

RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATTECHNIKA

NDT TECHNICS

FÉMLEMEZEK VASTAGSÁGÁNAK MÉRÉSE RÖNTGENSUGÁRZÁS SEGÍTSÉGÉVEL THICKNESS MEASURING OF METAL SHEETS WITH X-RAY METHODS

BOROMISZA LÁSZLÓ

Kulcsszavak: vastagság mérés, röntgen, abszorpció,
Keywords: thickness measurement, x-ray, absorption

ÖSSZEFOGLALÁS

Az acéliparban a késztermék előállításához sokféle fizikai jellemző pontos mérése szükséges. Az előállított termék, az acéllemez egyik fontos paramétere a vastagsága. A gyártási folyamatok nem teszik lehetővé a fizikai érintésen, vagy optikai elven alapuló mérőberendezések használatát, ezért elterjedten alkalmaznak radioaktív sugárzással működő vastagságmérő berendezéseket. Ezek az eszközök gyakran a gyártósor szabályozási rendszerének érzékelő elemei, így pontosságuk alapvetően befolyásolja a késztermék minőségi paramétereit.

SUMMARY

There are many types of physical properties in the steel industry which need to be measured accurately. One of the finished product's important parameters is its thickness. Because using gauges whose operating principle is based on physical touch or optics is not allowed in the production process, the usage of measuring devices based on the x-ray absorption is usual. These thickness gauges are often the sensors of the production line's closed loop controlling system, so their accuracy is essentially determines the quality properties of the finished product.

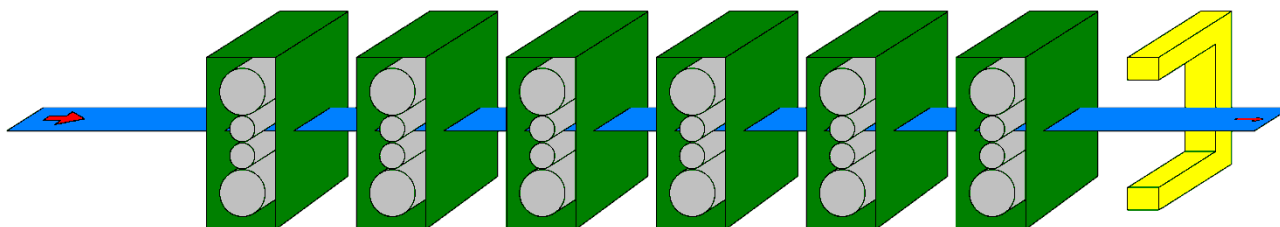
BEVEZETÉS

A hengerson bemenetére egy kb. 100 mm vastag acélbuga kerül, amit a 6 hengerállvány fokozatosan nyom össze úgy, hogy a 6. állvány után

ISD Dunaferr ZRt.

A mérés technika területén rengeteg különféle technika, mérési módszer fordul elő. Különböző megoldások, megvalósítások jellemzik az egyes fizikai jellemzők mérésére szolgáló berendezéseket. Általános alapelv, hogy az adott fizikai jellemző mérését mindig a legegyszerűbb és a kívánalmaknak megfelelően a legpontosabb módon végezzük. Vannak azonban esetek, amikor a körülmények nem engedik meg akármilyen mérési elv alkalmazását, például ha a technológiai környezet túl agresszív (erősen korrozív), ha túl magas hőmérsékletű, ha a technológiai anyagáramlás sebessége túl nagy, vagy ha nem megengedett a fizikai érintkezés. Ezekben az esetekben célszerű az úgynevezett érintésmentes mérési elveket alkalmazni. Ilyenek többek között az optikai elvű mérések, és az ionizáló sugárzáson alapuló mérések.

Jelen írásban az ionizáló sugárzás felhasználásán alapuló mérések egy szegmensével foglalkozok, az ún. transzmissziós elvű anyagvastagság-méréssel. Ilyen típusú mérések főképp a fémiparban használatosak hosszú fémszalagok, fémlemezek vastagságának mérésére, ugyanis fémlemezek (acél, alumínium...) előállításakor az egyik elsődleges kimeneti paraméter azok vastagsága. Egy jellemző példa az acéllemezeket előállító hengerson. Az 1. ábra egy 6 hengerállványból álló hengerson mutat.



1. ábra. Hengerson vázlat

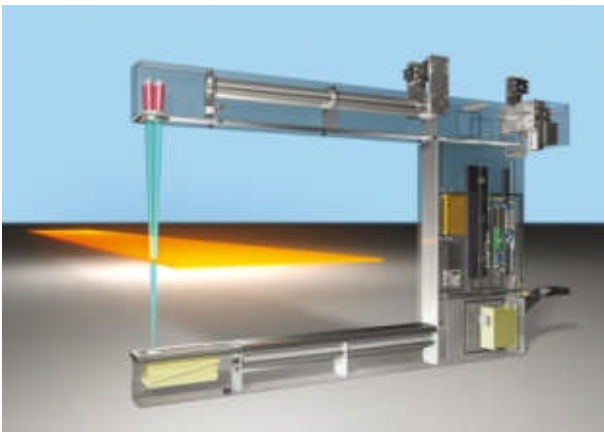
kilépő lemez a kívánt vastagságú legyen. A kilépő lemez vastagságát egy, az ábrán sárga színnel jelölt berendezés méri meg.

TRANSZMISSZIÓS MÉRÉSI ELV

Transzmissziós mérés alapelve, hogy adott sugárzást bocsátunk keresztül a mérendő anyagon, majd megmérjük az áthaladt (a csökkentett) sugárzás intenzitását.

Az ionizáló sugárzással működő anyagvastagság mérésnek esetén nagyenergiájú elektromágneses sugárzás halad keresztül a mérendő anyagon. Az ionizáló sugárzás lehet gamma-sugárzás vagy röntgen sugárzás.

A mérési elrendezés: egy C (esetleg O) formájú mérőkeret, aminek két ellentétes végén helyezkedik el a sugárforrás és a detektor.



2. ábra. Mérés C-kerettel [1]

A 2. ábrán a C-keret alján található a sugárforrás, ami egy keskeny sugárnyalábot bocsát ki magából, egyenesen a C-keret felső részén lévő detektor felé. A sugárforrás és a detektor között található a mérőres. A mérendő anyag áthalad a mérőresen, és közben elnyeli a forrás által kibocsátott sugárzásintenzitás egy részét. Minél vastagabb a mérendő anyag annál nagyobb hányadát nyeli el a sugárnyalábnak, tehát annál kisebb a detektor által mért sugárzás szintje. A sugárzásmérő detektor kimenetén megjelenő jel (általában feszültségjel) egyenes arányban áll a detektort ért sugárzás intenzitásával. Általános irányelvként és sugárvédelmi szempontból is a mérőresnek a lehető legkisebbnek kell lennie. Ezzel ellentétesen technológiai szempontból azonban a mérőrest a lehető legnagyobbra kell választani, hogy a mérőberendezés könnyen, rugalmasan legyen illeszthető a folyamatba, és elegendő teret adjon a mérendő anyag esetleges rezgéseinek, elhajlásainak anélkül, hogy ez a mérőberendezést veszélyeztessené.

IPARBAN MŰKÖDŐ IONIZÁLÓ SUGÁRZÁST KIBOCSÁTÓ FORRÁSOK

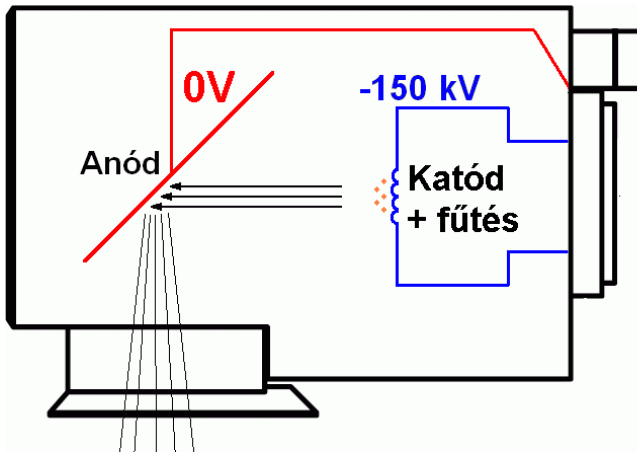
Az ipari gyakorlatban, fémek vastagságmérésére kétféle sugárforrás használatos. Radioaktív

izotópot tartalmazó zárt acélkapszula vagy röntgen berendezés. Radioaktív izotóp esetén kizárólag zárt sugárforrás használatos, így sugárzszennyezés, kontamináció nem lehetséges. A zárt kapszulából kizárólag a méréstechnikai szempontból hasznos γ -sugárzás léphet ki. Acél lemezek vastagságának méréséhez ^{241}Am vagy ^{137}Cs izotóp források alkalmasak. Mindkettő jól meghatározott gamma energián sugároz, az amerícium 59,5 keV, a cézium 662 keV energián. Amerícium források könnyebben és olcsóbban előállíthatóak, ráadásul a cézium elég reaktív elem, kezelése nehézkes. Gyakorlati szempontból lényeges különbség van a két sugárforrás használhatósága között. Mivel a cézium forrás által kibocsátott gamma sugárzás energiája egy nagyságrenddel nagyobb, mint az ameríciumé, ezért annak nagyobb az áthatoló képessége. Méréstechnikai szempontból a maximálisan mérhető lemez vastagságot az határozza meg, hogy a mérendő lemez milyen mértékben csökkenti a rajta áthatoló sugárzás intenzitását. Értelemszerűen a sugárzásmérő detektor által mért legnagyobb jelszint lemez nélküli méréskor keletkezik, a legkisebb pedig a legvastagabb lemez mérésekor. Régebben a kettő közötti legnagyobb arány 1:40-1:50 arányban volt maximálva, így amerícium forrással 0-4 mm tartományban lehetett az acél lemezek vastagságát mérni, ennél vastagabb lemezeknél cézium sugárforrás használata volt szükséges. A technológia fejlődésével az előbb említett arány 1:200-ra módosult, így amerícium esetén akár 6 mm-es lemezek vastagsága is mérhetővé vált.

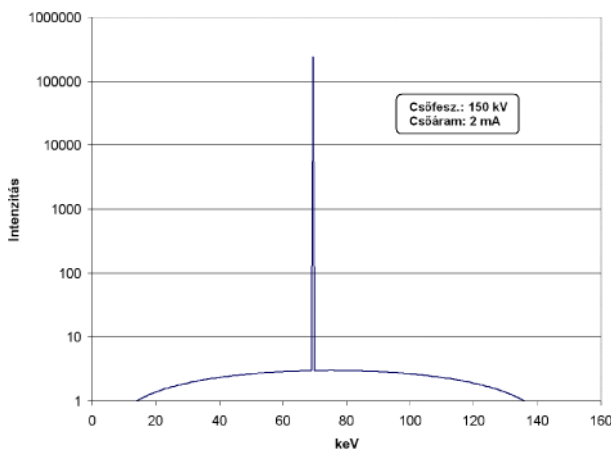
Röntgen mérőberendezés esetén az ionizáló sugárzást röntgencső állítja elő nagyfeszültségű tápellátás segítségével. A röntgencső katódja az előállított nagyfeszültség negatív pólusára kapcsolódik, ugyanakkor a katódot egy másik elektronikus egység fűti. A fűtés hatására a katód anyagát alkotó atomok elektronjai gerjesztett állapotba kerülnek, ezek az elektronok a nagyfeszültségű előfeszítés hatására elszakadnak az atomjuktól és az anód target-be csapódnak. A becsapódás során gerjesztődik a fékezési illetve a karakterisztikus röntgensugárzás.

A katódra kapcsolt nagyfeszültség értéke a csőfeszültség, az anód és a katód között folyó áram pedig a csőáram. A csőfeszültség és a csőáram változtatásával szabályozható a kibocsátott röntgen sugárzás intenzitása, az anód anyaga pedig a kibocsátott sugárzás energiáját határozza meg. Az ipari méréstechnikai alkalmazásoknál általában wolfram targetet alkalmaznak. A röntgencső által kibocsátott sugárzás két összetevőből áll: fékezési sugárzásból (ennek energiaspektruma folytonos) és karakterisztikus röntgen-sugárzásból (vonalas spektrum). A kettő aránya függ az alkalmazott

csőfeszültségtől, az anód anyagától és a csőáramtól [2]. Egy wolfram anódos röntgensövet, 150 kV-os csőfeszültséggel és 2 mA-es csőárammal működtetve az a 4. ábra szerinti energiaspektrumú sugárzást bocsát ki. Látható, hogy lényegében a kibocsátott röntgen-sugárzás energiája megfelel a karakterisztikus röntgensugárzás energiájának, ami wolfram esetén 69,5 keV.



3. ábra. Röntgenső vázlatos működése



4. ábra. Röntgenső által kibocsátott sugárzás energiaspektruma ([2] 1.27 és 1.32 képletének felhasználásával)

Vastagságmérő berendezést röntgenes sugárforrással működtetve a méréstartomány akár 20 mm is lehet gyengén ötvözött acéllemezek esetén.

RADIOAKTÍV IZOTÓPPAL ÉS RÖNTGENNEL MŰKÖDŐ SUGÁRFORRÁSOK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA

Annak eldöntéséhez, hogy egy mérő berendezés esetén melyik típusú sugárforrás használata a célszerűbb, mérlegelni kell mindkét megoldás előnyeit és hátrányait. Zárt radioaktív izotópos sugárforrás alkalmazásának előnye, hogy nem igényel semmiféle külső energiaforrást a működéséhez, rendkívül masszív kialakítású tokozatban helyezkedik el, így erős külső behatás (mechanikai

sérülés, tüzeset) sem károsítja. Hátránya, hogy kezeléséhez (előállítás, tárolás, szállítás, zártágvizsgálat, eltemetés, környezetvédelem) különleges eljárások és képesítések szükségesek. Az izotóp lecsengéséből fakadóan idővel csökken a kibocsátott sugárzás intenzitása (ezzel együtt a sugárzásmérő detektor kimeneti jele), amit a mérőrendszernek külön kompenzálnia kell, ráadásul a csökkenő jelszinttel együtt növekszik a mérési bizonytalanság.

Röntgenes berendezés óriási előnye, hogy csak akkor bocsát ki ionizáló sugárzást, ha villamos tápellátást kap (ez munkavédelmi, sugárvédelmi és környezetvédelmi szempontból is hasznos). A kibocsátott sugárzás intenzitása a csőfeszültségtől és a csőáramtól függ, így ezek nagyfokú stabilitásának biztosításával a kibocsátott sugárzás intenzitásának ingadozása is alacsony értéken tartható. Hátrányként említhető, hogy a nagyfeszültség előállítása bonyolult és drága áramköröket igényel, és bár a katód fűtése a működéshez szükséges, de a keletkezett hőmennyiség káros, így vízhűtéssel kell ellátni a röntgensövet. A röntgensugárzás előállításának hatásfoka elég alacsony (~1% körüli), így a kellő sugárzás intenzitás eléréséhez jelentős villamos energiát kell befektetni. Mechanikai behatásoktól óvni kell a röntgensövet és rendszeres időközönként cserére is szorulnak előregedés miatt.

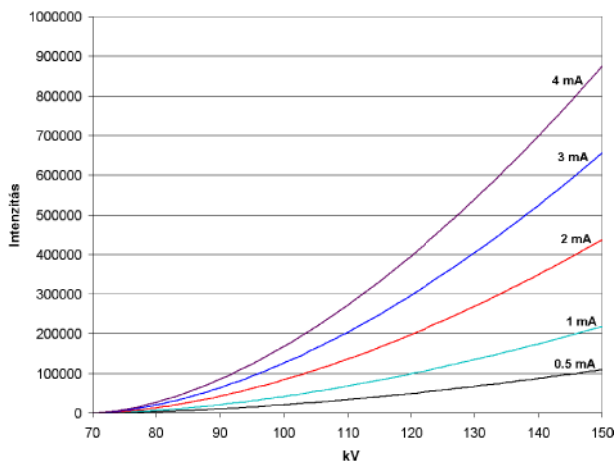
Méréstechnikai szempontból van még egy igen lényeges különbség a radioaktív izotópos és a röntgenes vastagságmérés között: a mérés bizonytalansága. Egy adott aktivitású radioaktív izotóp a tér minden irányába sugároz. Nem lehet megmondani, hogy melyik atom mikor fog elbomlani és azt sem, hogy a bomlás során kibocsátott gamma-foton milyen irányba fog terjedni. A sugárforrást ezért (is) ólom burkolattal látják el, ami csak egy irányba engedi ki a keletkező sugárzást. A keletkező sugárzás nagy része így elnyelődik a burkolatban és csak csekély hányada jut el a sugárzásmérő detektorba. Ahhoz, hogy minél nagyobb intenzitású sugárzás érje a detektort (minél kisebb legyen a mért sugárzás bizonytalansága) nagy aktivitású izotópot kellene alkalmazni, ehhez azonban nagyméretű ólom burkolat szükséges. Egy ponton túl már nem gazdaságos és nem is indokolt a méretek növelése. Az ipari gyakorlatban 37 GBq aktivitású ²⁴¹Am izotóppal 50-60 ms mérési idő alatt lehet 1% alatti mérési pontosságot elérni.

Röntgenes berendezés esetén a kibocsátott sugárzás intenzitása a röntgenső paramétereinek változtatásával jól kézben tartható, ráadásul a sugárnyaláb is irányított. Ezen okokból kifolyólag a sugárzásmérő detektort sokkal nagyobb intenzitá-

sú sugárzás érheti, amivel csökken a mérési bizonytalanság, illetve csökken a mérési idő. Röntgenes vastagságmérő berendezéssel ms-os mérési idővel lehet elérni az 1 % alatti pontosságot.

RÖNTGEN FORRÁSSAL MŰKÖDŐ IPARI VASTAGSÁGMÉRŐ BERENDEZÉSEK ELŐNYEI

Mivel a röntgenső feszültsége és csőárama elektronikusan szabályozható így könnyen meghatározható olyan sugárzás intenzitás, ami a technológia igényeit (mérési sebesség, mérési pontosság...) kielégíti. Az 5. ábrán a röntgenső által kibocsátott sugárzás intenzitása látható különböző csőfeszültségek és csőáramok esetén.



5. ábra. Röntgenső által kibocsátott sugárzás intenzitása a csőfeszültség és a csőáram függvényében ([2] 1.32 képletének felhasználásával)

Pontosan szabályozott feszültség és áram értékek esetén olyan stabil és nagy intenzitású sugárzás állítható elő, amelyet radioaktív izotóppal nem lehetne elérni.

Külön kiemelandő, hogy a kibocsátott sugárzás energiája (69,5 keV) éppen „ideális” gyengén ötvözött acélok vastagságának méréséhez. A nem túl magas foton-energia miatt jól mérhetők a „vékonyabb” lemezek (6-8 mm-es tartományig), ugyanakkor a nagy intenzitás lehetővé teszi a „vastagabb” (~16 mm) tartományban történő méréseket is.

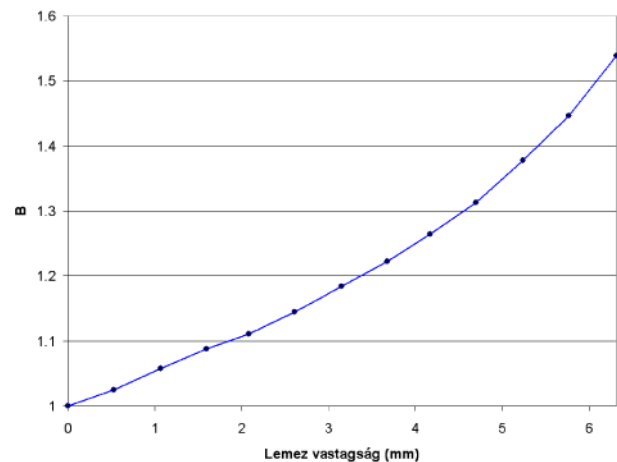
ANYAGVASTAGSÁG MÉRÉS ELVI BEMUTATÁSA

A mért vastagság meghatározásának képlete: $I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$, ahol I a lemezen áthaladt (gyengített) sugárnyaláb intenzitása, I_0 a lemez nélkül mérhető sugárzás intenzitása, μ az elnyelési állandó, x pedig az anyagvastagság. A gyakorlati életben a fenti abszorpciós képlet kis módosításra szorul. A

kis módosítás, az ún. Build-up faktor használatát jelenti, amivel korrigálhatók a mérési elrendezésből és szóródásokból adódó pontatlanságok [3]. A képlet így $I = B \cdot I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$ -re módosul.

A vastagságmérő berendezés úgy lett kialakítva, hogy a sugárzásmérő detektor kimenetén nem a sugárzás intenzitása jelenik meg, hanem egy azzal arányos feszültség. A Build-up faktoral kiegészített elméleti képletben az intenzitás értékek helyére a detektor által mért feszültségek helyettesítendőek. A lemezen áthaladt (gyengített) sugárzás intenzitása (I) két összetevőből áll: a mindig jelenlévő háttérsugárzás hatására létrejövő detektor kimeneti feszültség (U_0) és U_m a mért lemezen áthaladt sugárzás hatására a detektor kimenetén létrejövő feszültségérték különbsége ($I = U_m - U_0$). Ugyanígy $I_0 = U_f - U_0$, ahol U_f a teljes sugárzáshoz (lemez nélküli esethez) tartozó detektor kimeneti feszültség. Az abszorpciós képlet így $U_m - U_0 = B \cdot (U_f - U_0) \cdot e^{-\mu \cdot x}$ alakú lesz.

Konkrét mérőberendezés esetén a Build-up faktor értéke a mért lemez vastagságával együtt változik, nem lineáris módon. A pontos méréshez több ponton kell B értékét meghatározni (több pontos kalibrálás). A pontosítás ismert vastagságú és anyagminőségű „etalon” lemezek használatával történik. Mindegyik etalon lemezre meg lehet határozni a megfelelő B értéket (az 6. ábra pontjai). Bármely B érték kiszámítható lineáris interpoláció segítségével, a pontosításkor felvett Build-up faktorok felhasználásával.



6. ábra. Build-up faktor a vastagság függvényében

ANYAGTÍPUSOK SZERINTI KORREKCIÓ SZÜKSÉGESSÉGE

A röntgen-sugárzással történő pontos anyagvastagság méréshez ismerni kell a mérendő anyag kémiai összetételét. Ennek oka: ha két egyforma vastagságú lemez közül az egyik tiszta vas, a másik pedig tiszta króm, akkor króm lemez mérése esetén (annak kisebb elnyelési állandója miatt)

kisebb lesz a mért vastagság. A berendezés pontosításakor (a Build-up faktorok felvételekor) ismert a használt etalon lemezek vastagsága és kémiai összetétele. A gyártásban lévő lemezek kémiai összetétele azonban eltér az etalon lemezekétől, így szükséges egy korrekció alkalmazása. Előfordulhat, hogy a gyártott lemez vastagsága megegyezik az egyik etalon lemez vastagságával, azonban az eltérő kémiai összetétel miatt mégsem a jó vastagság érték lesz megjelenítve. Minden anyagra és adott foton-energiára meghatározható az elnyelési állandó értéke [4]. Ha egy lemez több kémiai összetevőt tartalmaz, akkor az eredő az elnyelési állandó az egyedi összetevők elnyelési állandója és azok összetételi arányának szorzat-összegeként áll elő [5], tehát

$$\mu_{\text{eredő}} = \frac{C\% \cdot \mu_C(69,5\text{keV}) + \text{Si}\% \cdot \mu_{\text{Si}}(69,5\text{keV}) + \dots}{100}$$

ahol C% a lemez széntartalma százalékban kifejezve, $\mu_C(69,5\text{keV})$ a szén elnyelési állandója 69,5 keV fotonenergián, $\mu_{\text{eredő}}$ pedig a lemez eredő elnyelési állandója. Az etalon lemezek kémiai összetétele alapján ki lehet számolni μ_{etalon} értékét (az etalon lemezek elnyelési állandóját 69,5 keV energiára), és hasonló módon a gyártott lemez kémiai összetétele alapján $\mu_{\text{gyártási}}$ értékét is. A pontos méréshez szükséges korrekciós faktor (K) az etalon lemez elnyelési állandójának és a gyártott lemez elnyelési állandójának hányadosaként áll elő

$$\left(K = \frac{\mu_{\text{etalon}}}{\mu_{\text{gyártási}}} \right)$$

A gyártott lemezek mérésekor a vastagság kiszámításának képlete így

$$x = \frac{-\ln\left(\frac{U_m - U_0}{B \cdot (U_f - U_0)}\right)}{\mu \cdot K}$$

alakú lesz.

Az acéliparban a gyártott lemezek általában szabvány szerinti anyagminőségűek. A szabvány előírja, hogy adott típusú acél összetételében egy adott kémiai elem milyen arányban lehet jelen (pl.: széntartalom 0,2 – 0,4 %, szilíciumtartalom 0,1 – 0,35 % közötti...). Egy adott anyagpushoz, annak átlagos kémiai összetétele alapján meg lehet határozni a hozzá tartozó korrekciós faktort. Bár az egyes kémiai elemek aránya változó lehet ugyanazon anyagtypusnál, az átlagos összetételtől való eltérés nem jelent túl nagy hibát.

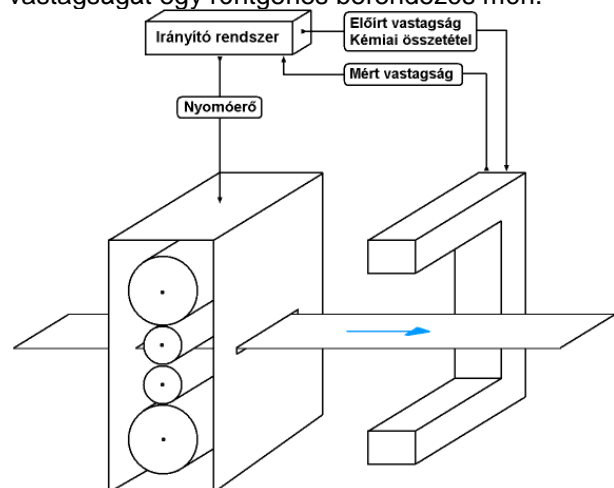
A gyakorlati életben a különböző acélminőségek miatt keletkező mérési pontatlanság korrigálá-

sát a vastagságmérő berendezés automatikusan kezeli. A vastagságmérő berendezés mindig egy úgynevezett fölérendelt rendszerhez kapcsolódik, az aktuálisan mért lemez minőségkódját onnan kapja. Adott acélminőséghez adott korrekciós faktor tartozik (ezeket a vastagságmérő berendezés egy táblázatban tárolja, az anyagminőség – korrekciós faktor táblázatban). Ez a rendszer kétségtelenül működőképes, azonban vannak hátrányai. A korrekciós faktorokat a vastagságmérő berendezés gyártója határozza meg. „Új” anyagminőségek esetén (amiket az anyagminőség – korrekciós faktor táblázat nem tartalmaz) a berendezés a korrekciós faktort 1-nek veszi, ami bizonyos esetekben nagy eltérést is jelenthet a valós, kívánt korrekciós faktorhoz képest.

További nehézséget jelent, hogy vannak olyan esetek, amikor az acél szabvány szerinti kémiai összetétele a hengerlési célvastagság függvényében változik. Például egy S355MC minőségkódú acélnál 4 vastagságtartományban gyártható a lemez: 1,8 – 3 mm, 3 – 8 mm, 8 – 12 mm, 12 – 18 mm. Minden vastagságtartományban más és más a kémiai összetétel, így egy adott lemez pontos méréséhez nem elegendő annak minőségkódja.

Minden hengerlésre kerülő acél buga kémiai összetétele és minden egyéb fontos paramétere ismert, így kiszámítható a hozzá tartozó pontos korrekciós faktor értéke is on-line módon, ezáltal anyagminőségtől és anyagvastagságtól függetlenül a lehető legpontosabb mért érték állhat elő.

A 7. ábrán egy vázlatosan ábrázolt gyártósor részlete látható. A hengerállványból kilépő acéllemez vastagságát a hengerek összenyomásával lehet változtatni. A hengerállványt elhagyó lemez vastagságát egy röntgenes berendezés méri.



7. ábra. Hengerállvány vastagságmérővel

A hengerállvány irányító rendszere (a fölérendelt rendszer) a vastagságmérő által mért értékek alapján úgy állítja be a hengerállvány paramétereit,

hogy a kilépő lemez vastagsága kívánt értékű legyen, tehát a röntgenes berendezés egy zárthurkú szabályzási rendszer érzékelő eleme. Ha a vastagságmérő csak az anyagminőség alapján határozza meg az adott lemezhez szükséges korrekciós faktort, akkor a fentebb említett pontatlanságok miatt előfordulhat, hogy a ténylegesen kihengerelt acéllemez vastagsága eltér a kívánt értéktől. Mivel az acéllemez tömege nem változik a hengerlés során, így ha a hengerelt lemez vastagabb az előírtnál, akkor a hengerelt lemez teljes hossza rövidebb lesz. Például, ha a hengerversorba belépő lemez 100 mm vastag és 20 m hosszú, a hengerversorból kilépő lemez pedig 10 mm vastag, akkor a hossza 200 m lesz (a hengerlés során, technológiai okokból a lemez szélessége nem változik), viszont ha (egy szélsőséges példával élve) a kilépő lemez 11 mm vastag, akkor a hossza már csak 181,2 m lesz. Ha az acéllemezt a későbbi feldolgozása során fix méretű táblákká darabolják, akkor a rövidebb lemez hossz miatt kevesebb tábla készül, végeredményben veszteség keletkezik. A probléma lényege, hogy nem megfelelő korrekciós faktor alkalmazásával a vastagságmérő 10 mm értéket mutat, miközben a valóságos lemezvastagság (pl. mikrométerrel mérve) 11 mm. A hengerállvány irányító rendszere végig a jónak vélt (10 mm-es) érték szerint állítja be a hengerekre ható nyomóerőt, és látszólag teljesen jól működik minden, a végeredmény mégis egy jóval rövidebb lemez hossz (a valóságos 11 mm-es lemezvastagság miatt).

A hengerlésre kerülő acéllemez tényleges kémiailag összetételével meghatározott korrekciós faktorok használatával ezek a problémák kiküszöbölhetők, így optimalizálva a technológiai folyamatokat és a késztermék jellemzőit.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] <http://www.ims-gmbh.de>
- [2] E. P. Bertin: Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis, Second edition, Plenum Press, 1975
- [3] Bódizs Dénes: Atommagugárzások mérés technikái, Typotex Kiadó, 2006
- [4] <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>
- [5] R. P. C. Schram: Application of X-ray imaging for desinty analysis
(<ftp://ftp.nrg.eu/pub/www/nrg/nrglib/2004/44395i11-%20X%20ray%20attenuation.pdf>)