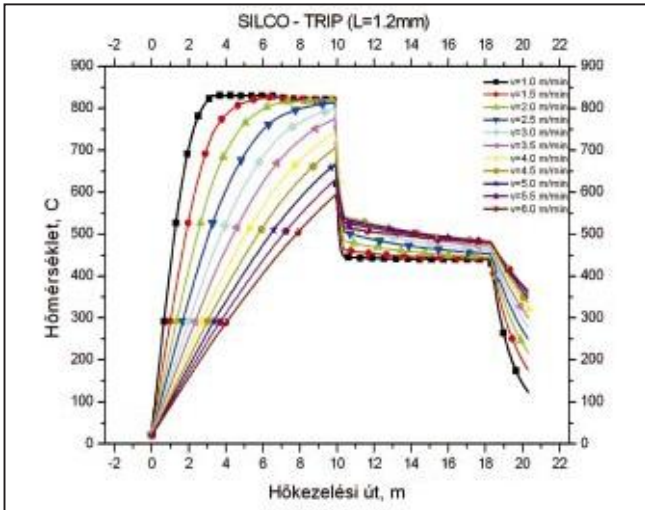
Az Ebner-típusú hőkezelő berendezésen az 5. táblázat adatainak megfelelő összetételű, ferrit-perlit-bénites kiinduló szövetű, melegén hengerelt, 330 mm szélességűre hasított, 3,0 mm vastag szalagból 1,2 mm vastagságúra hidegen hengerelt szalag



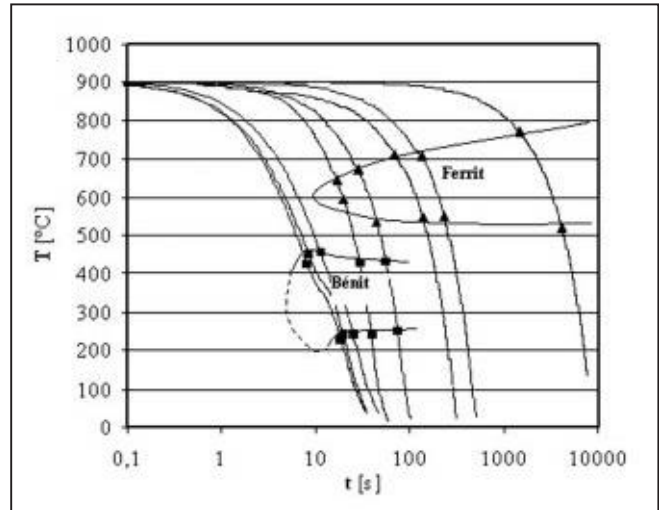
9. ábra. Az Ebner-soron hőkezelt MP-acélszalag mechanikai jellemzői a szalagsebesség függvényében



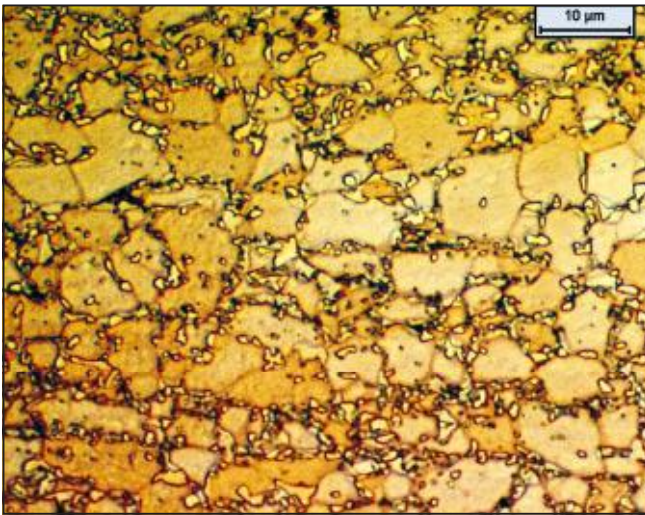
10. ábra. Az Ebner-soron hőkezelt, legkedvezőbb mechanikai tulajdonságú MP-acélszalag jellemző szövete (Eredeti nagyítás: 300x)



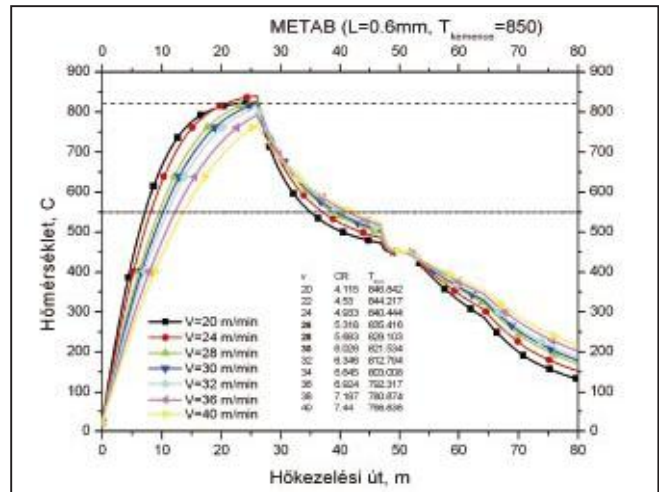
11. ábra. Az Ebner-soron hőkezelt, 1,2 mm vastag TRIP-szalagra vonatkozó termikus szimuláció eredménye



12. ábra. Az MnSiAlP típusú acél részleges ausztenítési állapotára vonatkozó átalakulási diagram jellemző részletei



13. ábra. Az Ebner-soron hőkezelt TRIP-szalag szövete képe



14. ábra. A TRIP-szalag Sendzimir-soron történő hőkezelésének teljes hőmérséklet-ido diagramja számítógépes szimuláció alapján

szolgált. A termikus szimuláció eredményeinek elemzése alapján hajtottuk végre az ipari kísérleteket. A hőkezelési kísérlet legfontosabb paramétereit a 6. táblázat adatai tükrözik, a 7. táblázat tartalmazza a hőkezelt szalag egyes tekeréseinek mechanikai jellemzőit. A folyamat teljes hőciklusát a 11. ábra 2 m/perc sebességre vonatkozó görbéje mutatja. A TRIP 700 minőségnek megfelelő szalag jellemző szövete képe a 13. táblázat tanulmányozható. A szövet 55 tf.-% ferritet, 33 tf.-% bénitet és 12 tf.-% maradék ausztenitet tartalmaz. Ez utóbbi adatot röntgendiffrakciós fázisanalízissel határozták meg [6].

A MnSiAlP-ötvöztetésű TRIP-acél tulajdonságai a hőkezelés egyes paramétereire érzékenyen reagáltak: például a hevítési szakasz hőmérsékletének mintegy 20 °C-os, és ezzel együtt a szalag legnagyobb

hőmérsékletének mintegy 15 °C-os növelésére a hőkezelt szalag $R_m \cdot A_{80}$ szorzatának jelentős, mintegy 30%-os csökkenéséhez vezetett. Ennek oka lényegében a maradék ausztenit mennyiségének erős csökkenésében jelölhető meg.

5.2. TRIP-acél gyártásának üzemi kísérletei egy Sendzimir-típusú folyamatos horganyzó soron

TRIP-acélok tűzhorganyzó soron való hőkezelése szinte önként kínálja magát, hiszen a horganyfürdő hőmérséklete a TRIP-acélok szokásos B_5 - B_f hőmérsékletközébe esik. Ennek ellenére a Sendzimir-típusú sorok csak bizonyos módosítások után lehetnek alkalmasak tűzhorganyzott TRIP-szalagok előállítására. Ennek alapvető oka az, hogy általában nincs olyan szakasza a berendezésnek, amely biztosítaná a

bénites átalakulás kellő mértékű lejátszódásához szükséges feltételeket, vagyis nincs IBS-egységük.

Ha figyelembe vesszük a bénites átalakulás perc nagyságrendű (5-10 perc) időszükségletét és a szalag szokásos, 10-40 m/perc sebességét, akkor legalább 50 m hosszan kellene biztosítani a 450-520 °C-os szalaghőmérsékletet. Ez technikailag megoldható, de jelentős átalakítást igényel. Kérdés továbbá, hogy perc nagyságrendű hűtő tartás után milyen lesz a bevonat minősége. Az előzetes elemzés során feltárt problémák ellenére az 5. táblázatban szereplő TRIP-acéllal üzemi kísérletet hajtottunk végre, melyhez a 3,2 mm vastag melegen hengerelt szalagot közbenső lágyítás nélkül 0,61 mm-re és 1,23 mm-re hengereltük. Az így előállított, hidegen hengerelt tekercseket húztuk át a Sendzimir-típusú

tűzhorganyzó soron. A sor legfontosabb paramétereit a 8. táblázat foglalja össze.

A szalag hőmérsékletének időbeli változását – amely megfeleltethető egyben a horganyzó sor hossza menti hőmérsékletváltozásnak – a 0,60 mm vastag szalagra nézve a 14. táblázat mutatja. A termikus szimulációs görbe világosan mutatja, hogy a TRIP-állapot elérésének feltételei a bénites átalakulás kezdeti szakaszáig biztosíthatók, de a fémfürdőből való kilépés után nincs meg a kellő hosszúságú izoterm szakasz: ezt világosan tükrözik a hőkezelt szalag maradékausztenit-mennyiségére vonatkozó mérési adatai is. A 0,61 mm vastagságú szalagban nem lehetett maradék ausztenitet kimutatni, míg az 1,23 mm vastagságúban ~5% maradék ausztenit volt jelen. Ez a mennyiség a TRIP-hatás érvényesüléséhez szükséges mennyiség alsó határértéke, így nem is volt várható az $R_{p0,2}/R_m$ arány számottevő javulása.

6. Összefoglalás

A többes fázisú és a TRIP-acélok ma már a vaskohászati vállalatok versenyképességének fokozása érdekében a nagy hozzáadott értékű termékek gyártására törekvés kitérő példáját jelentik. Ez a törekvés indokolta annak az NKFP-témának a kezdeményezését, amely az MP- és a TRIP-acélok hazai gyártásának technikai és technológiai feltételrendszerének elemzését tűzte ki feladatul. A „Többes fázisú acélok kifejlesztése” rövid című témának az MP- és TRIP-acéloknak közvetlen megleghengerléssel való előállítását ismertető korábbi cikk után ebben a dolgozatban az MP- és TRIP-acélok másik gyártástechnológiai lehetőségével, az ún. interkritikus hőkezelési technológiával foglalkoztunk. A dolgozatban foglalt eredmények a

következőkben összegezhetők:

- a) MP-acélszalag (később DP-szalag) folyamatos hőkezelt és folyamatos tűzhorganyzó soron egyaránt eredményesen gyártható. A folyamatos hőkezelt soron 2-3 m/perc szalagsebesség, az elméletinél mintegy 20-40 °C-kal nagyobb kemencetér-hőmérséklet és 240 °C közeli fémfürdő-hőmérséklet mellett megfelelő acélösszetétel esetén igen kedvező mechanikai jellemzők adódnak. A tűzhorganyzó soron végzett üzemi kísérletek is sikeresek voltak. A mechanikai jellemzők kielégítették az MP-acélokkal szemben támasztott követelményeket, de a jellemzők kissé kedvezőtlenebbek voltak, mint a folyamatos hőkezelt soron kezeltéké. A tűzhorganyzó soron minősége is megfelelő volt.
- b) Megfelelő hőkezelési paraméterek esetén a folyamatos hőkezelt soron az MnSiAlP-ötvöztetésű acél TRIP-szövetre való hőkezeltése sikeres volt, a hőkezelt szalag megfelelt a szabványos TRIP-700-as minőségnek. A hevítési szakasz térhőmérsékletét a mintegy 50% ausztenit kialakulásához szükséges elméleti hőmérsékletnél mintegy 20-40 °C-szal nagyobbra választva, 450 °C-os fémfürdőt és viszonylag kis szalagsebességet alkalmazva stabil technológiát kaptunk. A TRIP-állapotra való hőkezeltetés alapvető feltétele az ún. IBS (izotermikus, bénites szakasz) megléte, mert csak így biztosítható a bénites átalakulás időszükséglete. A szokásos felépítésű folyamatos tűzhorganyzó sorokon TRIP-szalag gyártása az IBS hiánya miatt nem lehetséges.

A bemutatott eredmények elérésében, pontosabban az üzemi hőkezelt kísérletek megtervezésében meghatározó szerepe volt a számítógépes folyamatmodellezésnek. Megemlíthjük, hogy a folyamatos hőke-

zelt soron már az első üzemi kísérlet teljes sikerrel járt: a hőkezelt szalag megfelelt a TRIP 700-as minőségnek, és a további üzemi kísérletek során sem lehetett kedvezőbb tulajdonságokat elérni. Ez jól mutatja a modellezés költségkímélő és hatékony voltát.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton is köszönetet mondanak az NKTH KPI-nek az NKFP-3A/0063/2002 számú NKFP-téma támogatásáért. Az interkritikus hőkezelt kísérletekben a Dunafer ZRT. állította elő a szükséges anyagokat. Köszönjük az acélmű, a folyamatos öntőmű, a megleghengermű és a hideghengermű munkatársainak segítőkészségét.

Irodalom

- [1] Új generációs, nagy hozzáadott értékű, többes fázisú acélok az életminőség szolgálatában, NKFP-3A/0063/2002
- [2] Horváth A., Sebő S., Verő B.: Többes fázisú és TRIP-acélok gyártása megleghengerléssel. Bányászati és Kohászati Lapok Kohászat, 139 (2006:3) pp.1-8.
- [3] Speich GR: Physical Metallurgy of Dual-Phase Steels, Fundamentals of Dual-Phase Steels. In: Proceedings of a symposium sponsored by the Heat Treatment Committee of The Metallurgical Society of AIME and the ASM/MSD Structures Activity Committee at the 110th AIME Annual Meeting, Chicago, Illinois, February 23-24, 1981, pp. 3-45
- [4] Réger M., Verő B., Csepeli Zs., Finke P.: Intercritical Interrupted Jominy Test. Materials Science Forum, 537-538 (2007) pp.549-554.
- [5] Hirka József személyes közlése
- [6] Miskolci Egyetem Fémtani és Alakítás-technológiai Tanszékének vizsgálati jegyzőkönyve, 2005.

Az acélgártás volt a szenvedélye

Id. Hevesi Imre, okl. kohómérnök (1930). Mivel tanulásra nem volt lehetőség, az Ózdi Kohászati Üzemekben helyezkedett el mint segédmunkás. Módot kapott, hogy munka mellett folytassa tanulmányait a Nehézipari Műszaki Egyetem, Ózdi Vaskohászati Tagozatán. 1954-ben szerzett vas- és acél-



gyártó szakmérnöki oklevelet.

Az ÓKÜ-nél legtovább az Acélműben dolgozott mint kiemelt minőségi acélgártó, majd üzemvezető, diszpécser, főtechnológus és főmérnök. 1979-től 1988. december 31-i nyugdíjazásáig kutatómérnökként és metallurgus szakértőként támogatta az acélgártási

tevékenységet. Beosztásaiban a minőségi technológiák korszerűsítése kiemelt fontossággal szerepelt. Ő volt a kapocs az ÓKÜ, az egyetem és a Vasipari Kutató Intézet között. Eredményes munkáját fémjelzi számos kiténtetése, melyek sorában a legnagobb az Alkotói Nívódíj.

1962-től tagja az OMBKE ózdi szervezetének: közel tíz éven keresztül a metallurgus szekció vezetője volt.