

Dr. Balogh András

A varrat hűléssebességéről hegesztőmérnököknek

c. egyetemi tanár,

Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet

Absztrakt: Az ömlesztő hegesztések varratában vagy hőhatásövezetében található pontok hőciklusának legfontosabb jellemzője a hűléssebesség. A hűléssebesség a hegesztendő alapanyag CCT görbéjének (folyamatos hűtésre érvényes átalakulási diagramjának) ismeretében információt nyújt a hegesztési folyamathoz kötődő szövetszerkezeti átalakulásokról, kiválásokról és oldódásokról, közvetlenül vagy közvetve befolyásolja a kötés hidegrepedési hajlamát, keménységét és szívósságát. A hűléssebesség hőmérsékletfüggése miatt a CCT diagramok átlagos orrponti hőmérsékletéhez köthető 500 °C hőmérsékleten érvényes hűléssebességet tekintik a hőciklus legfontosabb jellemzőjének. Mivel a hűléssebességek mérése bonyolult mérés-technikai feladat, nagysága a hegesztési hőfolyamatok számítási modelljeinek segítségével becsülhető. A vége-seleemes analízishez és szimulációkhoz is alkalmazott, röviden 2D-snek nevezett vékony-lemez modell kezelése számos problémával jár.

Kulcsszavak: 2D modell, varrat hűléssebesség, CCT diagram, számítási korrekció

Abstract: The most important characteristic of the heat cycle of the points located in the heat affected zone of the weld beads of fusion welding processes is the cooling rate. Having the continuous cooling transformation (CCT) diagram of the steel kind to be welded the cooling rate gives information about the microstructure transformations, segregations, solutions, and directly or indirectly affects on the cold cracking susceptibility, hardness and toughness of the welded joint. By reason of the temperature dependency of the cooling rate, the most important characteristic of the heat cycle is the cooling rate belonging to the 500°C regarding the average temperature of the nose point of the CCT diagrams. Since measuring the cooling rate is considered as complicated measuring task, it can be estimated by calculation models of welding heat flow. The application of 2D model of thin plates used to the physical simulation and finite element analysis can cause lot of difficulty.

Key words: 2D model, cooling rate of weld centre line, CCT diagram, calculation correction

1. Bevezetés

A hideghegesztés kivételével valamennyi ömlesztő és sajtoló hegesztési eljárásra jellemző, hogy a kötés létesítéséhez külső hőbevitelre van szükség, amelyet valamely hőforrás szolgáltat.

A hegesztési hőforrások szinte valamennyi ismert energiafajtára (exoterm reakcióhő, villamos ív, plazmaív, ellenálláson fejlődő Joule-hő, mechanikai súrlódáson fejlődő hő, sugárenergiák) kiterjednek, mivel a mai hegesztési gyakorlat egyaránt sikeresen alkalmazza a hagyományos és modern energiafajtaikat. Az energiabevitel határfoka nagyon eltérő, a láng esetében 0,4 körüli, a villamos ív esetében 0,5 és 0,95 közötti (az MSZ EN 1011-1:2000 szabvány egyszerűsítő adatai szerint 0,6 és 1,0 közötti). Kissé meglepő, hogy a legkorszerűbbnek számító lézersugár-hegesztéseknél ez az abszorpciós beviteli határfok nagyon alacsony és külön intézkedések szükségesek, hogy az abszorpció (acélloknál) a 0,2...0,3 értéket elérje [1].

A munkadarabba bevitt hő az anyag egy részét olvadáspontig, vagy az olvadáspont fölé hevíti, aszerint, hogy szilárd, vagy folyékony fázisú (ömlesztő) hegesztésről

van szó. A hőbevitel helyén alakul ki a legmagasabb hőmérséklet, amely a hőbevitel helyétől mérve folyamatosan csökken. Amennyiben a hőforrás mozog, a hegesztendő darab egy pontjában a hőmérséklet az időben változik, ily módon a hegesztés alatt álló darabban egy időben változó térbeli $T(x,y,z,t)$ hőmérsékletmező alakul ki. A gyakorló hegesztőmérnököt az egy-két másodperc-re kiterjedő tranziensek (pl. a varratvégek) nem igen érdeklik, számukra az állandósult állapot a fontos.

A hőforrás tartózkodási helyén a hőbevitel olyan intenzív, hogy a hegesztendő anyagok megolvadnak és néhány mm-re, illetve néhány tíz mm-re kiterjedő hegfürdő jön létre. A hegfürdő a hőforrás haladási irányában folyamatosan eltolódik, a haladási iránnyal ellentétes oldalon dendritesen kristályosodik és így egy hosszvarrat alakul ki (kivétel a ponthegesztés, amikor a hőforrás áll és pontvarratot kapunk eredményül).

A hegesztés (abszolút és fajlagos) teljesítményadatai és a hegesztendő tárgy hőfizikai jellemzői együtt determinálják a hegfürdő alakját és méreteit, (vagyis a térfogatát), a hőmérsékletét és áramlási viszonyait. A hegfürdő

l_{hf} hosszának [mm] ismerete azért (is) fontos, mert a v_h hegesztési sebességgel [mm/s] (és egyéb, itt nem részletezendő körülményekkel) együtt a hegfürdő t_l létidejét [s] befolyásolja.

$$t_l = \frac{l_{hf}}{v_h} \quad (1)$$

Ezen adatok ismerete azért fontos a hegesztőmérnöknek, mert felhasználásukkal a hegfürdőben lejátszódó időigényes fizikai és kémiai folyamatok előrehaladására, kedvező esetben teljes végbemenetelésre lehet következtetni.

A megolvadt és olvadékból dendritesen kristályosodott varrat melletti terület, a hőhatásövezet szélességi mérete és belső arányai szintén a hegesztési hőfolyamatok függvénye. Mivel a hőhatásövezet sávjában fontos anyagszerkezeti változások mennek végbe, ennek szerkezete szintén fontos információkkal bír. Közismert, hogy pl. a hidegrepedési hajlamot jelző felkeményedés és a szemcsedurvulás a kötés egészére nézve milyen negatív következményekkel jár.

A hőmérsékletmező ugyancsak befolyásolja a hegesztési deformációkat és ezek gátlásából eredő belső feszültségek kialakulását és jellemző adatait.

2. A hegesztési hőfolyamatokat leíró modellek

A szilárd testekben a hő vezetéssel terjed, de adott esetekben a konvekció és a sugárzás is lényeges lehet. A hőmérsékletmezőre vonatkozó hőtani számításokhoz a hőforrás és a tárgy idealizálására van szükség [2].

A hőforrások idealizált alakjuk és méretük szerint az alábbi osztályokba sorolhatók (N_1):

- pontszerű (0D) hőforrás,
- vonalszerű (1D) hőforrás,
- folszerű (felületi vagy 2D) hőforrás,
- térfogati (3D) hőforrás.

A hőforrások sebességét illetően a következő esetek különböztethetők meg (N_2):

- álló hőforrás,
- lassan mozgó hőforrás,
- gyorsan mozgó hőforrás.

A hőforrások mozgási sebessége nem abszolút fogalom, mivel az osztályozás a hő szilárd testben való terjedési sebességétől függően végezhető. Ha a hőforrás gyorsabban halad, mint a haladási irányban megfigyelt hővezetés, akkor gyorsan mozgó hőforrásról beszélünk. Ilyenkor a hőforrás előtt nincs melegeedés, a tárgy hőmérséklete egyenlő a kiindulásival. Lassan mozgó hőforrásnál a tárgy a hőforrás előtt is melegszik.

A hegesztendő tárgyak alakjuk, méretük, hőfizikai anyagjellemzőik (fajhő, sűrűség), kezdeti hőmérsékletük és a hegesztésükkor alkalmazott fajlagos hőbevitel szerint sokfélék lehetnek. A hőterjedés szempontjából fon-

tos geometriai változatok a következők (N_3):

- nagyméretű tárgy (félvégtelen test, 3D),
- vastaglemez (3D),
- közepes vastagságú lemez (2,5D),
- vékonylemez (2D),
- rúd (1D).

A hőforrás és tárgy felsorolt változatainak kombinálásával a lehetséges modellek száma a következő képlettel becsülhető:

$$N_m = N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 = 4 \cdot 3 \cdot 5 = 60 \quad (2)$$

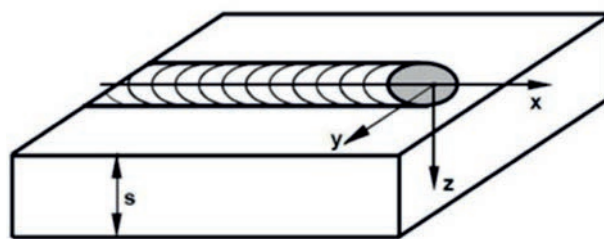
Az elméletileg lehetséges modellek közül az ömlesztő hegesztéssel foglalkozó hegesztő szakemberek a következőket tartották figyelemre érdemesnek.

1. nagyméretű tárgy, lassan mozgó pontszerű hőforrás (a rövideg kedvéért innentől 3D modell),
2. vékonylemez, lassan mozgó pontszerű hőforrás (innentől 2D modell).

A nagytest modellt és a vékonylemez modellt (ismereink szerint egymástól függetlenül) Rosenthal 1935-ben (pontosítva és kiegészítve 1941-ben [3]) és Rykalin (1947-ben [4]) dolgozta ki. Ezeket a modelleket azóta sokan elemezték, pontosították és kísérleti úton is ellenőrizték.

2.1. Koordináta-rendszer

A hőforráshoz kötött és azzal együtt mozgó, jobbsodrású Descartes-féle koordináta-rendszer az 1. ábrán látható. A hőforrás az origó fölött helyezkedik el, a hegesztési iránya a pozitív x tengely, a z koordináta a tárgy belseje felé mutat.



x: hosszirány y: keresztirány z: vastagságirány

1. ábra: Egyezményes, a hőforrással együtt mozgó koordináta-rendszer a hőmérsékletek, a hűléssebességek és a hűlésidők számításához

2.2. Feltételek és elhanyagolások

A hőterjedési számításokhoz felírt differenciálegyenletek és ezek megoldásai csak bizonyos megszorításokkal érvényesek. A legfontosabb feltételek a magyar hegesztők szakmai bibliájában, a Baránszky-Jób Imre által szerkesztett Hegesztési Kézikönyv [5] 37. oldalán és a Szunyogh László által szerkesztett Hegesztés és rokon technológiák c. hegesztési kézikönyv [6] 38. oldalán megtalálhatók, ezért ezek felsorolásától itt eltekintek.

2.3. A 3D modell

A nagytestmodell állandósult hőmérsékletének leírására viszonylag egyszerű összefüggés szolgál:

$$T = T_0 + \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R} \cdot e^{-\frac{v_h \cdot (x+R)}{2 \cdot a}} \quad (3)$$

A hővezetés domináns szerepe mellett a csekély jelentőségű felületi hőátadás (konvekció) a nagytestmodellnél elhanyagolható. A számításra alkalmas összefüggés állandósult állapotot feltételez (a hőtranzienst jelenségek csak a hegesztés első és utolsó egy-két másodpercére korlátozódnak, vagyis arra az időre, amikor a varratszélesség változik). A három főirányban megvalósuló és azonos mértékű hővezetés miatt a koordináta-rendszer origójától mért radiális irányú R távolság:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4)$$

2.4. A 2D modell

A vékonylemez modellnél a hővezetés meghatározó jellege elvész, a nagyobb felület/térfogat viszony miatt a konvekció szerepe felértékelődik. A kis vastagságirányú méret miatt a z irányú hőmérsékletváltozás elhanyagolható, ezért az origótól mért távolság is egyszerűsödik:

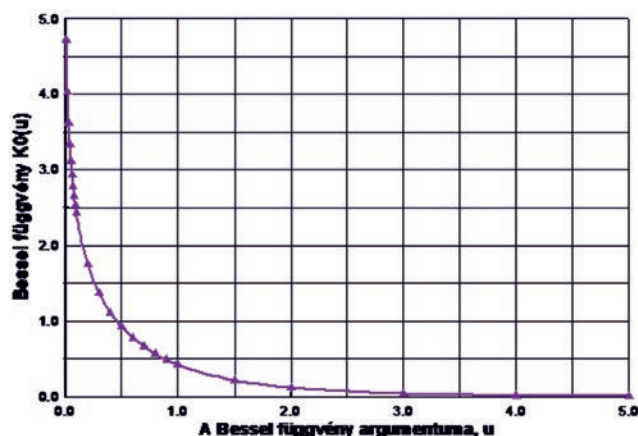
$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

A vékonylemez-modell állandósult állapotát leíró hőmérsékletfüggvény a következő alakú:

$$T = T_0 + \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot e^{-\frac{v_h \cdot x}{2 \cdot a}} \cdot K_0(u) \quad (6)$$

A $K_0(u)$ módosított, II. fajú, nullad-rendű Bessel-függvény u argumentuma:

$$u = r \cdot \sqrt{\frac{v_h^2}{4 \cdot a^2} + \frac{2 \cdot \alpha_f}{c_p \cdot \rho \cdot a \cdot s}} \quad (7)$$



2. ábra: A módosított, II. fajú, nullad-rendű Bessel-függvény. A függvény a pozitív u értékek növekedésével aszimptotikusan tart a nullához

A $b(s)$ hőmérsékletátadási tényező definiálásával az u argumentum egyszerűbb és áttekinthetőbb alakra hozható:

$$b = \frac{2 \cdot \alpha_f}{c_p \cdot \rho \cdot s}, \text{ mértékegysége: } \frac{1}{s} \quad (8)$$

$$u = r \cdot \sqrt{\frac{v_h^2}{4 \cdot a^2} + \frac{b}{a}}, \text{ mértékegység nélkül.} \quad (9)$$

A hőmérsékletmező leírására szolgáló összefüggés a T_0 kezdeti vagy előmelegítési hőmérsékletet követően három függvény szorzatából áll.

Az első függvény a hőfizikai állandókon kívül a Φ hőáramot és az s lemeztvastagságot tartalmazza: az előbbivel egyenes arányban, az utóbbival fordított arányban változik. Mértékegysége: $^{\circ}\text{C}$

A második exponenciális függvény pozitív x -re csökkenő, negatív x koordinátára növekvő értékeket ad, mivel a v_h hegesztési sebesség és az a hőmérsékletvezetési tényező mindig pozitív előjelű. Mértékegység nélkül.

Az igazi bonyodalmat a $K_0(u)$ Bessel-függvény jelenti. A függvény u argumentuma csak pozitív előjelű változókat (r , v_h , s) és konstansokat (a , α_f , c_p , ρ) tartalmaz. Mértékegység nélkül.

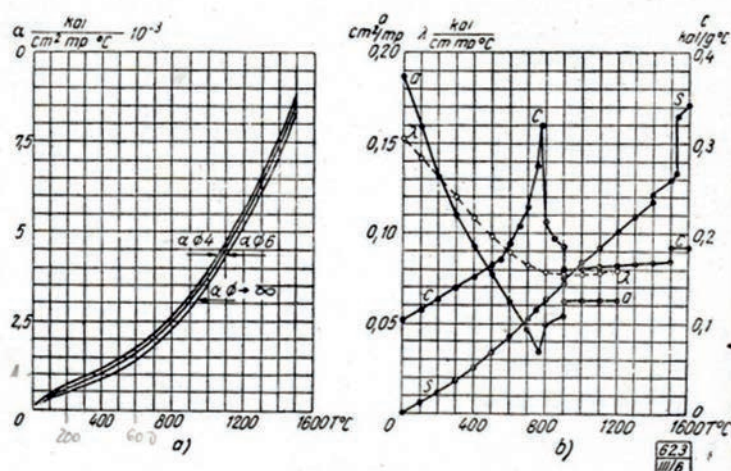
A hőfizikai jellemzők (a , α_f , c_p , ρ) között ott találjuk az α_f felületi hőátadási tényezőt is, amelyik a 2D modell egyik sajátossága. A változók közül az r távolság és a v_h hegesztési sebesség növelő, az s falvastagság csökkentő hatású.

2.5. A módosított, II. fajú, nullad-rendű Bessel-függvény

A $K_0(u)$ Bessel-függvény menete a 2. ábrán látható [7].

2.6. Hőfizikai jellemzők

A számításokhoz szükség van a hegesztendő tárgy anyagának (esetünkben a szerkezeti acélok) hőfizikai jellemzőire. A számításokat nehezíti, hogy a hőfizikai jellemzők



3. ábra: A szerkezeti acélok hőfizikai jellemzőinek hőmérsékletfüggése [8]

A mértékegység neve	A mértékegység jele	Számérték a régi egységben	Számérték az SI egységben
Hővezetési tényező	λ	$0,1 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}}$	$0,04186 \frac{\text{W}}{\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}}$
Fajhő (állandó nyomáson)	c_p	$0,1274 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$	$0,530955 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$
Sűrűség	ρ	$7,85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$0,00785 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$
Felületi hőtáadási tényező	α_f	$0,0008 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}}$	$0,00003349 \frac{\text{W}}{\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$
Hőmérsékletvezetési tényező (hődiffúzió)	a	$0,1 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	$10 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$

1. táblázat: A szerkezeti acélok átlagos hőfizikai jellemzői a régi CGS és az új SI rendszerben

Megnevezés	Jelölés	Mértékegység	Számérték
Hegesztő eljárás	VFI	–	135
Lemezvastagság tartomány	$s_{\min} - s_{\max}$	mm	1-10
Hegesztő áramerősség	I_h	A	125
Ívfeszültség	U_{iv}	V	20
Hegesztési sebesség	v_h	mm/s	2
Termikus hatásfok	η_t	–	0,8
y koordináta	y	mm	0
Hőáram	Φ	W	2000
Vonalenergia	E_v	J/mm	1000
Kezdeti hőmérséklet	T_0	$^\circ\text{C}$	20

2. táblázat: A számításokhoz alkalmazott hegesztési mintapélda adatai

nem csak a hőmérséklettel változnak, de értéküket jelentősen befolyásolják a fázisátalakulások is (3. ábra [8]).

A hőfizikai konstansok tekintetében a szakirodalmi adatok meglehetősen sokfélék. A továbbiakban ezért a Hrenov-féle adatokkal számolunk [9]. Az SI rendszer (Système International d'Unités) bevezetése előtti mértékegységek SI megfelelői az 1. táblázatban találhatók.

A megjelölt forrás 0 és 1500 °C közötti intervallumra átlagolt hőfizikai adatai a 3. ábrához hasonlóan a régi mértékegység rendszerben vannak megadva, ezért ezeket át kell számítanunk a nemzetközileg 1960-ban elfogadott és Magyarországon 1976 után kötelezően alkalmazott SI rendszerre.

2.7. Hőmérséklet eloszlás a negatív x tengelyen

A hőmérséklet eloszlás grafikai szemléltetéséhez az anyag hőfizikai konstansain kívül a hőbeviteli adatokra is szükség van. Ennek kiszámítására vegyünk egy hegesztési példát, amely a 2D-re jellemző lemezvastagság tartományban alkalmazható (2. táblázat).

A 2. táblázat adataival kiszámított hőmérsékleteket a 4. ábra szemlélteti négyféle ($s = 4, 6, 8, \text{és } 10 \text{ mm}$) lemez-

vastagságra. A hőmérsékletek a tárgy felületén ($z = 0$), a hőforrás mögötti negatív x tengelyen ($y = 0$) található pontokat jellemzik.

A hőmérsékletek az x koordináta abszolút értékének növekedésével csökkennek, a görbe hűléssebességgel arányos érintőjének meredeksége a hőforrástól távolodva abszolút értékben csökken. A lemezvastagság növelésével a hőmérsékletek mérséklődnek, a hegfürdő hőforrás mögötti mérete csökken.

A szerkezeti acélok olvadáspontját (helyesebben likvidusz hőmérsékletét) 1500 °C-szal közelítve az ábráról a hegfürdő hőforrás mögötti mérete is leolvasható. A 2D modell hőmérsékletei csak szilárd állapotú acélra érvényesek, ezért az 1500 °C fölötti görbeszakaszokat nem ábrázoltuk.

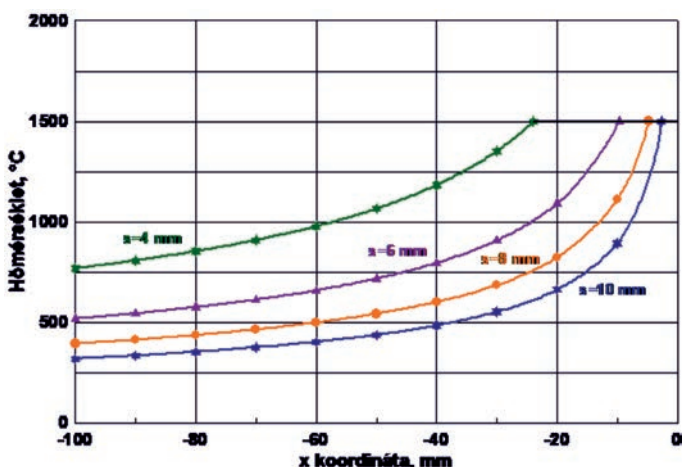
Az 1500 °C-hoz tartozó, a lemez felületén értelmezett x koordináták a hegfürdő végpontjait jelölik. A két koordi-

Lemezvastagság s , mm	A hegfürdő vége $-x(T = 1500^\circ\text{C})$	A hegfürdő eleje $x(T = 1500^\circ\text{C})$	A hegfürdő hossza l_h , mm
2	-60,28	6,21	66,49
4	-21,39	3,83	25,22
6	-9,24	2,57	11,81
8	-4,68	1,78	6,46
10	-2,61	1,25	3,86

3. táblázat: A hegfürdő végpontjainak x koordinátái és a hegfürdő hossza különböző lemezvastagságoknál a mintapélda (2. táblázat) adataival számolva ($\alpha_f \neq 0$)

Lemezvastagság s , mm	A hegfürdő vége $-x(T = 1500^\circ\text{C})$	A hegfürdő eleje $x(T = 1500^\circ\text{C})$	A hegfürdő hossza l_h , mm
2	-102,15	6,36	108,51
4	-23,92	3,88	27,80
6	-9,64	2,59	12,23
8	-4,79	1,80	6,59
10	-2,65	1,26	3,91

4. táblázat: A hegfürdő végpontjainak x koordinátái és a hegfürdő hossza különböző lemezvastagságoknál a mintapélda (2. táblázat) adataival számolva, a felületi hőtáadás elhanyagolásával ($\alpha_f = 0$)



4. ábra: A 2D modell hőmérséklet eloszlása a negatív x tengelyen, különböző lemezvastagságoknál a mintapélda (2. táblázat) adataival számolva

náta abszolút értékének összege a hegfördő hosszát adja. A 3. táblázatból megfigyelhető, hogy a hegfördő hosszak mennyire érzékenyek a falvastagság csökkenésére.

A 2D modell egyik alapvető sajátossága a felületi hőtáadás. Ennek befolyásoló hatásának vizsgálatára az 1500 °C-hoz tartozó -x és +x koordinátákat a konvekció elhanyagolásával is kiszámítottam (4. táblázat).

A 3. és 4. táblázat összehasonlításával megállapítható, hogy a konvekció elhanyagolásával a hűlés lelassult és a hegfördő hosszabb lett. A különbségek a várakozásnak megfelelően a vékony lemezeknél nagyobbak, mivel itt a felület/térfogat arány nagyobb, ezért a konvekció hatása jelentősebb.

Az előzők illusztrálására rajzoltam meg az 5. ábrát, amelyen a konvekció nélküli kék görbe a felületi hőtáadást figyelembe vevő magenta színű vonal alatt halad.

3. Hűléssebesség, mint a hegesztőmérnök számára legfontosabb hőciklus információ

A hegesztendő tárgy hegesztésekor egy varratba eső, vagy ahhoz közeli P pontban a hőmérséklet először gyorsan emelkedik, elér egy maximumot, majd a hővezetésnek és a konvekciónak megfelelően lassabban hűl. A pont hőmérsékletének változása hőciklust alkot, mivel a hőmérséklet bizonyos idő elteltével a kiindulási hőmérsékletre hűl vissza (6. ábra).

A hőciklus ($T = T(t)$) függvény bármely pontjában az idő szerinti derivált (geometriailag a pontbeli érintő) a hőmérsékletváltozási (hevítési vagy hűlési) sebességet adja.

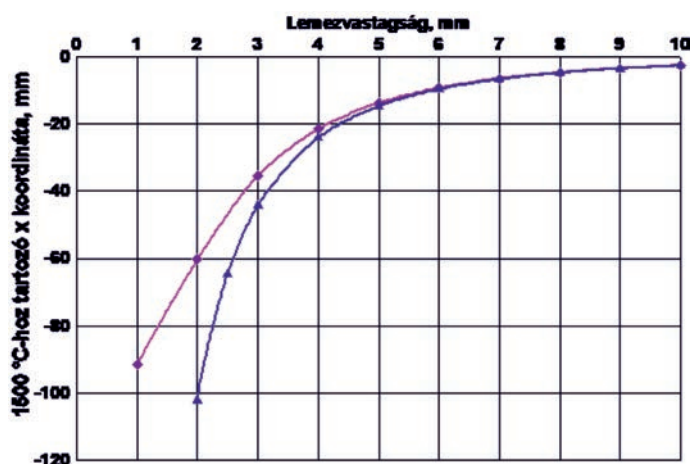
$$\text{hevítési sebesség: } w = \frac{dT}{dt} > 0,$$

$$\text{hűléssebesség: } w = \frac{dT}{dt} < 0.$$

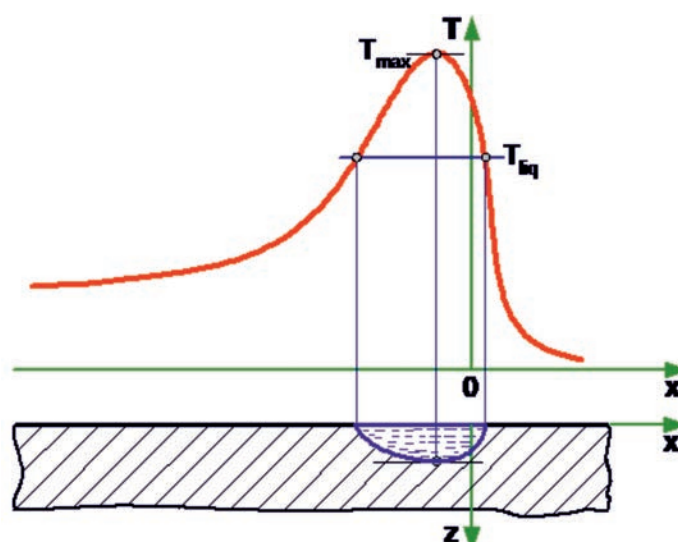
A két sebesség közül a hegesztőmérnök számára a hűléssebesség bír nagyobb jelentőséggel, mivel a CCT diagramoknak megfelelően szignifikáns hatással van többek között a varratban és a hőhatásövezet kritikus sávjában kialakuló szemcse- és szövetszerkezetre, az alakváltozásokra és belső feszültség létrejöttére.

A 6. ábra szerint a w hűléssebesség hőmérsékletfüggő. Gondos mérlegelést igényel, hogy a várható anyagszerkezeti változások szempontjából milyen hőmérsékleten érvényes hűléssebességet tekintünk relevánsnak.

Az amerikai Welding Handbook minden indoklás nélkül az 1020 °F (~550 °C) mellett foglal állást [11]. A tekintélyes Metals Handbook kézikönyvsorozat hegesztéssel foglalkozó VI. kötete a CCT diagramok orrpontját megemlítve a 400-1000 °F (~204-538 °C) hőmérsékletintervallumot jelöli meg olyan hőmérsékletként, amelyik szétválasztja az ausztenit átalakulása során keletkező perlitet és felső bénitet a martenzittól és az alsó bénittól [12].



5. ábra: Az 1500 °C-hoz tartozó -x koordináták a konvekció figyelembevételével (magenta) és a konvekció nélkül (kék)



6. ábra: A hegfördőben elhelyezkedő pont hőciklusa [10]. Ötvözeteknél a T_{liq} likvidusz hőmérséklet a szívfémek olvadáspontját helyettesíti

Tisza M. a hűléssebesség számításának javasolt hőmérsékletét a CCT diagramok orrpontjához tartozóan adja meg [13]. (Az orrpont az a legkisebb időkoordinátához tartozó pont, ahol a hűlésgörbe először érinti a CCT diagram valamelyik mezejét).

A metallográfiai tudomány magyar nagyjai közül is kiemelkedő Zorkóczy professzor a bal oldali érintési pont (az orrpont) változó hőmérséklete helyett egyezményesen az 500 °C-os hőmérsékletet javasolja: Az 500 °C választása azért célszerű, mert az acélok túlnyomó részénél a perlitte bomlás eddig a hőmérsékletig már befejeződik [14].

A Baránszky-Jób Imre szerkesztette Hegesztési Kézikönyv 1985-ös kiadásában a hűléssebesség számításának hőmérséklete ügyében nem foglal állást, de az átlagos hűlésidő meghatározásához ajánlott hőmérséklet intervallum alsó határát 500 °C-ban adja meg [5].

A Szunyogh László szerkesztette Hegesztés és rokon technológiák (továbbiakban MHK) szintén nem ad meg ilyen konkrét hőmérsékletet, de a hőmérséklet intervallumra vonatkoztatott átlagos hűléssebesség számításakor az 500 °C-os határt javasolja [6].

Összegzés jelleggel tehát megállapíthatjuk, hogy a hűléssebesség meghatározásának célszerű hőmérséklete 500 °C, és ez a hőmérséklet nem önkényesen választott, hanem a CCT diagramok orrpontjával kapcsolatos.

3.1. A 3D modell hűléssebessége

A 3D modellhez tartozó P pont állandósult hőmérsékletének egyenlete:

$$T = T_0 + \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R} \cdot e^{-\frac{v_h}{2a} \cdot (x+R)} \quad (10)$$

Vizsgáljuk a hűlési sebességet a szokásos egyszerűsítő feltevéssel a hegfürdő felületi szimmetriatengelyében, vagyis a negatív x tengelyen ($y = 0; z = 0$). Ez egy célszerű választás, mivel a hőmérsékletgradiens itt a legnagyobb, ebből következően a hűléssebesség (abszolút értéke) is itt a legnagyobb [15].

Ekkor az R távolság:

$$R = \sqrt{(-(x)^2 + 0^2 + 0^2)} = x \quad (11)$$

Helyettesítsük be a hőmérséklet képletébe:

$$T = T_0 + \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot x} \cdot e^{-\frac{v_h}{2a} \cdot (-x+x)} = T_0 + \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot x} \cdot 1 \quad (12)$$

A hűléssebességet a közvetett függvényekre érvényes differenciálási szabály szerint határozzuk meg.

$$w_{3D} = \frac{dT}{dt} = \frac{dT}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v_h \cdot \frac{dT}{dx} \quad (13)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(-1 \cdot \frac{1}{x^2} \right) \quad (14)$$

$$w_{3D} = -v_h \cdot \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{x^2} \quad (15)$$

Fejezzük ki a hőmérséklet képletéből az $1/x$ -et:

$$\frac{1}{x} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\Phi} \cdot (T - T_0) \quad (16)$$

Helyettesítsük be az $1/x$ -re kapott kifejezést a hűléssebesség képletébe:

$$w_{3D} = -v_h \cdot \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot \lambda)^2}{\Phi^2} \cdot (T - T_0)^2 \quad (17)$$

Egyszerűsítések után, a vonalenergia (a varrat hosszegységére bevitt hőenergia, alternatív elnevezéssel fajlagos hőbevétel) definícióját ($E_v = \Phi / v_h$) is felhasználva:

$$w_{3D} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{E_v} \cdot (T - T_0)^2 \quad (18)$$

A 3D modell hűléssebességére kapott (18) egyenletből látható, hogy adott fémötvözetnél a hűléssebesség a vonalenergiától, a kiindulási (környezeti vagy előmelegítési) hőmérséklettől és a pillanatnyi hőmérséklettől függ.

A hegesztési mintapéldánk adataival ($E_v = 1000 \text{ J/mm}$ és $T_0 = 20 \text{ °C}$) $T = 500 \text{ °C}$ -on:

$$\begin{aligned} w_{3D} &= -\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{E_v} \cdot (T - T_0)^2 = \\ &= -\frac{2 \cdot \pi \cdot 0,04186}{1000} \cdot (500 - 20)^2 \cong -60,338 \text{ °C/s} \end{aligned} \quad (19)$$

3.2. A 2D modell hűléssebessége

A nagyméretű tárgy hűléssebességét tetszőleges P pontban, vagy, ahogy bemutattuk, a hegfürdő felületi középvonalában egyszerűen számíthatjuk. Nem ilyen könnyű a helyzet a 2D modellnél, mivel a hőmérsékletmezőt leíró képlet három függvény szorzatából áll, közöttük a nem differenciálható $K_0(u)$ Bessel-függvényből.

$$T = T_0 + \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot e^{-\frac{v_h \cdot x}{2a}} \cdot K_0(u) \quad (20)$$

Ahhoz, hogy a függvény differenciálásával a hűléssebességet előállítsuk, egyszerűsítésekre és elhanyagolásokra van szükség.

3.2.1. A Bessel-függvény helyettesítése a Hankel-sorral

A $K_0(u)$ Bessel-függvény Hankel szerint a következő sorral közelíthető [8]:

$$K_0(u) = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot u}} \cdot e^{-u} \cdot \left[1 - \frac{1^2}{1! \cdot (8 \cdot u)^1} + \frac{1^2 \cdot 3^2}{2! \cdot (8 \cdot u)^2} - \frac{1^2 \cdot 3^2 \cdot 5^2}{3! \cdot (8 \cdot u)^3} + \frac{1^2 \cdot 3^2 \cdot 5^2 \cdot 7^2}{4! \cdot (8 \cdot u)^4} - \dots \right] \quad (21)$$

Amennyiben a legegyszerűbb megoldást választjuk, és a (21) Hankel-sor zárójeles részének csak az első tagját vesszük figyelembe, akkor a következő alakot kapjuk:

$$K_0(u) = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot u}} \cdot e^{-u} \cdot [1] = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot u}} \cdot e^{-u} \quad (22)$$

Ez az egyszerűsített alak jól kezelhető, pozitív u -ra folytonos, differenciálható és az u változóra nézve egy hiperbola és egy csökkenő exponenciális függvény szorzatából áll. Ez a közelítés $u < 1$ -re rossz, de $u = 1$ -nél 9,5 %-os, $u > 1$ -nél a pontos értékhez képest csak jóval 10%-on belüli eltérést okoz.

3.2.2. A Bessel-függvény argumentumának egyszerűsítése

Ahogy azt korábban bemutattuk, a Bessel-függvény u argumentuma meglehetősen összetett.

$$u = r \cdot \sqrt{\frac{v_h^2}{4 \cdot a^2} + \frac{2 \cdot \alpha_f}{c_p \cdot \rho \cdot a \cdot s}} \quad (23)$$

Ha eltekintünk a konvekciótól ($\alpha_f = 0$), ami a nagyobb lemezzvastagságoknál egyre mérsékeltébb hatású, akkor az u függvény egy jól kezelhető, egytagú alakot vesz fel.

$$u = r \cdot \sqrt{\frac{v_h^2}{4 \cdot a^2} + 0} \quad (24)$$

A gyökvonás elvégzése után az

$$u = r \cdot \frac{v_h}{2a} \quad (25)$$

alakot kapjuk, amelyet behelyettesítünk az egytagú Hankel-sorral helyettesített Bessel-függvény egyenletébe.

$$K_0(u) = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot u}} \cdot e^{-u} = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot \frac{r \cdot v_h}{2a}}} \cdot e^{-\frac{r \cdot v_h}{2a}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{r \cdot v_h}} \cdot e^{-\frac{r \cdot v_h}{2a}} \quad (26)$$

Az egyszerűsítések fájdalmas veszteségeként jelenik meg, hogy a Bessel-függvényben a konvekció elhanyagolása mellett az u argumentum lemezzvastagság függését elveszítettük.

3.2.3. A 2D modell egyszerűsített hőmérséklet egyenlete

Helyettesítsünk vissza a kétdimenziós hőmérsékletmező (20) képletébe:

$$\begin{aligned} T &= T_0 + \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot e^{-\frac{v_h \cdot x}{2a}} \cdot K_0(u) = \\ &= T_0 + \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot e^{-\frac{v_h \cdot x}{2a}} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h \cdot r}} \cdot e^{-\frac{v_h \cdot r}{2a}} = \\ &= T_0 + \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h \cdot r}} \cdot e^{-\frac{v_h \cdot (x+r)}{2a}} \end{aligned} \quad (27)$$

Az egyszerűsített hőmérsékletszámító összefüggés most is három függvény szorzatából áll, de már nem tartalmazza a differenciálás szempontjából kezelhetetlen Bessel-függvényt.

3.2.4. Az egyszerűsített 2D modell hűléssebessége

Ha a 3D modellnél megismert egyszerűsítéssel élve a negatív x tengely pontjainak hűléssebességére vagyunk kíváncsiak, akkor a hőmérsékletfüggvényünk tovább egyszerűsödik.

$$r = \sqrt{-(x)^2 + 0} = x \quad (28)$$

Helyettesítsük be a hőmérséklet képletébe:

$$\begin{aligned} T_{2D \text{ simp}} - T_0 &= \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h \cdot x}} \cdot e^{-\frac{v_h \cdot (-x+x)}{2a}} = \\ &= \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h \cdot x}} \cdot e^0 = \\ &= \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h \cdot x}} \cdot 1 \end{aligned} \quad (29)$$

A végeredmény:

$$T_{2D \text{ simp}} - T_0 = \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h \cdot x}} \quad (30)$$

A közvetett függvények deriválási szabályát, a láncszabályt alkalmazva:

$$\omega_{2D \text{ simp}} = \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = v_h \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (31)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (T_{2D \text{ simp}} - T_0) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h \cdot x}} \right) \quad (32)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h}} \cdot \frac{1}{\sqrt{x}} \right) \quad (33)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \left(\frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h}} \right) \cdot \left(-\frac{1}{2} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{x^3}} \quad (34)$$

Fejezzük ki a hőmérséklet (30) képletéből az $1/\sqrt{x}$ -et:

$$\frac{1}{\sqrt{x}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s}{\Phi} \sqrt{\frac{v_h}{\pi \cdot a}} \cdot (T_{2D \text{ simp}} - T_0) \quad (35)$$

Ezzel a hűléssebesség:

$$\omega_{2D \text{ simp}} = v_h \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = - \left(\frac{\Phi \cdot v_h}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h}} \right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{x}} \right)^3 \quad (36)$$

s, mm	$w_{2D \text{ sim}} \text{ } ^\circ\text{C/s}$	s, mm	$w_{2D \text{ sim}} \text{ } ^\circ\text{C/s}$
1,0	-0,12	12,5	-18,86
2,0	-0,48	15,0	-27,16
3,0	-1,09	17,5	-36,97
4,0	-1,93	20,0	-48,29
5,0	-3,02	22,357	-60,337
6,0	-4,35	22,5	-61,11
7,0	-5,91	25,0	-75,45
8,0	-7,73	27,5	-91,29
9,0	-9,78	30,0	-108,64
10,0	-12,07	32,5	-127,50

5. táblázat: A 2D modell hűléssebességei a mintapélda adataival, 500°C-on, a közelítő képlet szerint

Helyettesítsük be az $1/\sqrt{x}$ -re kapott kifejezést a (36) egyenletbe:

$$\begin{aligned} w_{2D \text{ simp}} &= -\left(\frac{\Phi \cdot v_h}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h}}\right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{x}}\right)^3 = \\ &= -\left(\frac{\Phi \cdot v_h}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h}}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s}{\Phi} \sqrt{\frac{v_h}{\pi \cdot a}} \cdot (T - T_0)\right)^3 = \\ &= -\left(\frac{\Phi \cdot v_h}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h}}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s}{\Phi}\right)^3 \cdot \sqrt{\frac{v_h}{\pi \cdot a}} \cdot \frac{v_h}{\pi \cdot a} \cdot (T - T_0)^3 \end{aligned} \quad (37)$$

A lehetséges egyszerűsítések után:

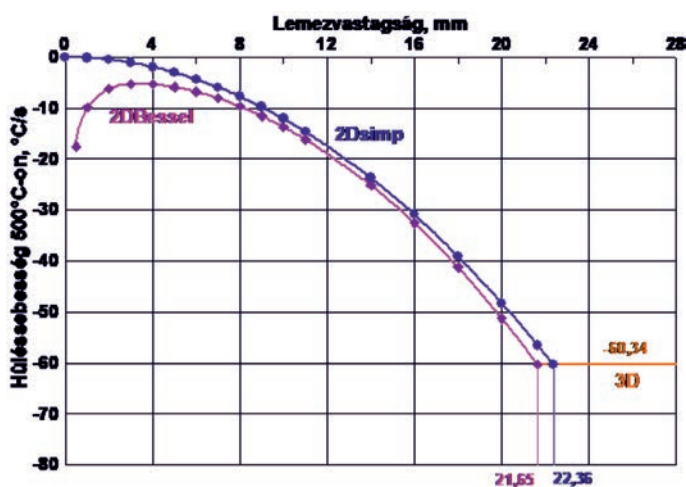
$$\begin{aligned} w_{2D \text{ simp}} &= -\left(\frac{\Phi \cdot v_h}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{v_h}}\right) \cdot \frac{8 \cdot \pi^3 \cdot \lambda^3 \cdot s^3}{\Phi^3} \cdot \sqrt{\frac{v_h}{\pi \cdot a}} \cdot \frac{v_h}{\pi \cdot a} \cdot (T - T_0)^3 = \\ &= -\left(\frac{2 \cdot v_h^2 \cdot \pi \cdot \lambda^2 \cdot s^2}{a \cdot \Phi^2}\right) \cdot (T - T_0)^3 = \\ &= -\left(\frac{2 \cdot v_h^2 \cdot \pi \cdot \lambda^2 \cdot s^2}{\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \cdot \Phi^2}\right) \cdot (T - T_0)^3 = \\ &= -\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c_p \cdot \rho \cdot s^2}{E_v^2}\right) \cdot (T - T_0)^3 \end{aligned} \quad (38)$$

A végeredmény:

$$w_{2D \text{ simp}} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c_p \cdot \rho \cdot s^2}{E_v^2} \cdot (T - T_0)^3 \quad (39)$$

Ez az az alak, amelyik a legtöbb kézikönyvben, így a magyar hegesztési kézikönyvekben is szerepel, anélkül, hogy az egyszerűsítéseket és azok eredményre gyakorolt hatását a szerzők bemutatnák.

Ha összehasonlítjuk a negatív x tengely pontjainak a 3D modellel és az egyszerűsített 2D modellel számított hűléssebességeit, akkor a következőket állapíthatjuk meg:



7. ábra: A Bessel-függvényes és az egyszerűsített képlettel számított hűléssebességek 500°C-on, a mintapélda adataival számolva

1. A 2D modellnél a hűléssebességet a hővezetési tényezőn kívül a fahő és a sűrűség is befolyásolja;
2. A 2D modell hűléssebessége függ a lemeztvastagságtól, a nagytestmodellé nem;
3. A hűléssebesség a 3D modellnél a pillanatnyi és a kiindulási hőmérséklet különbségének négyzetétől, a 2D modellben a köbétől függ.

A vékonylemez modellre levezetett egyszerűsített képlettel, a hegesztési mintapélda adataival, különböző lemeztvastagságoknál, $T = 500^\circ\text{C}$ -on kiszámítottam a hűléssebesség értékeit (5. táblázat).

3.2.5. Az eredeti (Bessel-függvényes) 2D modell hűléssebessége

Mivel a 2D modell eredeti Bessel-függvényes alakja nem differenciálható, az 500°C -on érvényes hűléssebességét numerikusan, a differencia módszerrel lehet meghatározni.

$$w_{2D 500} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{v_h}} = \frac{v_h \cdot \Delta T}{\Delta x} \quad (40)$$

Legyen a ΔT hőmérséklet $T_1 = 500 - 10 = 490^\circ\text{C}$ és $T_2 = 500 + 10 = 510^\circ\text{C}$ különbségként 20°C . Ekkor a mintapélda $v_h = 2 \text{ mm/s}$ hegesztési sebességével számolva:

$$w_{2D 500} = -\frac{v_h \cdot (510 - 490)}{x_{490} - x_{510}} \quad (41)$$

Az iterációs pontosságot $0,01 \text{ mm}$ -re választva a w hűléssebességek elegendő pontosságú közelítését kapjuk. Az iterációval meghatározott w_{2D} és a közelítő képlettel számított $w_{2D \text{ simp}}$ hűléssebességeket és a közöttük lévő százalékos eltéréseket a 6. táblázatban foglaltam össze.

A 6. táblázat adatait a 3D modellel jellemző falvastagság-független hűlési sebesség megadásával a 7. ábrán szemléltetem.

A 7. ábra menetéből jól látszik, hogy amíg az egyszerűsített képlettel számított $w_{2D \text{ simp}}$ hűléssebességek abszolút értékei a lemeztvastagsággal négyzetesen növekednek (mivel a hővezetéssel távozó hőmennyiség a lemeztvastagsággal növekvő lemeztérfogattal arányos), addig a Bessel-függvénnyel számított w_{2D} hűléssebességek a mínusz végtelenből induló maximumos görbével simulnak bele a közelítő függvény parabolájába. A két függvény közötti különbség kb. 8 mm -nél csökken 2°C/s alá. A két görbe a 3D modell lemeztvastagságtól független $-60,34^\circ\text{C/s}$ -os hűléssebességét $21,65$, illetve $22,36 \text{ mm}$ -nél metszi, vagyis a két metszésponti koordináta között az eltérés kisebb, mint 4% .

Mivel a két görbe első szakaszának menete erősen különbözik, a diagram kezdeti szakaszát felnagyítottam (8. ábra).

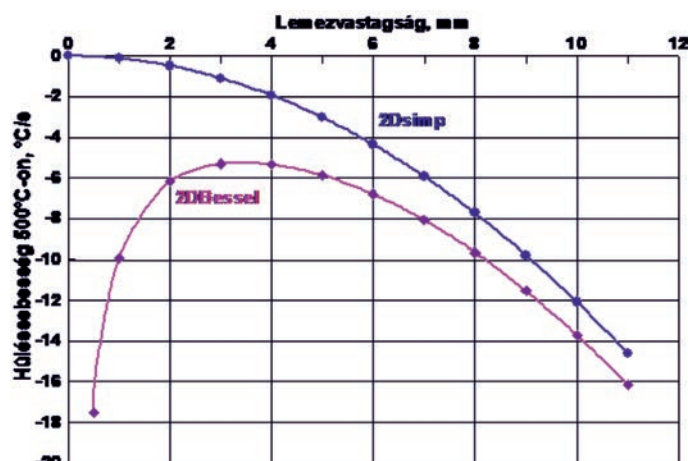
A Bessel-függvényes hűléssebesség görbe maximumos (a negatív előjelű hűléssebesség abszolút értékeit tekintve minimumos) jellegű, a jelen hőfizikai és technológiai adatok

s	x(490°C)	x(510°C)	delta x	w _{2D}	w _{2Dsimp}	Eltérés, %
1	-192,77	-188,73	-4,04	-9,90	-0,12	98,8
2	-201,50	-195,00	-6,50	-6,15	-0,48	92,2
4	-142,00	-134,53	-7,47	-5,35	-1,93	63,9
6	-87,67	-81,78	-5,89	-6,79	-4,35	35,9
8	-55,13	-50,98	-4,15	-9,64	-7,73	19,8
10	-36,53	-33,61	-2,92	-13,70	-12,07	11,9
12	-25,44	-23,32	-2,12	-18,87	-17,38	7,9
14	-18,45	-16,860	-1,59	-25,16	-23,66	6,0
16	-13,82	-12,590	-1,23	-32,52	-30,90	5,0
18	-10,62	-9,650	-0,97	-41,24	-39,11	5,2
20	-8,33	-7,55	-0,78	-51,28	-48,29	5,8
21	-7,42	-6,72	-0,70	-57,14	-53,23	6,8
21,50	-7,018	-6,345	-0,673	-59,435	-55,800	6,1
21,60	-6,941	-6,274	-0,667	-59,970	-56,320	6,1
21,65	-6,902	-6,239	-0,663	-60,332	-56,58	6,2
21,70	-6,864	-6,204	-0,660	-60,606	-56,840	6,2
22	-6,64	-6,00	-0,64	-62,50	-58,43	6,5
22,36	-6,39	-5,77	-0,62	-64,52	60,337	6,5

6. táblázat: A Bessel-függvényes és az egyszerűsített képlettel számított hűléssebességek 500 °C-on, a mintapélda adataival számolva

mellett a maximumpont 3 és 4 mm között helyezkedik el. A maximumos görbemenet azzal magyarázható, hogy a két hűléssebesség alakulásában két ellentétes hatás összegződik. A kisebb lemeztvastagságoknál a felület/térfogat viszony szám relatív nagysága a felületi hőátadás dominanciájára utal, ezért van a vékonyabb lemezeknél nagyobb abszolút értékű hűléssebesség. A nagyobb lemeztvastagsággal együtt járó nagyobb térfogatoknál a hővezetés dominanciája érvényesül, ezért a hűléssebesség abszolút értéke újra növekszik.

Ez a maximumos görbemenet a közelítő képletnél nem érvényesül, ezért a vékony lemeztvastagságoknál a közelítő képlettel számított értékek félrevezetőek. A két görbe közeledése olyan relatív lemeztvastagság tartományban



8. ábra: A 7. ábra bal felső részének kis lemeztvastagságokra vonatkozó nagyított változata

($\tau = 0,4 - 0,8$) valósul meg, ahol már a szakirodalmi adatok szerint a vékonylemez modell nem alkalmazható. A vékonylemez modell alkalmazhatósági határát a mértékadó [10] irodalom $\tau < 0,4$ -ben határolja be. (A τ relatív falvastagság definíció szerint a tényleges falvastagság és a 2D és 3D modellek közötti határfalvastagság hányadosa [10]).

4. Határfalvastagság a 2D és 3D modell között

A 6. táblázatban feltüntettük azt az $s_{h2D/3D}$ lemeztvastagságot, ahol a 2D és 3D modell hűléssebességei azonosak. A két modell közötti határfalvastagság definíció szerint az a vastagság, ahol az 500 °C-on érvényes két hűléssebesség megegyezik [11]:

$$w_{2D} = w_{3D} \quad (42)$$

A vékonylemez modellnél az egyszerűsített képlettel számolva:

$$-\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c_p \cdot \rho \cdot s_{h2D/3D}^2}{E_v^2} \cdot (T - T_0)^3 = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{E_v} \cdot (T - T_0)^2 \quad (43)$$

Innen:

$$s_{h2D/3D} = \sqrt{\frac{E_v}{c_p \cdot \rho \cdot (T - T_0)}} \quad (44)$$

Mivel a T hőmérsékleten érvényes határ az adott fémötözetre (pl. acélra) jellemző fajhőn és sűrűségeken kívül még a technológiai paraméterektől (Φ , T_0) is függ, kijelenthető, hogy nincs abszolút határ a vékonylemez és nagytest modell között, vagyis nincs vékonylemez és vastaglemez, csak vékonylemez-ként vagy vastaglemez-ként viselkedő tárgy.

Behelyettesítve a határfalvastagság képletébe a mintapéldánk adatait:

$$s_{h2D/3D} = \sqrt{\frac{E_v}{c_p \cdot \rho \cdot (T - T_0)}} = \sqrt{\frac{1000}{0,004186 \cdot 0,00785 \cdot (500 - 20)}} \cong 22,36 \text{ mm} \quad (45)$$

A 6. táblázat és 7. ábra szerint ez a vastagsághatár a valóságban 21,65 mm, vagyis az eltérés nem jelentős.

A vékonylemez modell használhatósági tartományát (max. 8-10 mm) ez az érték nagymértékben meghaladja, ami arra utal, hogy a vékonylemez modell és a nagytest modell között léteznie kell egy harmadik, köztes modellnek, amelyet szerző korábbi munkáiban 2,5D-s modellnek nevezett el [16, 17, 18].

Összefoglalás

A vékonylemezek hegesztési hőfolyamatainak leírására szolgáló, Rosenthal és Rykalin nevéhez köthető 2D-s modell állandósult hőmérsékletmezőjének összefüggése három

függvény szorzatát tartalmazza, ráadásul a számítóképlet kezelési nehézségeit egy speciális Bessel-függvény tovább fokozza. A magyar hegesztési kézikönyv két utolsó kiadására koncentrálna a figyelmet, a 2D-s modell alkalmazhatóságára vonatkozóan a következők állapíthatók meg.

1. A hegesztési folyamat hőciklusának legfontosabb jellemzője a hőmérsékletfüggő hűléssebesség, amelynek ismeretében a CCT diagramokból fontos információk nyerhetők. A kiemelt hőmérséklet 500 °C, amely a jól hegeszthető (ezért alacsony karbontartalmú) szerkezeti acélok CCT diagramjai átlagos orrpont-hőmérsékletének tekinthető.
2. A hűléssebesség a hőmérsékletmodellek állandósult hőmérsékletmezőjét leíró egyenlet idő szerinti deriválásával számítható. Ez a művelet a 3D-s nagytest modell esetében könnyedén végrehajtható és pontos eredményt ad.
3. A 2D-s vékonylemez modell állandósult hőmérsékletmezőjének összefüggése három függvény szorzatát tartalmazza, közöttük a nem differenciálható másodfajú, nullad-rendű, módosított Bessel-függvényt, ezért a modell hűléssebességét analitikusan nem lehetséges meghatározni.

A 2D-s modell számítóképletének egyszerűsítő átalakításával olyan közelítő alak nyerhető, amelyből a hűléssebesség a negatív x tengelyen meghatározható. Az így meghatározott hűléssebességek csak közelítésnek tekinthetők. Erről a tényről a magyar hegesztési kézikönyv két kiadása nem tesz említést, így az olvasók tájékoztatása pontatlannak tekinthető.

A 2D modell 500 °C-os hűléssebessége az eredeti hőmérsékletfüggvényből numerikus módszerrel meghatározható. A pontos és az egyszerűsített hűléssebességek diagramja a lemeztvastagság függvényében eltérő lefutású: a pontos hűléssebesség maximumos görbével, a közelítő parabolikusan növekvővel jellemzett.

A pontos és a közelítő hűléssebességek közötti különbségek a kis lemeztvastagságoknál jelentősek, nagyobb lemeztvastagságoknál csökkenő tendenciát mutatnak és abszolút értékük akár tíz százalék alá is csökkenhet.

A 2D-s és 3D-s modell közötti határ az eredeti függvényvel számított 500 °C-os hűléssebességek alapján határozható meg. A valós hegesztési esetekben ez a határ messze meghaladja a 2D-s modell alkalmazhatóságát, amelynek felső határa a határvastagság mindössze negyven százalékára (vagyis maximum 8-10 mm-re) tehető.

A 2D-s és a 3D-s modell között így létrejövő (mintegy) hatvan százalékos rés egy új elmélet, az ún. 2,5D-s modell megalkotásának szükségességét jelzi.

A hegesztőmérnökök és más, a hegesztéssel foglalkozó szakemberek hiteles tájékoztatása érdekében a magyar hegesztési kézikönyvek legközelebbi kiadásában a vé-

konylemezek hőfolyamataira vonatkozó információkat korrigálni szükséges. Addig az időpontig ez a Hegesztéstechnika cikk a témában hiánypótlásnak tekinthető.

Irodalom

- [1] Killing, R.: Welding Processes and Thermal Cutting. English Edition. Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2001
- [2] Balogh A.; Kirk, C.S.; Mileham, A. R.: A New Heat Flow Model for Medium Size Plates. GÉP, Vol. IL (1998), No. 6., p.: 20 to 25 (in English)
- [3] Rosenthal, D. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting, Welding Research Supplement 20 (1941), No 5, p.: 220-s to 234-s (1935: in French; 1941: expanded in English)
- [4] Rykalin, N. N.: Teplovie oszнови szvarki. Izdanie Akademii Nauk, USSR, 1947 (in Russian)
- [5] Baránszky-Jób I. (szerk): Hegesztési kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985
- [6] Szunyogh L. (szerk): Hegesztés és rokon technológiák Kézikönyv. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 2007
- [7] Abramowitz, M.; Stegun I. A.: Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, Dover, 1965
- [8] Nikolaev, G. A.: Hegesztés. Nehézipari Könyv- és Folyóiratkiadó Vállalat, Budapest, 1952, p: 230
- [9] Bagrjanszkij, K. V.; Dobrotina, Z. A.; Hrenov, K. K.: Teorija szvarocsnih processzov, Izdatelszkoe Obedinenie "Visa Skola", 1976
- [10] Balogh A.; Sárvári J.; Schäffer J.; Tisza M. (szerk): Mechanikai Technológiák. Miskolci Egyetemi Kiadó, 2003
- [11] American Welding Society, Welding Handbook, Ninth Edition, Volume I, Cynthia L. Jenney, Anette O'Brien (Editors), Miami, Florida, 2001
- [12] ASM International, Handbook Committee, American Society for Metals, Metals Handbook, Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering, Edition 9, 2011
- [13] Tisza M.: Introduction to Materials Sciences. University Publisher, Miskolc, 2000
- [14] Zorkóczy B.: Metallográfia és anyagvizsgálat. Tankönyvkiadó, Budapest, 1968
- [15] Palotás B.; Gyura L.: A hegesztési hőbevitel meghatározása ötvözetlen és gyengén ötvözött acélok esetében a hidegrepedés elkerülésére. Hegesztéstechnika, III (1992), 4. p.: 13-17
- [16] Kirk, C. S., Improvements in quality through weld thermal cycle modelling. PhD Thesis, University of Bath, 1997
- [17] Balogh, A.: A hűléssebesség számítása középvastag lemezek hegesztésekor. Hegesztéstechnika, IX (1998), No. 4. p.: 11 to 15
- [18] Balogh A., Kirk, C. S., Görbe Z: Role of cooling time when steels to be welded require controlled heat input. Gép, Vol. L. (1999), No. 5., p.: 44-50 (in English)