

Folyamatos tűzihorganyozási technológiák

Continuous hot-dip coating technologies

NÉMETH CSABA

minőségügyi vezető, Wuppermann Hungary Kft.

9071 Gönyű, 098/2

E-mail: Csaba.Nemeth@Wuppermann.com, Tel.: 0036 30 368 4414



A tűzihorganyzott acél ipari gyártása 1854-ben indult meg haditengerészeti alkatrészekkel Franciaországban, a jelentős iparosítás azonban 1938-ban indult be, amikor Tadeusz Sendzimir szabadalmaztatta folyamatos tűzihorganyozó gyártósorát. Azóta az ipar „galvanizált” állapotba került abban az értelemben, hogy az új ipari igényeket magasabb minőséggel, alacsonyabb energiafogyasztással és alacsonyabb CO₂-kibocsátással kívánja kielégíteni.

A legtöbb gyártósort alapvetően a megmunkálandó acél típusához igazítva alakítják ki, vagyis a folyamatos tűzihorganyozó sor a lapos acélszalagok gyártási és feldolgozottsági szintjétől függ. Tehát a gyártósor ezért a melegen hengerelt és a hidegen hengerelt lapos acélszalagokra más és más. A hidegen és melegen hengerelt acélszalagok gyártóművei főleg a bemeneti, a kemence előtti tisztító-pácoló és az áthúzó izzítókemencék kialakításban térnek el egymástól. A hidegen hengerelt és melegen hengerelt lapos acéltekerceknél különböző pácolási, passziválási, zsirtalanítási, hevítési és redukciós eljárások szükségesek. Ezért a horganyozó sorok fő típusait az acél kémiai, metallográfiai adottságai, feldolgozottsági szintje, valamint az alkalmazott bevonat típusa határozza meg.

Az 1. táblázat a késztermékek különböző kereskedelmi megnevezéseit, valamint az átlagos technológiai jellemzőket mutatja be, amelyekre a vonatkozó gyártástechnológiát kialakítják. A többkomponensű olvadék egy nanoméretű intermetallidot és általában egy szilárdoldat-bevonatot képez az acél hordozófelületén. A fedőréteg többnyire Zn-Al szilárd oldat, de képezhet további intermetallikus vegyületeket, valamint binér és ternér eutektikus fedőréteget is, a technológiai és az olvadék koncentrációja alapján.

Kijelenthetjük, hogy a technológiának nanoméretű folyamatokat kell közben tartania, hogy biztosítsa a gigaméterű skálán mozgó konzisztens termékkibocsátást.

Ebben a cikkben a fő tűzihorganyozó sorok általános felépítését tárgyaljuk, csak a különböző szekciók funkcióinak általános bemutatására összpontosítva.

Kulcsszavak: folyamatos tűzihorganyozás, hidegen hengerelt laposacélszalag, melegen hengerelt laposacélszalag, intermetallikus vegyület

The industrial production of hot dip galvanized steel started with naval parts in France in 1854, however, significant industrialization started only in 1938 when Tadeusz Sendzimir patented his continuous hot dip coating line. Since then, the industry is “galvanized” in the sense of fulfilling new industrial needs with higher quality products produced with less energy consumption and lower CO₂ emission.

Most production lines are fundamentally designed for the incoming material group, meaning the structure of the continuous hot-dip galvanizing line depends on the production and processing technology of flat steel strips. Manufacturing lines therefore process hot-rolled and cold-rolled flat steel strips. These lines significantly differ from each other in the entry sections together with the cleaning sections in front of the furnace and in the through-pass heating furnaces. Different pickling, passivation, degreasing, heating, and reduction processes are required for cold-rolled and hot-rolled flat steel coils. Therefore, the main types of galvanizing lines are driven by the microstructural givens of the steel and the level of the upstream processing as well as the applied coating type. Table1 shows the different commercial groups of finished products for which the relevant production technology is determined. The composition of melting will develop a multi-strata coating based on a nanostructure of the intermetallic compound in between the substrate steel and the overlay formed in less than a second. The overlay is mostly a solid solution of Zn-Al, yet we can create even an intermetallic compound, binary and ternary eutectic-based overlay as well.

We can say that the hot-dip coating technology controls nano-scale processes so that to ensure a Giga-scale consistent product output. In this article, the structure of the main hot dip galvanizing lines will be discussed focusing only on the general introduction of the function of different machine sections.

Keywords: continuous hot-dip coating, cold rolled flat steel strip, hot-rolled flat steel strip, intermetallic compounds

1. Bevezetés, történelmi áttekintés

Becslések szerint éves szinten több trillió dolláros (a világ összes GDP-jének ~2-3%-a) korróziós kár keletkezik különböző acélszerkezetekben világszerte. Az acélszerkezetek megóvására az utóbbi 200 évben kialakult, de napjainkban is folyamatosan fejlődő, egyik leggazdaságosabb és leginkább környezetkímélőbb technológia a tűzihorganyozás. A világ nyersacéltermelése 2021-ben mintegy 1951 millió t volt (ld. worldsteel.org), ebből becslésem szerint 100 millió t körül mozog nagyságrendileg a horganyozott acél részaránya. Ide vág a világ cinktermeléséről néhány adat is, amely ugyanabban az évben mintegy 12,8 millió t volt, és ennek megközelítőleg felét használják fel acélok horganyozására. Nyilvánvaló, hogy a cink újrahasznosítása %-osan alacsonyabb az acéléhoz képest, viszont nem lebecsülendő, nagyjából a 11%-os szintet fogja elérni 2025-re.

A cink a 24. leggyakoribb elem a földkéregben, csak helyileg koncentráltan, egyes régiókban fordul úgy elő, hogy gazdaságos legyen a kitermelése. Tömmött hexagonális térrácsú (HCP) elektronegativitása a vashoz képest kisebb és standardpotenciálja negatívabb, ezért katódos védelemmel látja el az acél hordozót. A természetben kötött állapotban található meg szfalerit-, wurtzit- és cinkpátércekben. A görögök és a rómaiak mint ötvözt ismerték, és i.e. 300-tól használták. Először Zawarban, Indiában állították elő nagyobb mennyiségben mint fémeket a 12. századtól egészen 1830-ig. Kínában a 16. századtól terjedt el használata. Európába egészen a 17. század elejéig főleg Indiából hozták be a cinket. Európában először Bristolban William Champion 1738-ban retortás kemencében állította elő kalaminnal ($\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Zn}$), míg Andreas Marggraf és Anton von Swab 1746-körül kalaminn és faszén keverékéből ezt a fémeket [1].

Az első tűzihorganyozás Paul-Jacques Malouin nevéhez fűződik, aki 1742-ben cinkfürdőbe mártott egy ónozott lemezt. Az első pácolt acélfelület horganyozására 1802-ben került sor Karl Friedrich Buschendorf javaslatára alapján. A cink előnye az ónnal szemben az, hogy a kisebb felületi karcok esetén is katódos védelemmel látja el az acél hordozófelületet [1].

1800-körül Alessandro Volta kémiai úton egyenáramot állít elő galvánelemmel, és sorba rendezi a fémeket elektromos tulajdonságaik szerint. Acélok modern tűzihorganyozását Humphry Davy és Michael Faraday kutatásait is felhasználva Stanislas Sorel 1837-ben szabadalmaztatta. Sorel használta először a galvanizálást mint kifejezést – Luigi Galvani tiszteletére vezette be erre a technológiai folyamatra. Először így nem elektrokémiai horganyozásra használták a kifejezést, hanem tűzihorganyozásra. Az iparban nagyobb mennyiségben a francia haditengerészet megrendelésére hajószerkezetek galvanizálásával kezdett

terjedni a technológia, mivel 1838 után acélból kezdtek a hadihajókat építeni. Érdekes, hogy Sorel 1840-ben szabadalmaztatta az elektrokémiai galvanizálást is, melyet T. O. Tapp fejlesztett tovább 1936-ban. 1891-ben J. W. Richards professzor szabadalmaztatta az Al- ötvözt a Zn-fürdőbe (Lehigh Egyetem). A laposacélszalagok folyamatos elektrokémiai galvanizálását az 1990-es évekre kiszorította a folyamatos tűzihorganyozás, elsősorban a minőség jelentős javulása miatt. Több szabadalom született az alaptermék javítására már a XIX. századtól pl. Morewood & Rogers gőzgéppel hajtott szerkezete 1843-ból, illetve a bevonatréteg-vastagság szabályozására a légkés szabadalma 1883-ban H. A. Young révén, de igazi technológiai áttörést csak Tadeusz Sendzimir (1894–1989) találmányai hoztak 1938 után [1].

A lemeztáblák egyenkénti tűzi mártóhorganyozási technológiáját váltotta fel a hengerelt laposacélszalagok folyamatos galvanizálásával, ami megteremtette a ma is használatos technológiák alapját. Bevezette a hevítőkemencében a redukáló hidrogén összetevőjű atmoszférát, amivel leegyszerűsítette a horganyozás előtti pácolási folyamatot, eltávolítva számos olyan sóoldat használatát, ami ma környezetvédelmi és balesetvédelmi problémát okozna. A cinkfürdő Al-tartalmát optimalizálta 0,1–0,2 tömeg% környékére, az optimális felületi minőség elérése érdekében. Ugyanakkor 1958-ban elterjedt egy „kemény” gyártási folyamat is N. A. Cook és S. L. Northemann tervei alapján, miszerint a kemence hőfoka nem haladta meg a 250 °C fokot, így a gyártósor termelékenysége a duplájára nőtt, ugyanakkor kiegészült a folyamat a sóoldatos kémiai felületkezelési technológiával. A folyamatban képződő káros gőzök kezelése igen megnehezíti a gyártást, ennek ellenére mind a mai napig használják.

Az autóiipari jóval magasabb minőségi és bevonatrétegvastagság egyenletességi követelményei a légkés fejlesztését (J. T. Mayhew 1960) mozdították elő. A technológiát már az 1920-as évektől a horganyozás utókezelésével is kibővítették, megjelent a „Galvanneal” technológia, melyet elsőként J. I. Herman szabadalmaztattott. Ennek lényege, hogy a horganyozás után közvetlenül egy hőkezelő kemencében lehetőség adódik a felületen kialakult Zn-Fe-Al szilárd oldat szerkezetének átalakítására, akár vastagabb rétegek kialakításával is. A 80-as évektől felleltek a kutatások a már horganyozott felülettel el látott acél hőkezelésére [1].

A horganyozási technológiában a cinkfürdő összetételét az alumínium mellett még jó néhány más komponenssel is megpróbálták módosítani. Ide tartozik a réz, ólom, antimon, magnézium és az ón. Különlegesebb ötvözeteknél használták még a báriumot, stronciumot, szilíciumot és berilliumot is. 1960-as évektől

kezdődően az alumínium koncentrációváltoztatásának hatását az inhibíciós rétegre vonatkozóan részletesen kidolgozták. Borzillo és Horton 1967-ben szabadalmaztatta a magasabb, 25–70% (tömeg%) Al-tartalmú tűzihorganyozott bevonatokat. A legjobban elterjedt 55%-os Al-tartalmú ötvözettel horganyozott termékeket Galvalume-bevonatoknak, míg az 5%-os Al- (H. H. Lee 1978) tartalmúakat Galfan márkanéven hozzák forgalomba. Az utóbbi években a napelemes piac erősödésével megnőtt Mg-mal ötvözött bevonatok használata. Az ún. „ZM”-bevonatokkal, jelentős élettartam-növekedést érnek el, vagy ugyanarra az alkalmazásra már vékonyabb bevonattal is biztosítják a standard „Z”-bevonatokra jellemző korróziós élettartamot. 1983-ban Berke és Townsend szabadalmaztatta a Al-Zn-Mg-Si-tartalmú ötvözeteket horganyozásra [1].

Napjainkra tehát a mártó és a folyamatos tűzihorganyozási technológiák terjedtek el. A folyamatos tűzihorganyozás Sendzimir által megalkotott vázra épül fel, amelyet ma már modulárisan több technológiai lépéssel is ki lehet egészíteni. Két fontosabb gyártósortípus terjedt el: a melegen hengerelt acélszalagra, valamint a hidegen hengerelt acélszalagra. Ezek a modern rendszerek és az egyes technológia modulok felépítése könnyen áttekinthető az egyik legnagyobb gyártó, az SMS Csoport honlapján is: <https://www.sms-group.com/> [6].

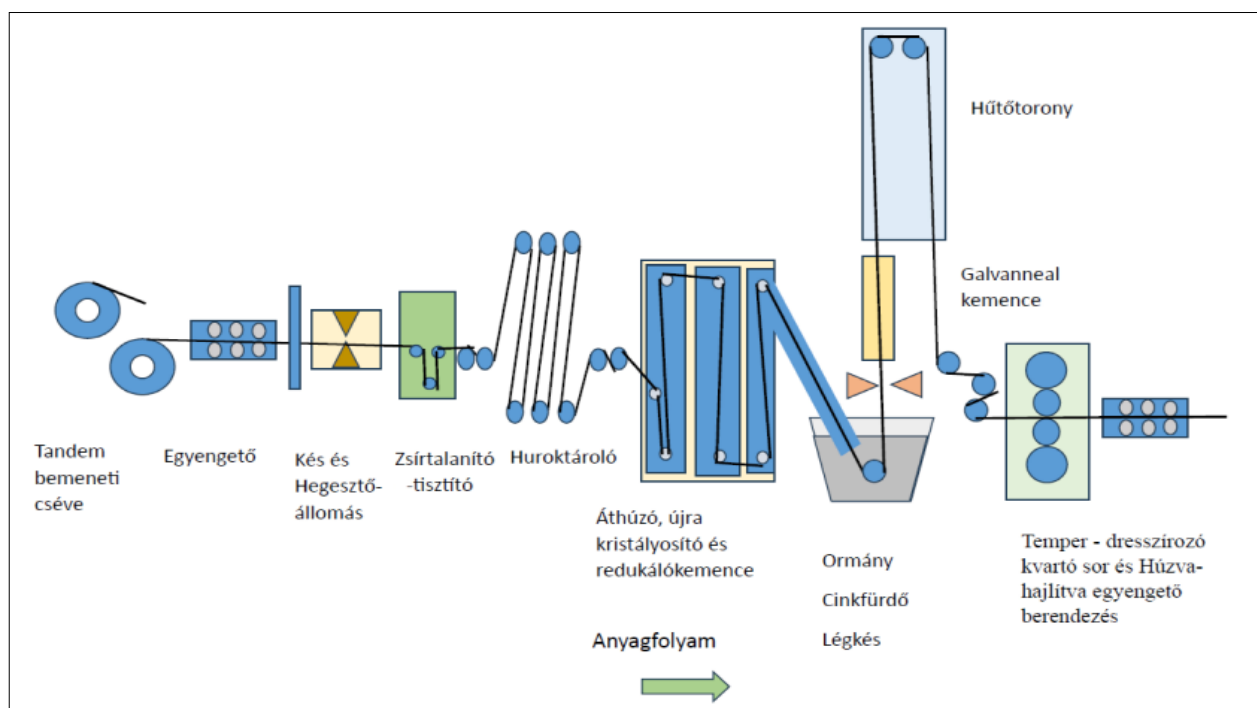
2. Technológiai áttekintés

Acélok tűzi mártóhorganyozása mellett a legjobb felületi minőséget és termelékenységet a folyamatos tűzi-

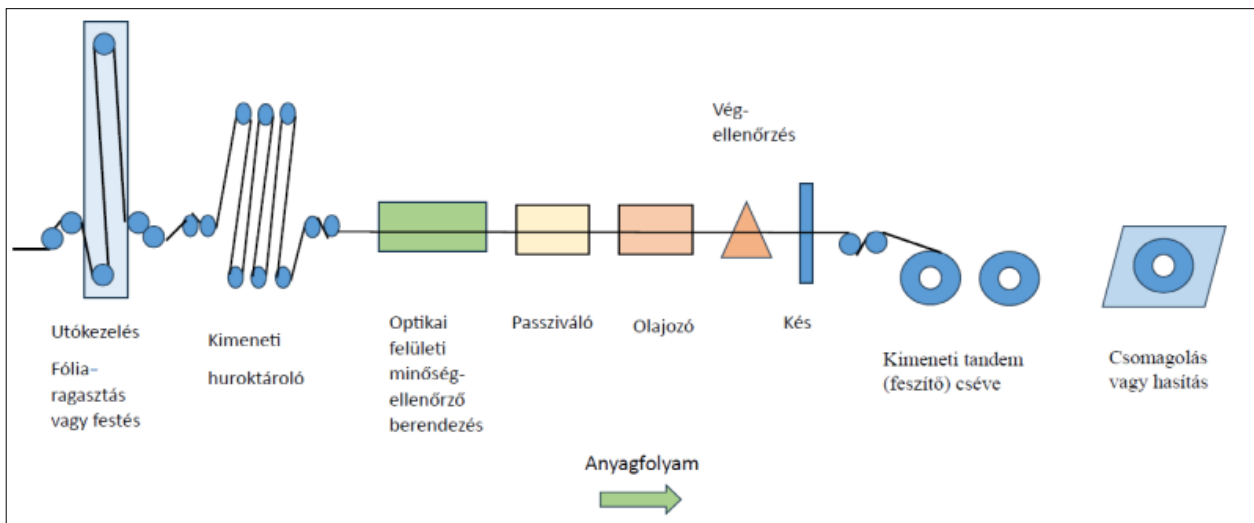
horganyozással lehet elérni. A folyamat kialakítását a vevő előírásai határozzák meg, elsősorban az adott ipari szektor sajátos követelményei miatt. Ugyanakkor egyre több univerzális gyártósort is telepítenek, amelyek többféle alapanyagcsoport megmunkálására is alkalmasak. A legtöbb gyártósort alapvetően a bejövő anyagcsoportra alakítanak ki, vagyis a laposacélszalag gyártási és feldolgozási technológiájától függ a folyamatos tűzihorganyozó sor felépítése. A melegen vagy hidegen hengerelt acélszalagot megmunkáló gyártósorok, a bemeneti szekciókban és az áthúzó hevítőkemencében jelentősen eltérnek egymástól. A hidegen hengerelt és a melegen hengerelt laposacéltekercsre más és más revéltlenítési, pácolási, zsírtalanítási, hevítési és redukálási folyamatot kell használni. A technológia alapvetően egyszerű felépítésű. Az 1. ábrán egy olyan horganyozó sor bemeneti szekcióinak elvi felépítése látható, amely hidegen hengerelt acélszalagot horganyoz. Általában ezeket a sorokat évi 500 ezer t körüli kapacitásra tervezik [6].

A kimeneti szekciók felépítése függ az ipari szektortól, ez nagyon változatos lehet, például a 2. ábrán a hidegen hengerelt acélszalagot folyamatos tűzihorganyozó sor egyszerűsített kimeneti szekciónak ábrája látható. Itt húzva egyengető berendezés után lehetőség van további fólia- vagy festett bevonatok képzésére is. A kimeneti szakasz végén természetesen megtalálhatók az olajozási, passziválási és 100% minőségellenőrzési és csomagolóállomások is (2. ábra).

A laposacélszalagok vastagsága tipikusan 0,15–6 mm-es tartományban mozoghat, míg a szélessége elérheti akár a 2100 mm-t is. A hidegen hengerelt



1. ábra. Folyamatos tűzihorganyozó sor hidegen hengerelt laposacélra, bemeneti szekciók, hevítőkemence és dresszírozó sor



2. ábra. Folyamatos tűzihorganyozó sor hidegen hengerelt laposacélra, kimeneti szekciók: utókezelés – olajozás – vég-ellenőrzés – csomagolás

laposacélszalag vastagsága általában nem haladja meg a 2 mm-t, míg a melegen hengerelt laposacélt használó sorok ennél vastagabb szalagot is gyártanak, egészen 6 mm-es vastagságig [6].

A gyártósorba befűzött, különböző megmunkálási fázisban lévő anyagfolyam teljes hossza meghaladhatja technológiától függően a 3 km-t is. A gyártósor hossza meghaladhatja a 400 m-t, míg a gyártócsarnok belmagassága elérheti a 80 m-t is. Gyakran telepítik ezeket a gyártókapacitásokat nagyolvasztó – konverter – folyamatos brammaöntőde közelébe. Térségünkben is található néhány, a hidegen hengerelt laposacél szalag folyamatos tűzihorganyozására alkalmas gyártómű, jellemzően a teljes acélgyártási technológiai láncolat végén.

A 3. ábrán a galvanizálás szempontjából legfontosabb szekció fő részeit láthatjuk. Az 1. és 2. ábrán bemutatott hidegen hengerelt laposacélt feldolgozó gyártósoroktól egyszerűbb felépítésűek elsősorban a bemeneti szekcióikban különböznek a melegen hengerelt laposacélt feldolgozó soroktól. A hőkezelés és a tisztítási/pácolási szekcióik térnek el jelentősebben.

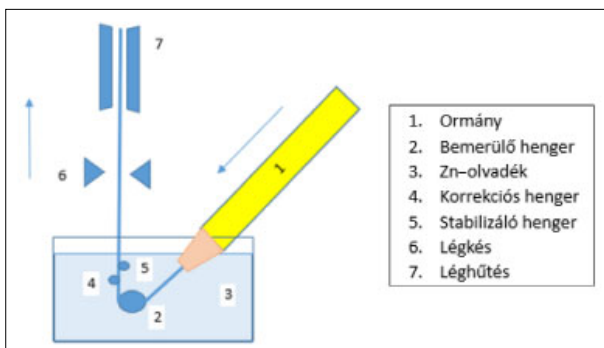
A Wuppermann Csoport befektetésével egy új és korszerű, melegen hengerelt szalagacélból évi

500 000 tonna acél feldolgozására alkalmas horganyozott és pácolt lapos termékeket gyártó sorral bővült hazánkban a folyamatos tűzihorganyozás technológiai palettája 2016-ban Gönyűn. A Wuppermann Hungary a mindkét oldalon cink- vagy cink-magnézium bevonattal ellátott tűzihorganyzott szalagacél mellett, a nagyfokú korrózióvédelemmel, úgynevezett WProtect fóliával ellátott horganyozott laposacélterméket is gyárt. A magyarországi telephelyen 2021 végén nap-elemes erőműrendszert is telepítettek a csarnok tetéjére, amely évente mintegy 775 t CO₂-kibocsátással csökkenti a környezeti terhelést: <https://www.wuppermann.com/hu/locations/wuppermann-hungary-kft/>.

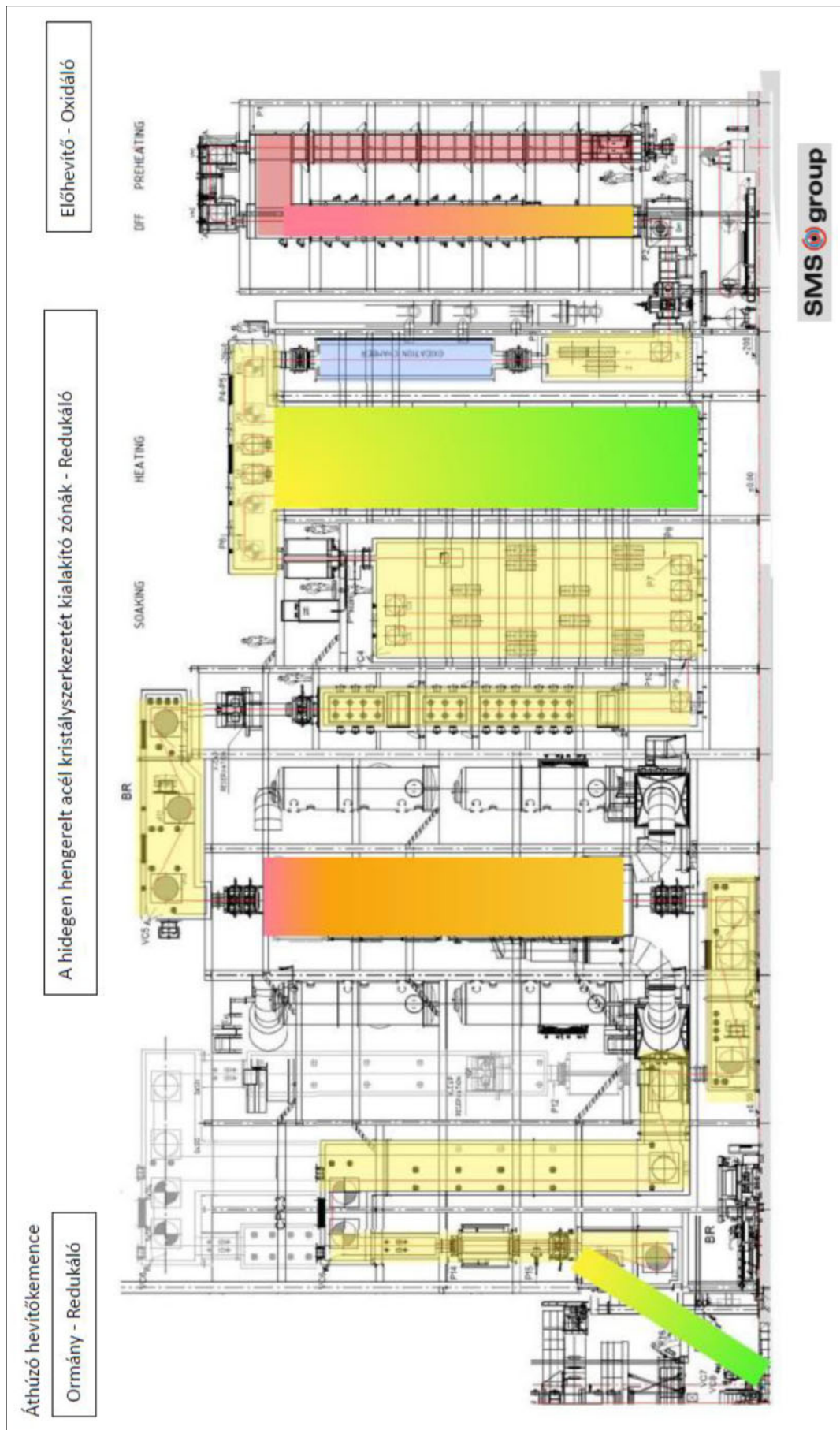
Különleges gyártósorok is készülnek, komplex fázisú, valamint magas szakítószilárdságú acélokra is. Az így kialakított univerzális folyamatos horganyozó-sor alapvetően megegyezik az 1., 2. ábrán bemutatott hidegen hengerelt acélok folyamatos tűzihorganyozására kialakított gyártósorral. Itt a magas minőségi követelményeket az áthúzó hevítőkemence, a hűtőtorony és a kimeneti szekciók járulékos technológiai és folyamatos roncsolásmentes vizsgálatával érik el. Különböző acéltípusokhoz opcionálisan, sínen lehet ki-be mozgatni, illetve feszítőorsó-rendszerekkel befűzni különböző technológiai fázisokat [6].

3. A hidegen hengerelt laposacélszalagot feldolgozó technológia

A folyamat első szekciója 2 db bemeneti tandem elrendezésű csévéből, repülő vagy „indító-lezáró” késből, egy hegesztőállomásból, nedves zsirtalanító-felülettisztító berendezésből áll. A mintegy 100–200 g/m² felületi olajszennyeződés eltávolítása érdekében, előbb lúgos maratással, valamint elektrolitos és mechanikai (kefehengeres) tisztítással készítik elő hőkezelésre az acél felületét. A folyamat végén öblítés



3. ábra. A folyamatos tűzihorganyozó szekció fő részei



4. ábra. SMS intelligens kemencrendsere nagy szilárdságú hidegen hengerelt lemezre

és szárítás következik, valamint egy laposacélszalag huroktároló-(akkumulátor)-rendszer a végtelenített beadagolási folyamat fenntartása, azaz a bemeneten darabolás és a hegesztés érdekében.

A következő lépés a hidegen hengerelt lemez lágyító hőkezelése egy általában 4–16 különböző technológiai szakaszra osztott, megközelítőleg egy 10 emeletes ház méretű kemencerendszerben (4. ábra).

Az elvárt szövetszerkezetet általában újrakristályosítással érik el (850–1200 °C), majd a felület redukálása következik (565–675 °C) [6].

A hőkezelő szekció több műveleti lépésből is felépülhet. Ilyen például a CAL vagy CALP felület-előhevítő zónával ellátott folyamatos hevítőkemence (*Continuous Annealing Line with Pre-treatment*) [2]. A legegyszerűbb kialakítású kemencék is több zónából állnak: hevítő, hõn tartó, megeresztõ-hûtõ és öregítõ szekciók. Attól függõen, hogy milyen acélt dolgoznak fel éppen, a hidegen hengerelt acél bejövõ mechanikai adatai (szakítószilárdság és rugalmassági határ) alapján a rendszer szabályozza a technológiai paramétereket a kívánt metallográfiai és mechanikai tulajdonságok elérése érdekében.

A magas minõségi követelményeknek megfelelõ, nagy szilárdságú hidegen hengerelt acél feldolgozására tervezett áthúzó kemencerendszer akár 16 különbözõ kontrollált atmoszférára felosztott zónából is állhat. Az elõhevítõje lehet direkt égõfejvel ellátott és indukciós is. Fontos az acél felületérõl minden maradékszennyezõdést oxidálni mielõtt a hevítõkemence redukáló atmoszférájába kerül. Ezután a technológus több lépcsõben beállíthatja az acél szövetszerkezetét, a maradék ausztenit-ferrit-martenzit arányát alkalmazva, akár az ultragyors hûtést a hevítõ, lágyító-megeresztõ-öregítõ kemenceszakaszokban.

Folyamatos roncsolásmentes méréssel – az SMS Csoport ún. X-CAP röntgensugaras rendszerével – pedig *in situ* folyamatosan nyomon lehet követni (jelenleg csak a nagy szilárdságú DP, QP) acélok különbözõ fázisait a hőkezelés alatt. A technológiai folyamat ezeknek az adatoknak a birtokában visszacsatolva szabályozza a gyártási paramétereket a kívánt metallográfiai és mechanikai tulajdonságok biztosítása érdekében [6].

A következõ fõ megmunkálási lépcsõ a tûzihorganyozás. Néhány másodperc alatt áthúzzák a hidegen hengerelt laposacélszalagot a cinkfürdõn, majd az olvadékból kilépõ acéllemezen légkessel (gázzal) beállítják a bevonat vastagságát. A mintegy ~200 t cinkolvadék hõmérséklete Zn-Al rendszerekben 460 °C, míg más rendszerekben (pl. Zn-Al-Mg) ettõl természetesen eltérõ.

Ezután két lehetõség van: vagy még további hőkezeléssel (Galvanneal folyamat) szilárd állapotban alakítják át a horgany (szilárd oldat) szerkezetét, vagy

csak egy hûtõtornyban hûtik le azt 100 °C alá, de nem egészen a környezeti hõmérséklet közelébe. Ez utóbbit hívják Galvanize folyamatnak.

Az alkalmazott hõmérsékletek és hõn tartási idõk itt már a hordozó acél szövetszerkezetét nem befolyásolják jelentõsen, csak a felületre tapadt intermetallid rétegben hoznak létre (határfelületi és felületi diffúziók útján) változást, és az ehhez kapcsolódó cink szilárd oldatban végezhetnek további fázisátalakulásokat [1, 6].

A horganyozás után elsõsorban az autõipar számára van lehetõség további gyors és precíz hőkezeléssel ún. Galvanneal termékeket elõállítani, melynél fontos a jó hegeszthetõség, kopásállóság, alakíthatóság és további festékrétegek megtartása. Közvetlenül a cinkkád felett helyezkedik el egy, az áthúzókemencétõl jóval kisebb hevítõ-hõntartó-hûtõ megeresztõ kemence, melynek fõ funkciója a frissen kristályosodott szilárd oldatot intermetalliddá alakítani Fe diffundáltatásával a hordozó acélból. Jellemzõen igen rövid idõ alatt (15–20 s) zajlik le ez az ún. Galvanneal folyamat. Két kemencén áthúzzák az anyagot 460 °C hõmérsékletre, 505 °C-ra hevítik, majd hõntartás (10 s) után a hûtõtorny szekcióin mintegy további 15–20 s alatt már 300 °C alá hûtik [1] (5. ábra).

Itt fontos különbség van a melegben hengerelt alapanyag és a Galvanneal technológiával készült késztermék között. A Galvanneal esetében kifejezetten azt szeretnénk, hogy a teljes bevonat intermetallidokból



5. ábra. Galvanneal lágyító kemence (2 zónás, sínen ki-be mozgatható a horganyozó kád felett)

álljon, míg ez utóbbinál szép Zn-Al vagy Zn-Al-Mg szilárd oldatra van szükségünk, amely egy optimális tapadást és jó nedvesítést biztosít, mintegy 100 nm vastagságú intermetallid rétegre épül fel.

Kilépve a hűtőtoronyból a köztes huroktárolóba kerül az anyag, ahol az tovább hűl. A köztes huroktároló teszi lehetővé a munkahengerek cseréjét a kvartó hideg hengerson.

Az utókezelő szekció nagyon hasonlít mindkét típusú hordozó esetében, mivel először egy kvartó hengerson opcionálisan rendelhető dresszírozás vagy minimális egalizálás (hideghengerlés), majd egy húzva-hajlítva egyengető soron fut át az anyag. A kész lemez vastagságát százmilliméter pontossággal állítható be, és a kész anyag mechanikai (R_m , R_{EH}) tulajdonságait is itt módosíthatják a vevői követelményeknek megfelelően. A húzva-hajlítva egyengetők minimalizálják a lemez hullámosságát, profilalakját, hogy a teljes hossz mentén megfelelő geometriával rendelkező lapos végterméket hozzanak létre. A nagyobb anyagszilárdság iránti piaci igények a horganyozósor, a hordozó acél, a Zn-ötvözet és a technológia folyamatos fejlesztését vonja maga után. Az egyik fejlesztési szempont a nagyobb szilárdságú és magasabb ötvöztartalmú acélok feldolgozása [6].

A készterméken – amíg az a teljes felületével a környezeti levegővel kölcsönhatásba nem kerül – a felületi kémiai átalakulás nem hozza létre a cinkpatinát (cink-karbonát $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$), amely megóvjá a szerkezetet a további korróziótól. Ezt ellensúlyozandó a kémiai passziválás és festés következik az utókezelő toronyban. A cinkpatina kialakulásáig tehát érdemes a kész tekercset korrózió (pl. $Zn(OH)_2$ fehérrozsda) ellen olajjal és/vagy passziválószerezrel is bevonni, ami ideiglenes védelmet biztosít a kész szalagok felületén, amíg a rendeltetési helyükön nem tudnak teljes felülettel a környezeti levegővel kölcsönhatásba lépni.

A kimeneti huroktároló után következik az utolsó fő gépcsoport, amely szélezőből, minőségellenőrző állomásból, majd egy szintén opcionális korrózió elleni vagy mélyhúzó olajozóból, darabolóból és a tandem elrendezésű kimeneti feszítőcsévékből áll.

A csomagolósorokon a pántolás és címkézés után különböző minőségű csomagolóanyagokkal lehet további védelmet biztosítani a vevői előírásoknak megfelelően, amíg a készáru a rendeltetési helyére nem ér.

4. A melegen hengerelt laposacélszalagot feldolgozó technológia

A melegen hengerelt lemeznél szükségünk van egy bemeneti egyengetőre, revetőrőre is a pácoló sor előtt. A melegen hengerelt laposacélszalag már megfelelő szemcsemérettel kerül be a gyártósorra, viszont a külső felületén még vastag reveréteg található, ezért

melegen hengerelt laposacélszalagnál a kémiai szekció pácolókádakból, valamint öblítő-szárító egységekből áll. A hegesztéssel már az egymásba toldott végtelenített acélszalag felületéről kémiai módszerrel, meleg sósavval maratjuk le az oxidokat, vagyis a tercier revét, amely wüstite- (FeO), magnetit- (Fe_3O_4) és hematit- (Fe_2O_3) rétegekből áll. A meleghengermű technológiája optimalizálni tudja ezt a reveréteget, hogy minél könnyebb, gyorsabb és alaposabb lehessen a pácolás. A melegen hengerelt rendszerben a lemez a környezeti levegőn részben visszaoxidálódik a szárítás után, mielőtt az anyag belép az indukciós áthűző hevítő kemencébe, ahol a lemez további redukálás után (direkt égőfejes vagy redukáló atmoszférás N_2-H_2) megérkezik egy ún. ormányon keresztül a cinkkádba. A nem fémes felületre nem tapad az olvadt Zn, ezért különösen fontos az acélszalag pácolása a felület redukálása [6].

A melegen hengerelt laposacélszalag esetében homogén, jól tapadó 20–80 mikron vastag Zn szilárd oldat bevonat létrehozása a cél. A technológiai előkészítés annak van alárendelve, hogy a pácolás és redukálás után a Zn-olvadékkal találkozó acéllemez fémes legyen, azaz oxidmentes, szulfidmentes és foszfidmentes, illetve ezeknek a felületi nem fémes fázisoknak a vastagsága ne haladjon meg az 1 nm-t. Ebben az esetben ugyanis a Zn/acél határfelületen jellemzően egy Fe-Al intermetallid alakul ki (jellemző vastagsága 100 nm körüli vagy valamivel ez alatti nanofázis), amely fémes, ezért a Zn-olvadék jól nedvesíti, és így ezen jól tapad és megszilárdul a horgany.

A horganyozó szekció után az utókezelő szekció a melegen hengerelt acélszalagot feldolgozó technológiában hasonló az autóiipari sorokéhoz, de annál jóval egyszerűbb kialakítású. Mindkét típusú hordozó esetében megtalálható egy kvartó hengerson opcionálisan rendelhető dresszírozás vagy minimális egalizálás, majd egy húzva hajlítva egyengető soron (*tension leveller*) fut át az anyag a kimeneti szekcióhoz.

Amint láttuk, az autóiipari (járműipari) hidegen hengerelt laposacélszalagra dolgozó gépsorok felépítése bonyolultabb, több gyártási technológiai lépést fognak át a melegen hengerelt laposacél szalagokéhoz képest, ugyanakkor a modern folyamatos tűzihorganyozás alapvetően Sendzimir által felvázolt áthűző-redukáló kemencés kialakításával a mai napig meghatározza a tűzihorganyozó technológia alapját.

A gyártósorok fejlesztői rugalmasan, az ipari szektor igényeinek megfelelően tervezik meg a gyártósorokat, hogy az alkalmas legyen a különböző acéltípusok folyamatos horganyozására is. A legutolsó technológiai fejlesztéseknél 150 °C/másodperc/anyag-mm gázhűtési sebességgel, illetve 1000 °C/másodperc/anyag-mm vízpermetes hűtési sebességgel képes a

nagy szilárdságú, akár 1550 MPa szakítószilárdságú anyagokat is megmunkálni.

5. Összefoglalás

Ahogy a bevezetésben részleteztük, egy adott gyártómű kiválasztása elsősorban az alapanyagtól és másodsorban az olvadék típusától függ. Igaz, a mai modern galvanizáló sorokat immár több évtizedes fejlesztéssel egy adott ipari szektorra jellemző termékcsoportok minőségi követelményeinek megfelelően alakították ki.

A tűzi horganyozott laposacél késztermékcsoportok az ipari szektor szerint is megkülönböztethetők, úgymint autóipar, építőipar, bútór- és háztartási-gépipar. Léteznek nagyobb mennyiségben gyártott speciális alkalmazásra. pl. műanyag filmmel bevont extrém korrózióálló termékek is. Gyakori a galvanizált felületek további több rétegű festése is.

Mint láttuk, a hidegen hengerelt acélszalag technológiai felépítése jelentősen eltér a melegen hengerelt acélszalagétól. Ezek a gyártósorok jóval nagyobb befektetést igényelnek.

Ahhoz, hogy megfelelő minőségű tűzihorganyozott laposacél terméket állítsunk elő, a gyártási technológiát optimalizálni kell, elsősorban a hordozó laposacélszalag kémiai összetételének és feldolgozottsági fokának (hidegen vagy melegen hengerelt), valamint az olvadék összetételének megfelelően.

A technológia beállítása és megfelelő felügyelete alapvetően nanorendszerek egyensúlyi és kinetikai viszonyainak tanulmányozásán keresztül érhető el [3–5]. A rendszer független állapothatározóinak száma igen magas, ezért az alkalmas munkapont beállítása nem könnyű feladat, főleg a magasabban ötvözött többfázisú laposacélcsoport terén.

Szakértők és laboratóriumi kapacitások bevonása mellett hangsúlyt kell fektetni a gépcsoportokat folyamatosan fejlesztő OEM-ek (eredeti készülégyártók) technológiai fejlesztéseinek nyomon követésére is. Alapvetően meghatározó a hazai nehézipari ágazatok és képességek folyamatos fejlesztése, mivel az egyéb feldolgozó iparágak minél magasabb színvonalú kiszolgáltatásának képessége révén jelentősen kihatnak a gazdaság további fejlődésének előmozdítására.

IRODALOM

- [1] Marder: The Metallurgy of Zinc Coated Steels, Elsevier, 2023
- [2] Gulyás József, Horváth Ákos, Illés Péter, Farkas Péter: Acélok Hengerlése. Miskolci Egyetem, 2013
- [3] Kaptay György: Anyagegyensúlyok/ Makro-, mikro és nanoméretű rendszerekben. Miskolc 2011
- [4] Gácsi Zoltán, Mertinger Valéria: Fémtan. Műszaki Könyvkiadó, 2000
- [5] Zorkóczy Béla: Metallográfia és anyagvizsgálat. Tankönyvkiadó, 1996
- [6] SMS: <https://www.sms-group.com/>

MELLÉKLET

1. táblázat. Tipikus folyamatos tűzi horganyozási termékek kereskedelmi jelölése és jellemzői
Table 1. Typical Continuously hot-dip coated steel strip commercial designations and its main attributes

Termék jelölése és megnevezése*		Változat g/m ²	Bevonatvastagság összesen (mindkét oldal összege)**		Olvadék összetétele	Bevonat összetétele
			μm			
Z GI	Galvanized Galvanizált		60–275	9–40	Zn + 0,2% Al	Zn + max. 0,2% Al
ZF GA	Galvannealed		60–140	9–40	Zn + 0,1% Al	Zn + max. 0,13% Fe + 0,4% Al
ZA	Galfan		95–300	14–46	Zn + 5% Al, Ce, La	Zn + 5% Al
AZ	Galvalume		100–185	26–50	55% Al + 43,5% Zn + 1,5 Si	Olvadék összetétele + Fe
AS	Aluminized (AlSi)	1. típus	50–120	16–40	Al + 10% Si	Olvadék összetétele + Fe
		2. típus	50–120	16–40	Al	
ZM	Zn-Mg-Coating*** Cink-Magnézium		70–200	3–15	Zn + 1,5% Mg + Al	Zn + 1,5% Mg + Al

* A fentiekén kívül létezik még ZF-cink-vas bevonat is.

** A létrehozható bevonatvastagság jelentősen eltérhet az egyes üzemek és gyártók között.

*** A ZM-termékek nagy változatosságot mutatnak az olvadék komponenseit, illetve koncentrációját tekintve.

* There is also ZF, Zn-Fe coating. (But not relevant to continuous hot-dip coating.)

** The achievable coating thickness can be different pending on the suppliers.

*** A ZM products showing big variance in terms of components and concentrations applied.