

Nemesíthető acélok alkalmazása és önkeményedésének kihasználása zománcozásra.

Dr. Joachim Schöttler, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH
(Email Mitteilungen, 2009/6)

(Fordította: Dr Való Magdolna)

Bevezetés

A modern könnyűépítészeti acél szerkezeti elemei a maximális súlycsökkentés céljából nagyszilárdságú acélból készülnek. Ez érvényes a gépkocsi iparra, éppen úgy a vegyipari berendezésekre, az erőművek iparára vagy a háztartási eszközök illetve a szaniter árúk gyártására. Általában a nagyszilárdságú acélokat erre az alkalmazási területre termomechanikus hengerléssel (melegen hengerelt acél) vagy megfelelően szabályozott izzítási folyamattal (hidegen hengerelt acél) állítják elő. Ezeket az acélokat nem szabad további hőkezelésnek alávetni, mivel a mechanikai tulajdonságait a termomechanikai kezeléssel elveszítik, de mégis folyamattechnikai okokból szükséges az acélokat a feldolgozás során további hőkezelésnek kitenni, egészen az átalakulási hőmérséklet fölé (mint ahogyan a zománcozásnál is), így ezek az acélok elveszítik eredeti szilárdságukat. Ismételt hőkezelésnél, mint pl. a többszöri zománcbeégetés, a szilárdságvesztés felerősödik.

Ez okból egy innovatív nemesíthető acélt fejlesztettünk ki, kitűnő alakíthatósággal lágy szállítási állapottal, nagy szilárdsággal az ausztenit tartomány relatív lassú lehűtése után, és egyidejűleg jó zománcozhatósággal. Az acél ezáltal kitűnik abban, hogy a zománcozás utáni lehűlésnél nem veszíti el szilárdságát, hanem a keményedés által még nő is a szilárdsága. Számos kísérlet bizonyította, hogy az acél zománcozhatósága igen jó a pácolási veszteség, a zománcokötés és a pikkelyállóság vonatkozásában. Az új nemesíthető acél a redukált lemezvastagságával készülékek, csővezetékek konstrukciójához a zománcozás számára perspektívusnak látszik.

1. A könnyűszerkezet indoklása

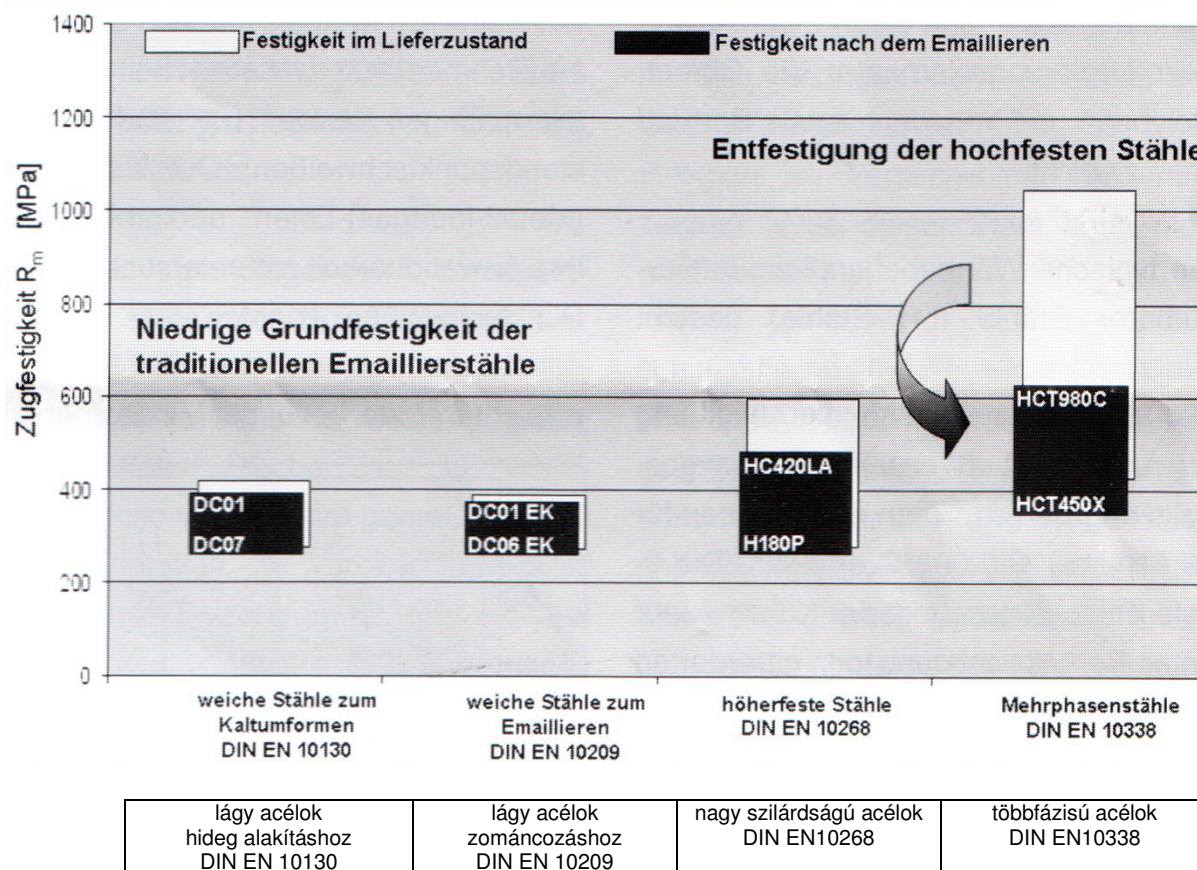
A könnyűszerkezet számára a fő indok a nyersanyag megtakarítás, valamint a termék gyártása során ennek kihasználása. A nagyszilárdságú acélok a hagyományos acélokkal szemben kisebb falvastagságot engednek meg azonos tulajdonságok mellett. Zománcozási célra ebből kifolyólag sok előnye van. Ide számítható a csökkent anyagfelhasználás mellett a jobb energia és költség felhasználás. Pl. hőcserélő csövek és lemezek alkalmazása csökkent vastagsággal, de az egyszerűbb szállítás, a jobb kezelhetőség és szerelés is. Ez okból a nagyszilárdságú acélok alkalmazása a zománcozás területén is előnyös.

2. A hagyományos acél viselkedése az izzításnál egy zománcbeégetéssel egyenértékű

A modern könnyűszerkezeti kivitelezés célja, a maximális súlycsökkentés, feltételezi a nagyszilárdságú acélok alkalmazását. Ezért a nagyszilárdságú acélok alkalmazásánál mindenekeelőtt az acél zománcozás közbeni mechanikai jellemzőinek változására kell tekintettel lenni.

Zománcozás szempontjából a hagyományos, nagyszilárdságú acélok alkalmazása problematikus, mivel a legtöbb ilyen acél tulajdonságait a melegghengerlésnél és/vagy a hideg szalag izzításánál a termomechanikus kezelés állítja be. A 900°C feletti zománcbeégetés ezeknél az acéloknál a szerkezet lágyulásához vezet, ami sokkal erő-

sebben jut kifejezésre, mint a standard hengerelt acéloknál. Az **1. ábra** bemutatja a különböző acélfajták húzószilárdságának összehasonlítását hőkezelés előtt és után, a zománcbeégetésnek megfelelően.



1. ábra

A kiválasztott finomlemez húzószilárdsága szállítási állapotban és hőkezelés után

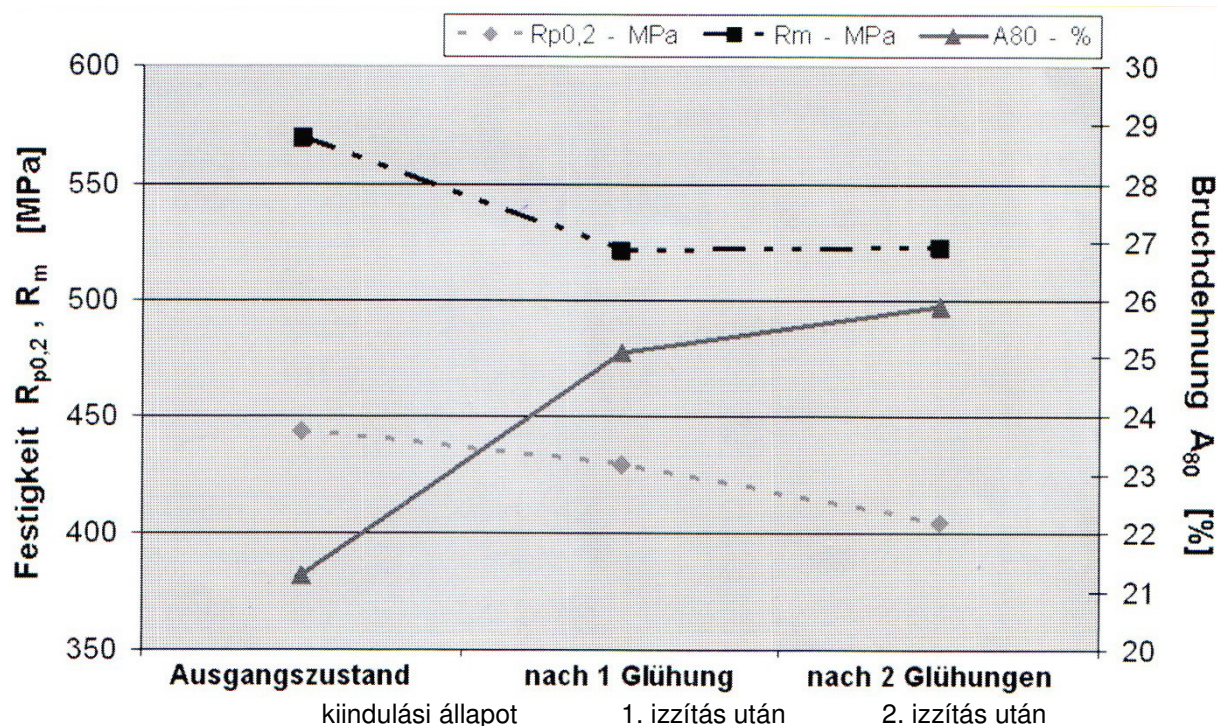
Az ábrán balra van a lágú acélok csoportja a hidegalakításhoz, illetve a zománcozáshoz, ezek a mechanikai jellemzőit tekintve alig különböztethetők meg egymástól. Ezen túlmenően két csoportban van a nagy, illetve még nagyobb szilárdságú acél ismertette, amelyeket hagyományosan nem zománcozáshoz alkalmaznak, de mégis példaképpen bemutatjuk az ilyen acélminőségek jelentős meglágyulását egy utólagos hőkezelés esetén.

Ahogy az **1. ábrán** látszik, a hagyományos acélok hőkezelésnél analóg viselkednek a zománcozással, meglágyulnak. Ez a trend növekvő szilárdsági nívónál egyre világosabb lesz. Többszöri zománcbeégetésnél erősödik ez a trend, úgy hogy az anyag állandóan veszít a szilárdságából. Egy ismételt zománcbeégetésnek a nagy-szilárdságú normálisan hengerelt acélnek a mechanikai jellemzőire való befolyás szimulálásához izzítási próbákat végeztünk az S420N acélminőségű melegen hengerelt, 3,0 mm illetve 8,0 mm vastagságú lemeznél. Ehhez a lemezpróbákat egy 840°C hőmérsékletű kamrás kemencében végeztük, 15 percig tartva ezen a hőmérsékleten, és szobahőmérsékleten hűtöttük le. Végül a lemez mechanikai jellemzőit húzási próbákkal állapítottuk meg. Az eredményeket a 3,0 mm-es próbalemezen a **2. ábra** ismerteti.

Emellett úgy látszik, hogy már az első izzításnál a folyáshatás a 450MPa-ról kb. 420MPa-ra, a második izzításnál tovább, 400 MPa-ra csökken. A 8,0 mm vastag le-

meznél a folyáshatár már az első izzításnál 400 MPa alá kerül. A folyáshatár értéke mellett csökken a húzószilárdság is 540-570 MPa-ról az első izzításnál még csak 500-520 MPa-ra, a második izzításnál 490-510 MPa-ra csökken.

Zománcozáshoz ebből kifolyólag adódik a lemezzel szembeni követelmény, hogy a zománcbeégetés után nagyobb legyen a szilárdsága.



2. ábra

Az ismételt izzítás hatása egy nagyszilárdságú, melegen hengerelt, 3,0 mm vastagságú S420 lemez mechanikai jellemzőjére

3. Levegőn nemesíthető acélok, mint alkalmas alternatíva

Hogy a könnyű szerkezet előnyeit a zománcozás területén is kihasználhassuk, a Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH kifejlesztette a nemesíthető acélokat kiváló alakíthatósággal, lágy szállítási állapotban és nagy szilárdsággal egy relatív lassú lehűtés után az ausztenites tartományból. Ezek az acélok ezáltal azt mutatják, hogy a hőkezelés utáni lehűlésnél (analóg a zománcozással) nem veszíti el a szilárdságát, hanem keményedési hatás által még növeli is a szilárdságát.

Feldolgozhatósága vonatkozásában a levegőn keményedő, nemesíthető acélok kiváló alakíthatósága nagy szerkezeti szilárdsággal kombináltak, emellett a meglévő préspark, az ismert módszerek és a szerszámok használhatók. A mechanikai tulajdonságok beállítása a kész alkatrészen történik. Ezt, mint utána kapcsolt folyamatot hőkezelés formájában végzik. A nagyon jó keménységet és keménységtartást a szén és mangán mellett további ötvözőelemek, mint króm, molibdén és vanádium, valamint bór és titán adagolásával lehet elérni.

A tipikus hőkezelése a levegőn nemesíthető acéloknak (LH[®]-acélok) egy 15 perces ausztenitizálásból áll, 930-950°C-on, ezt követő lehűtésből nyugalomban lévő levegőn vagy védőgázban. Ha szükséges, követheti egy megeresztés 15 percig 450-600°C-on. A végső döntést a konstruktőr hozza az alkatrésztől megkövetelt jellemzők

figyelembe vételével. Az ausztenitizáláshoz az optimális helyzetet a kemencében és a lehűtésnél kísérletekkel kell kialakítani, hogy a vetemedést minimalizálják.

A tipikus mechanikai jellemzői az LH[®]800 néven ajánlott, levegőn nemesített acél-nak, a keményítés előtt és után a következők:

Szállítási állapot:	RpO.2:280 - 400 MPa	Rm: 450 - 570 MPa	A80: 24 – 30 %
Keményítés után:	RpO.2:600 - 750 MPa	Rm: 900 - 1000 MPa	A5: 10 – 16 %

A megeresztésnél redukálódik a húzószilárdság 800-950MPa értékről, összekötve a folyáshatár csökkenésével 650-800 MPa értékre. A szakadó nyúlás A5 tipikus módon 12-17 %-ra növekszik.

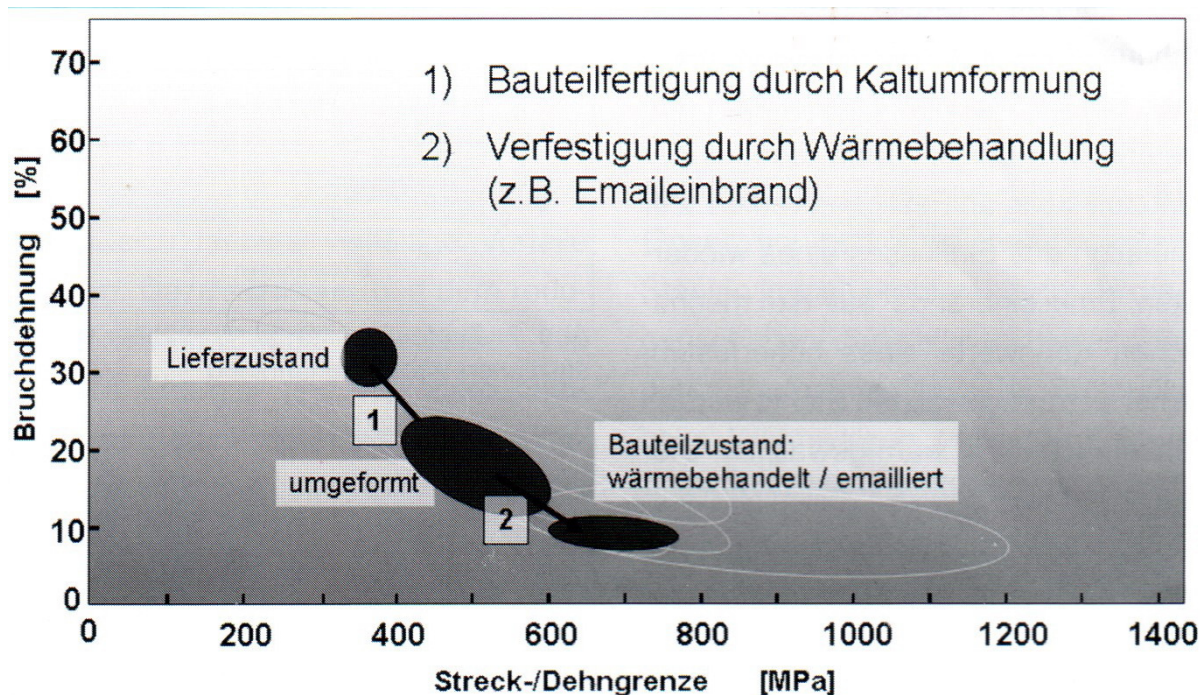
Az LH[®]acélokat jól lehet hegeszteni és felületkezelni. Hegesztésnél adalékanyagok használata és az ezt követő hőkezelés általában felesleges. A többi egyéb acélok a hő hatáskörzetének területén keménységi diszkontinuitást mutatnak, ami a teljes hegesztési varraton redukált szilárdsághoz és nyújthatósághoz vezet. Ezzel szemben a hegesztési varrat az LH[®] acélokon konstans nagy szilárdságot és homogén keménységet mutat. Ez lehetővé teszi az építési elem alkalmazását lengő terheléshez is. Hosszú varratú csövek gyártása HF- és különösen lézersugár hegesztéssel is bevált. További hegesztési kísérletek keretében, többek között az ellenállás ponthegesztést és a MIG (Metall-inertgáz) forrasztást, ezek eredményes alkalmazását megvizsgálták. Ponthegesztésnél egy elektródával 600 pont érhető el, mielőtt a legkisebb pont-átmérőt elérné. A MIG forrasztáson a kvázi sztatikus nyíróvizsgálatok eredményei megfelelnek, összehasonlítva a tűzben horganyzott anyag szilárdságával. A bevonat nélküli LH[®]800 MAG (Metall-Aktivgas) hegesztését megvizsgálták standard TYP SG2 hegesztési adalékkal, valamint nagyszilárdságú X90-IG dróttal, amelynek kiviteli alakja egy horonyvarrat volt az átlapolt illesztésben. A kvázi-sztatikus nyíróvizsgálatok, a lágy és a nemesített állapotban is, igen jó eredményt mutattak.

Az építőelemeket végül, a szokásos bevonatoló eljárással, el lehet látni korrózióvédelemmel. Az elemek katódos korrózióvédelméhez, mint pl. a járműiparban megkövetelt alkalmazásnál, a horganyozás (magas hőmérsékletű horganyozás is) vagy a horganylamella bevonat is lehetséges. Az elemeket KTL bevonattal is (katódikus mártó lakkozás) el lehet látni.

A levegőn nemesített acélok tipikus feldolgozási láncát mutatja be a **3. ábra**.

A levegőn nemesített acélokból készült lemezek lágy szállítási állapotban, mélyhúzással vagy egyéb modern alakítási eljárással, igen bonyolult formákra is kitűnően alakíthatók. Hegesztett csövekként, nagy belső nyomással, közbelső izzítás nélkül alakíthatók, ami további felhasználási területet nyit meg. Ennek a lehetőségnek konzekvens kihasználása megengedte pl. az új Mercedes C osztálynál, az első tengelytartó konstrukciójánál a 14 %-os súlycsökkentést elérését, az előző modell alumínium kivitelével szemben. Az acél felhasználása egyidejűleg 45 %-os költségcsökkentést jelentett.

Az alkatrészgyártás folyamán a hidegalakítás által eltolódik a mechanikai jellemzők helyzete, a hidegszilárdítás következtében a nagyobb szilárdság és a csekélyebb nyújthatóság felé. A befejező hőkezelésnél, az acél felmelegítésével az átalakulási hőmérséklet fölé, és a lehűtésnél a martenzites átalakulás következtében (lemezvas-tagság függvényében) az acél kikeményedik. Ezáltal tovább tolódnak a mechanikai jellemzők a nagyobb nyújthatósági határ és a nagyobb húzószilárdság felé



3.ábra

1.) hidegalakítás; 2.) hőkezeléssel való szilárdítás (pl. zománcozás)

4. Az LH®800E mechanikai jellemzőinek változása zománcozásnál

Az LH®800E acéllal kapcsolatban összegyűjtött ismeretek és a zománcozás számára lejegyzendő potenciál alapján lettek a levegőn nemesített LH® acélok erre az alkalmazási esetre továbbfejlesztve, és megfelelően tesztelve. Ezeknek a teszteknek az eredményét írjuk le a továbbiakban.

Először a hidegen hengerelt 1,5 mm-es LH®800E acélból húzási próbát végeztünk, mindkét oldalát Ferro 2290-es teszt frittrel zománcoltuk, és végül húzási kísérletet végeztünk. Összehasonlításként párhuzamosan megvizsgáltuk a hidegen hengerelt, nagy szilárdságú, mikroötvözött, 2,0 mm-es HC420LA acélt és a melegen hengerelt martenzites HDT1200 acélt ugyanolyan eljárás után. A vizsgálatok eredményeit ábrázolja a **4. ábra**.

Míg az összehasonlított acélok folyáshatár értéke részben csökkent, növekedett a folyáshatár az LH®800E-nél zománcozás után 320 MPa-ról 495 MPa-ra. Ennek az acélnak a húzószilárdsága 500MPa-ról 770 MPa-ra emelkedett. A szakadási nyúlás zománcozás után elérte a 14,2 %-os értéket.

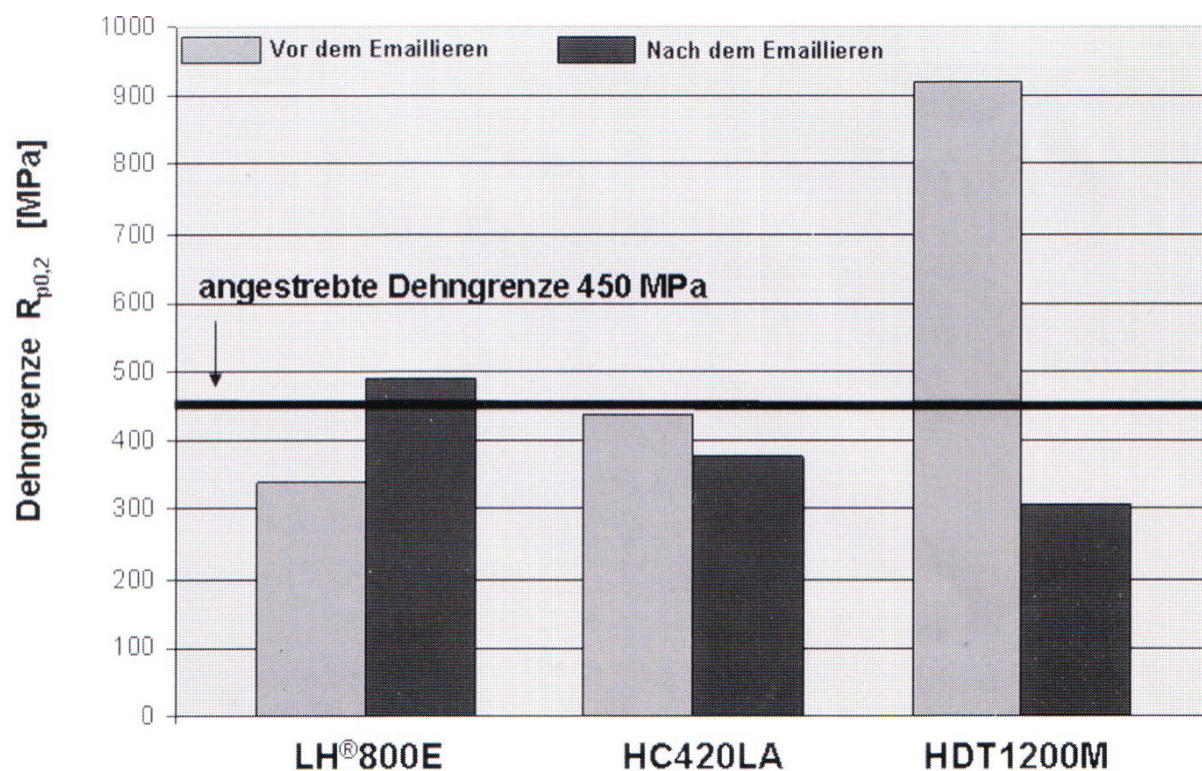
5. A levegőn nemesített LH®800E acél zománcozhatósága

Az acéllemez jó zománcozhatóságának alapvető feltételéhez számít a pácveszteség. Ehhez az 1,5 mm vastagságú LH®800E hidegen hengerelt lemez DIN EN 10209 szabvány szerinti pácveszteségét vizsgáltuk. Összehasonlításként további három nagyszilárdságú acél pácveszteségét vizsgáltuk.

Ezek:

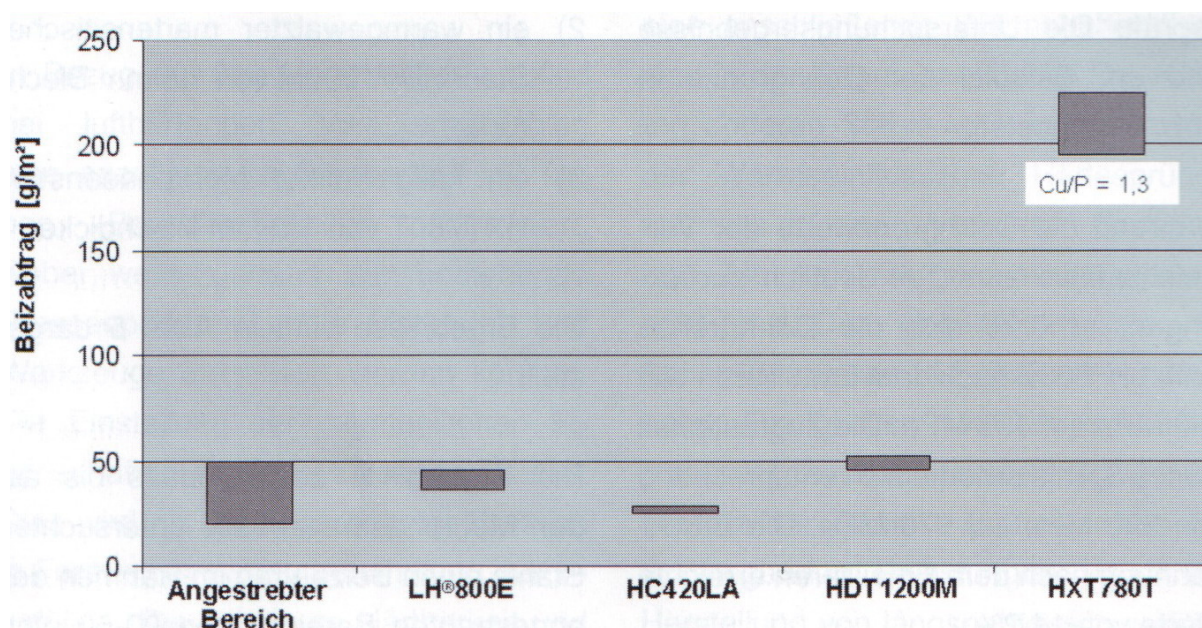
- 1.) hidegen hengerelt, 2,0 mm vastagságú, mikroötvözésű HC420LA nagyszilárdságú acél,
- 2.) melegen hengerelt, 1,5 mm vastagságú, martenzites HDT1200M acél,
- 3.) hidegen hengerelt 1,0 mm vastagságú többfázisú HXT780T acél.

Lásd **5. ábra**



4. ábra

Különböző nagyszilárdságú acélok folyáshatárának változása zománcégetésnél.



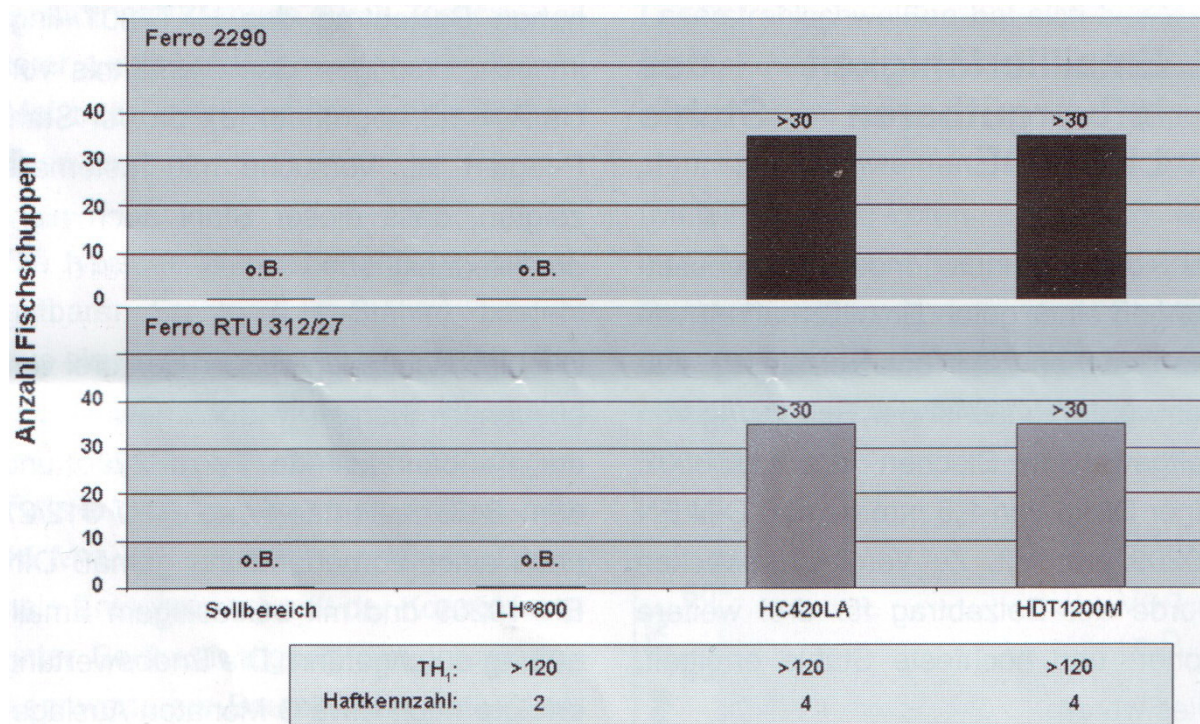
5. ábra

Különböző nagyszilárdságú acélok pácvesztése

Az eredmények azt mutatják, hogy a többfázisú acélig mindegyik vizsgált acél a célul kitűzött 20-50 g/m² pácvesztés tartományon belül van. A HXT780T nagyon magas pácvesztésének oka az igen alacsony C/P = 1,3 arányon alapszik, mivel az acél P ötvöztetésű.

A tesztzománccal végzett próbák bizonyítják, hogy ez az acél nem is zománcozható. A fennmaradt három acél pikkelypróbáit a Ferro 2290 tesztfrittjével és a Ferro RTU 312/27 bojler tesztzománccal, a DIN EN 10209 szerinti előkezeléssel, kétoldali zománcozással végeztük. A végső kiértékelés 3 hónapi tárolás után történt. Párhuzamosan mértük a hidrogén átlépés idejét $TH_1 = 15 \times t_0/d^2$ és a kötés vizsgálatát a DIN EN 10209 szerint.

A teszt eredményeket összefoglalva a **6. ábra** tartalmazza.



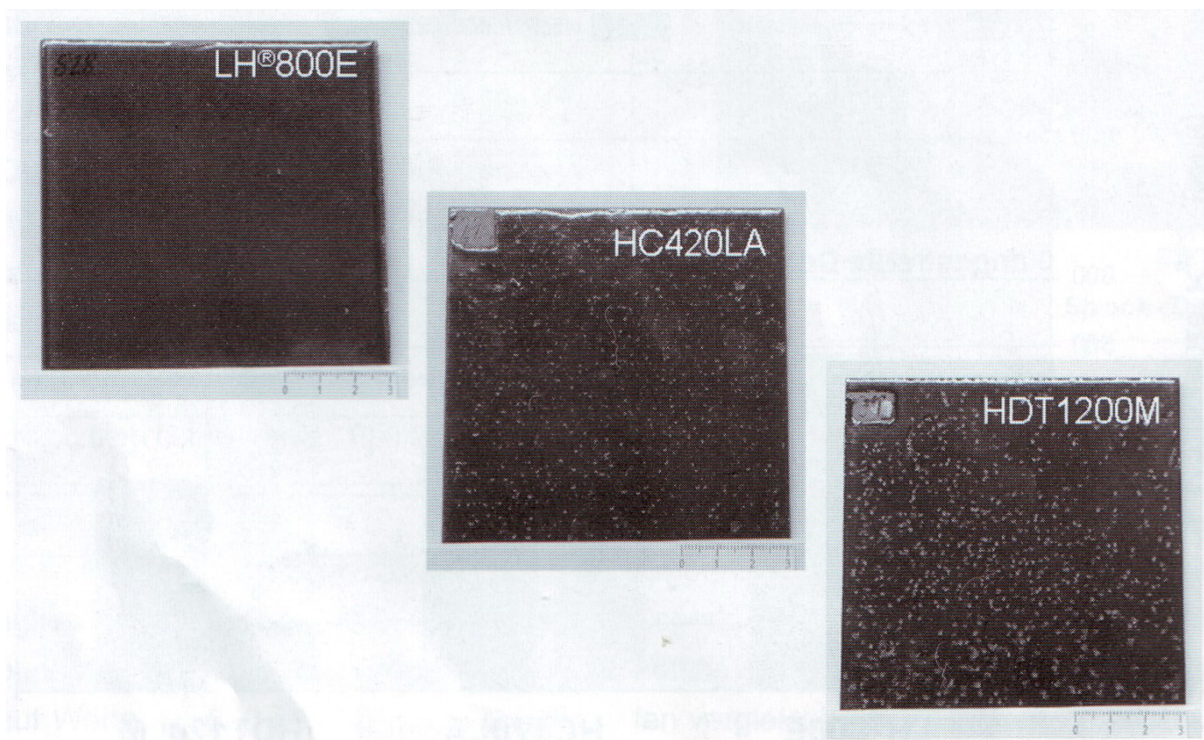
6. ábra

Zománcozhatósági vizsgálatok eredményei a különböző nagyszilárdságú acélokon.

Ennél egyedül a hidegen hengerelt LH®800E mutat kitűnő pikkelyállóságot és jó zománckötést is. Mindkét összehasonlító acél HC420LA (hidegen hengerelt) és HDT1200M (melegen hengerelt) erősen pikkelyes lett (**7. ábra**) és ezen felül sokkal rosszabb zománckötést mutatott.

Az LH®800E igen jó pikkelyállóságának oka az acél mikroszerkezetében a titán- és/vagy vanádiumkarbid-nitridek alakjában kiváló anyagoknak igen nagy hányada. Már bemutattuk, hogy a különböző mikroötvözőelemek adagolása által az acél zománcozhatósága megjavul.

Ezen túlmenően az eredmények azt bizonyítják, hogy a hidrogén átlépési idejének megállapítása a komplex ötvözésű acélok pikkelyállóságának kiértékeléséhez nem kifejező. A hidrogénátlépési idő és a lemez pikkelyképződésre való hajlama közötti összefüggés nem állapítható meg. Minden vizsgált lemezen 120 feletti TH értéket mértünk. A hidrogénátlépés ideje tehát a mikroötvözésű acéloknál nem az egyedüli kritériuma a pikkelyállóságnak, hanem a legjobb esetben egy segédadat.



7. ábra

Különböző nagyszilárdságú acélok pikkelytesztje Ferro 2290 zománccal

6. Az LH®800E alkalmazási lehetőségei.

A levegőn nemesített acélok reményteljes alkalmazási területei a tartályok és silók gyártása a mezőgazdaság számára, vagy hőcserélők és vízmelegítők előállítására. Ezekre az alkalmazási célokra jelenleg többnyire melegen hengerelt acélokat alkalmaznak. Ez okból az LH®800E zománcozhatóságát és a mechanikus jellemzőinek változását a zománcozásnál, két különböző melegszalag állapotban vizsgáltuk – „mint hengerelt” és „mint izzított”. Az acél „hengerelt” állapotában, azaz közvetlenül a meleg hengerlés és tekercsben hűtés után, állt fenn a legkedvezőbb költségű változat, a meleg szalag következő lágyító izzításáról való lemondás. Ez esetben az anyag már edzett állapotban volt. Erre az állapotra jellemző mechanikai adatok ($R_{p0,2}$: 650-950 MPa, R_m : 800-1100 MPa, A_5 : 11-16%) csak nagyon korlátozott körülmények közötti lemezalakítást engednek meg, ami meghatározott alkalmazásra (pl. nagy lemezek hajlítása silógyártáshoz) mégis kielégítő.

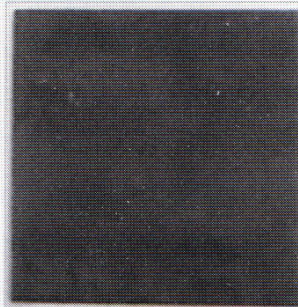
A próbához 3,5 mm vastag „hengerelt” melegszalag, valamint 3,2 mm vastag „izzított” melegszalag állt rendelkezésre. A próbához Ferro G 292 bojler-direktzománcot alkalmaztunk kétoldalú felvitellel. A próbák eredményeit a **8. ábra** foglalja össze.

A zománcozott próbák hosszú tárolási idő (>1 év) után is pikkelymentesek voltak. A pácolási veszteség itt is a kitűzött tartományon belül volt, 46 g/m^2 .

Zománcozásnál az edzett lemezek folyáshatára (370 MPa-ról 410 MPa-ra) és a húzószilárdsága (500 MPa-ról 725 MPa-ra) növekedett, a szakadási nyúlása A_5 elérte a 24%-ot zománcozás után. A nem edzett lemez a zománcozásnál érthetően nagyobb szilárdságú lett a zománcozott alkatrészeknél ($R_{p0,2}$: 610 MPa, R_m : 940 MPa), mint az edzett lemez a zománcozásnál. A szakadási nyúlás A_5 zománcozás után 16,9 % volt. Az időközben végzett üzemi zománcozások azt mutatták, hogy az „izzított” állapotból is még nagyobb szilárdsági értéket lehet elérni, mint a kísérletekben leírtak. A részleteket egy következő közleményben közöljük.

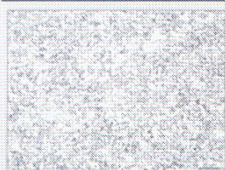
Emaillerversuche

- Beizabtrag 46 g/m²
- keine Fischschuppen mit Boilerdirektemail Ferro G 292



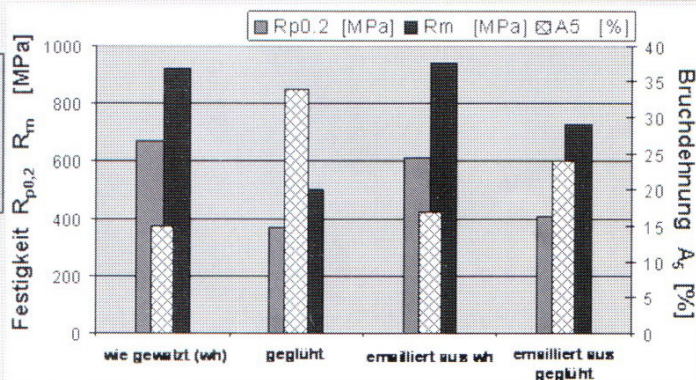
Mechanische Kennwerte

	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]
"wie gewalzt"	665	920	15,0
"geglüht"	370	500	34,0
emailiert aus "wie gewalzt"	610	940	16,9
emailiert aus "geglüht"	410	725	24,0



Bainit + Martensit
Korngröße 11-12

500:1



8. ábra

Az LH[®] 800E melegszalag zománcozhatósága

7. Összefoglalás

A zománcozott acéllemezről készülő könnyűszerkezetek számára kifejlesztettünk egy új nemesített acélt, kiváló alakíthatósággal, lágy szállítási állapottal és az ausztenites tartományból egy relatív lassú lehűtés utáni nagy szilárdsággal, és megvizsgáltuk ennek zománcozhatóságát. Az acél azt mutatta, hogy a zománcozás utáni lehűlésnél nem veszíti el a szilárdságát, hanem keményedési jelenség által éppen szilárdságot nyer. Körültekintő kísérletekkel bizonyítani lehetett, hogy az acélnek igen jó a zománcozhatósága a pácvészteség vonatkozásában, jó a zománc kötése és a pikkelyképződéssel szembeni ellenállása. Az új, időközben szabadalomként bejelentett nemesített acél lehetőséget nyújt zománcozás alkalmazására, redukált lemezvastagsággal a könnyű szerkezetű konstrukciókhoz.