FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 2000. március 24-25.

ELŐHENGERELT FELTEKERCELT LEMEZ KIHŰLÉSI MODELLEZÉSE

Hegman Norbert Ph.D., Baross Botond, Klementis Otto Ph.D.

FEM simulation was performed in order to obtain the temperature variation during a free cooling process of a coiled up steel sheet. In practice the main problem is that the different parts of the coiled metal sheet can cool down with different rate leading to a non-uniform solid state morphology, which can be considered in the frame of product quality. The control parameters of such a heat treatments are a big interest to improve the technology to get the desired quality. Our purpose was to calculate the T-t curves which can be mapped on the corresponding phase diagram for analysing the final structure. The model considered the heat radiation between the neighbouring sheet-sheet surfaces and between the sheets and the environment. Convective heat transport was allowed at the outer surfaces of the cylinder geometry, while conductive transport was let only in the axial direction in order to simplify the geometrical representation. The model is suitable to include possible advanced technological set up as applying outer radiation shields or exchange gas flow along the gap between the coiled sheet-turns.

BEVEZETÉS

A lemeztermékek gyártásakor az előhengerelt szélesszalagokat többnyire csévéelve tárolják, ill. továbbítják a készsorra, esetleg lágyító hőkezelésre. A melegen hengerelt, felcsévélt anyag hűlése a csévé geometriájából adódóan nem egyenletes, ami befolyással van a szalag fizikai tulajdonságaira, így áttelelesen a selejthányadra is. A csévélt szélesszalag egyes pontjai hőmérsékletének nyomon követése üzemileg nem megoldható, ezért szükséges a lehűlés számítása vagy modellezése. Jelen tanulmányunkban az volt a célunk, hogy a folyamat végeselemes modellezésével (VEM) bemutassuk annak előnyeit.

A MODELL FELÉPÍTÉSE

Modellünkben feltételezzük, hogy egy előhengerelt 1 m széles 9 mm vastag lemez halad át folyamatosan egy zuhanyoztató hűtőrendszeren, aminek a végén egységesen eléri a 800°C hőmérsékletet. Az innen kilépő lemezt a szabad kihűlési idejéhez képest gyorsan felcsévélik úgy, hogy a csévézés ideje alatt a hőmérséklet nem változik. Itt rögtön felmerül egy másik kérdés, hogy a tekercselés során a plasztikus alakváltozás mértéke és sebessége milyen belső hőforrásokat generál. Ez főleg a kisebb sugarak mentén lehet jelentős, de a tekercselési melegedés ellen hat a magas hőmérséklet, ahol a folyási görbék alacsonyabb feszültség tartományba tolódnak el. Modellünk jelen fázisában a tekercselési

melegedés lehetőségét nem vettük figyelembe, szükség esetén kiegészíthető a modell ezzel a hatással is. A feltekercselt lemezt több variációban is vizsgáltuk, a lemezpalástok közötti légrést 1 majd 5 mm-re állítottuk és végül szélső esetként a teljesen érintkező lemez-menetek esetét vettük (itt még a kontaktellenállás fellépését nem vettük figyelembe). Minden esetben 51 menetből felépített tekercssel számoltunk (0,5 m belső sugárral). A spirális tekercset koncentrikus, egymással nem érintkező hengerpalástokkal helyettesítettük.

1. ábra: a hengersizmetikus tekercselrendezés, **2. ábra:** a feltekercselt acéllemez kihűlési görbéi
a modell csak a 2D-s síkkal számol. különböző pontokban és résszélességnél.

Az egyszerűsítések által egy z tengely irányára hengersizmetikus geometriát kaptunk, lemondván az eredeti csigavonal mentén a z tengelyre merőleges hővezetési járulékról. Ez az elhanyagolás a hengersizmetikus kezelhetőség érdekében megengedhető, mivel bizonyítható, hogy két lemez menet közötti eredő hőszugárzási energia lényegesen nagyobb, mint a hővezetés általi energia áram, még a legbelső menet esetén is. Az **1. ábrán** láthatjuk a hengersizmetikus elrendezést, amiből a modell számítása során csak a síkban fekvő réteges szerkezet volt az érdekes. A hossz tengely menti test felét elég volt venni a szimmetrikus elrendezés miatt. Az így kapott középső, nyitott metszet hőtani szigeteltségét kellett még biztosítani a hőszugárzásra nézve is, amit a légrésekbe alkalmasan elhelyezett tükrökkel közelítettünk meg. A tengely irányú fél modellre azért volt szükség, hogy a hőszugárzó elemi felületek számát jelentősen le tudjuk csökkenteni. A hőszugárzó felületek páronként való orientációjának a meghatározása a VEM számolást megelőző lépés, ami négyzetesen függ a felületek számától, és jelenleg ez a leginkább időigényes része a szimulációnak. A feltekercselt lemez kihűlése formálisan az alábbiakban összegezzhető.

- Az időfüggő hődiffúziós differenciálegyenlet tranziens megoldását kell keresni a hőmérséklet eloszlásra ($T(\mathbf{x}, t)$) a lemezben [1],

$$\rho C (\partial T / \partial t) - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = Q,$$

ahol $Q = 0$, mivel a belső hőforrásoktól eltekintünk,
a többi paraméter értelmezése az **1. Táblázatban** van részletezve.

- A kezdőfeltétel mint már említettük: $T(x,t=0) = 800^\circ\text{C}$.
- A lehűlés számára a következő határfeltételeket engedjük meg:

hőcserére: $\vec{n} (\kappa \nabla T) + q_c = 0$, csak a külvilág felé néző felületekre (egymással szembenező lemezfelületek esetén nem)

hősurázásra: $\vec{n} (\kappa \nabla T) + q_r = 0$, az összes felületen, kivéve a szimmetriasímban lévő izolált felületekre, ahol a résekbe tükröket helyeztünk el.

A formulákban ($\vec{n}$) a felületek normálisa, $q_c = h_c(T - T_c)$ és $q_r = h_r(T - T_r)$ a konvektív, illetve sugárzási járulékok a külső referencia hőmérsékletekre, $T_c = T_r = 20^\circ\text{C}$ -ra vonatkoztatva. Esetünkben egy állandó hőcserélődési tényezőt alkalmaztunk, $h_c = 10 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ minden megfelelő felületre. Az effektív hősugárzási tényező, $h_r = \varepsilon F \sigma (T + T_r) (T^2 + T_r^2)$, ahol $\sigma = 5.75 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4)$, a Stefan-Boltzmann állandó, F a sugárzási szögtényező (radiation view factor), és $\varepsilon = 0,8$ (egységesen állandó) a felületi emissziós képesség. A szögtényezőket a VEM program készíti el az alábbi jól ismert integrálok kiszámításával [2]:

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_k} \int_{A_k} \int_{A_j} \frac{\cos \Theta_k \cos \Theta_j}{\pi \cdot R^2} dA_j dA_k,$$

ahol R a távolság az A_j és az A_k felületek között. A két szög, θ_j és θ_k a felületek normálisa és az összekötő egyenes által bezárt szögek.

A hősugárzás határfeltételekor kirótt $T_r = 20^\circ\text{C}$ feltétel szigorúan véve csak a teljességgel a külső környezetbe sugárzó felületekre marad igaz, az egymást látó felületek egymás referencia hőmérsékletét megemelik, illetve a sorozatos reflexiók egy módosított emissziós tényezőbe foglalhatóak bele. Ezek az effektusok a számítási iterációk során automatikusan megvalósulnak. A szerkezetből következően hővezetés csak tengely irányban lehetséges, ez pótolja az éleken kisugárzott energiát.

Egy igen lényeges jelenség a lemez hűtésénél az áramlásos (convective) hőcsere, amely minden felületen hat, azonban ezt elhanyagoltuk a tekercsen belüli menetek felületeire, (csak a külvilág felé néző felületekre adtunk meg hőcserélődést). Feltételeztük, hogy a kis hőkapacitású levegő gyorsan felveszi a lemez hőmérsékletét és a rések nagy áramlási ellenállása miatt nehezen távozik onnan el, így kicsi a hőcserélő képessége.

Tömeg sűrűség $\rho(T)$ [kg/m ³]	Hővezető képesség $\kappa(T)$ [W/mK]	Fajhő C [J/kg K]
7800	20 °C – 75	0 °C - 465
	300 - 55	100 - 490
	700 - 34	300 - 560
	1500 - 20	500 - 680
		750 - 750

1.Táblázat: az acéllemez modellezéséhez használt anyag adatok.

EREDMÉNYEK

A vége-selelemes modellezés eredményeként a hengerelt szalag minden pontjának hőmérséklet változása a kihűlés során nyomon követhető. Ezen ismeretek és az anyag fémtani jellemzői, leginkább az átalakulásokat a T-t mezőben bemutató C görbék ismeretében előre feltérképezhetők a lemez egyenlőtlen hűléséből adódó inhomogenitások. A 800°C-ra egyenletesen lehűtött lemeztermék egyes pontjainak hőmérséklete a felcsévélésből adódóan más-más lehűlési sebességgel csökken, így máskor érik el a szilárd átalakulások kezdetéhez és befejeződéséhez tartozó C – görbéket. Legnagyobb különbség a csévé (és így a lemez) széle és közepe, valamint a szalag eleje és a legkülső hurok között tapasztalható, ami megjelenhet szemcseméretbeli különbségben (G) vagy az újrakristályosodott ill. átalakult hányadbeli különbségekben (X, %). A perlit-képződésre hatással van a csírképződési valamint növekedési sebesség, amelyek mindegyike hőmérsékletfüggő [3-4]. A **2. ábrán** a tizedik menetben a széltől mért három pontban (15, 250, 500 mm) vettük fel a lehűlési görbéket az összeérő és az 1 mm réstávolságú menetek esetén. Látható a szélek gyors kihűlése mindkét esetben, és a tömör test gyorsabb kihűlése a belső radiális hővezetés jelenléte miatt. Mindkét esetben a lehűlés jelentős hőmérséklet gradiens jelenlétében zajlik le, időben azonban eltolódva.

A mechanikai tulajdonságok alakulására a szemcseméret és a perlit lemezek vastagsága, valamint a lemezek közötti távolság egyaránt hatással vannak. A szemcseméret növekedésével az alacsony C – tartalmú ferrites acélok folyáshatára csökken. Ugyanakkor a perlitlamellák közötti távolság (S_p) növekedése a perlites acélok folyáshatárára csökkentő hatással van [4].

Mindezek ismeretében fontosnak tartjuk, hogy az elvégzett modellezés eredményeit valódi ipari körülményekre is adoptáljuk és az ott mért adatokkal összevessük, különös tekintettel a hőkezelési, lágyítási folyamatok optimalizálására.

HIVATKOZÁSOK:

- [1] J.N. Reddy, D.K. Gartling, The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics, Chapter 2., CRC Press, Inc., 1994.
- [2] MARC Analysis Res. Corp., Theory and User Information, Volume A, Version K7, Chapter 6.
- [3] Dr. Zorkóczy Béla: Metallográfia és anyagvizsgálat, p.197-233, (1978.) Tankönyvkiadó, Budapest
- [4] ASM International: ASM Handbook, Volume 20, p.350-375, ASM (1997.)

Hegman Norbert Ph.D.

Bay Zoltán Alapítvány, Logisztikai és Gyártástechnológiai Intézet

Miskolc-Tapolca, Iglói u.2. H-3519, Magyarország

Tel: +36 (46) 363-622, Fax: +36 (46) 369-438, e-mail: nhegman@bzlogi.hu