

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet
Anyag- és Alakítástechnológiai Szakcsoport



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**HEGESZTETT VARRATOK LEHŰLÉSI
SEBESSÉGEINEK MÉRÉSE ÉS NUMERIKUS
MODELLEZÉSE**

Szerző: **Harangozó József**
gépészmérnök BSc.
CAD/CAM/CNC szak, V. évf.

Konzulensek: **Dr. Réger Mihály**
egyetemi tanár, AGI intézetigazgató
Kuti János
HSZI igazgató

Budapest, 2014.



Tartalom

Bevezető.....	2
1. A lehűlés vizsgálatának gyakorlati jelentősége	3
2. Hőmérő eszközök.....	5
2.1. Ellenálláshőmérők.....	5
2.2. Termisztorok.....	5
2.3. Termoelemek.....	5
2.4. Pirométerek.....	6
3. Hőmérséklet mérése termoelemmel.....	6
4. Hegesztési munkadarabok előkészítése.....	8
5. Alkalmazott hegesztő eljárás.....	9
6. A mérőrendszer felépítése	10
7. A mérés menete	12
8. A hőmérsékletszámítás algoritmus.....	13
9. Modellezés	14
9.1. Háromdimenziós modell létrehozása.....	14
9.2. A modell parametrizálása	16
9.2.1. Anyagtulajdonságok (Material properties)	16
9.2.2. Peremfeltételek megadása (Boundary conditions)	16
9.2.3. Kezdeti feltétel megadása (Initial conditions).....	17
9.2.4. Igénybevételek felvétele (Loadcases).....	18
10. Eredmények, következtetések.....	19
10.1. Mérési eredmények.....	19
10.1.1. Adatok kijelölése.....	19
10.1.2. Regisztrátumok	19
10.2. Modellezési eredmények.....	21
10.2.1. Szemrevételezés	21
10.2.2. Adatok kijelölése.....	22
10.2.3. Következtetések.....	25
Összefoglaló	26
Irodalomjegyzék	27



Bevezető

A rohamosan fejlődő numerikus modellezési rendszerek alkalmazásával ma már nagy bonyolultságú összetett folyamatok matematikai modellezése is megbízhatóan elvégezhető. Az egyik legösszetettebb modellezési feladatot a hegesztés jelenti, mivel többféle, egymással kölcsönhatásban álló folyamatok (hőhatás, anyagbevitel, átalakulások, alakváltozások) zajlanak le. A problémakör bonyolultsága ellenére jól megválasztott virtuális modellekkel és feltételekkel a reális hegesztési folyamat valóságghűen írható le.

A Tudományos Diákköri tevékenységem alapvető célja, hogy numerikus modell alkalmazásával a valós körülmények között hegesztett varratok környezetében kialakuló hőmérsékletváltozást megbízható módon becsülni tudjam. Ennek érdekében egyrészt jól definiált, egyszerű geometriájú, termoelemekkel felszerelt próbatesteken jól definiált hegesztési körülmények között hegesztési kísérleteket végeztem, és közben a próbatestben kialakuló hőmérsékleti adatokat regisztráltam, másrészt a valós viszonyok adataival felépítettem az elvégzett kísérleti hegesztések matematikai modelljét. A hegesztett próbatest adott pontjában mért és az ugyanezen pontra számított hőmérsékleti adatok összevetése lehetőséget ad a modell paraméterek finomítására és a matematikai modell validálására.

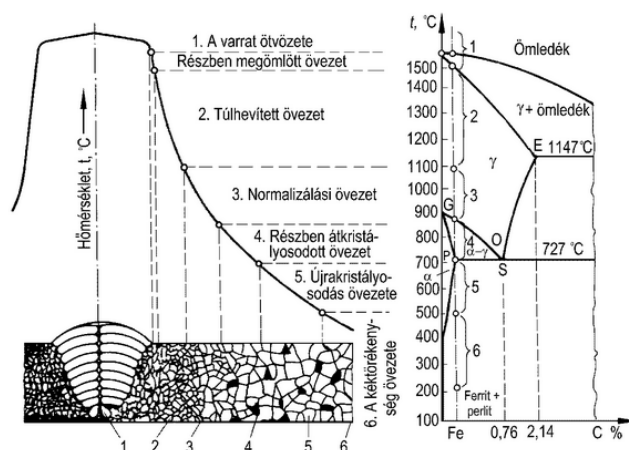
A modellek felépítéséhez és a szimulációs feladatok megoldásához a Marc Mentat véges elemes modellező szoftvert alkalmaztam. A modellezés validációja céljából végzett kísérleti próbatestek fogó elektródás kézi ívhegesztéssel készültek.

Dolgozatom elkészítésében, a mérések és szimulációk futtatásában nyújtott segítségéért köszönettel tartozom Dr Réger Mihány, Kuti János és Mucsi András tanár uraknak.

1. A lehűlés vizsgálatának gyakorlati jelentősége

A különböző hegesztési eljárások során az anyagban jelentős hő- és erőhatással járó összetett folyamatok játszódnak le. Ömlesztő hegesztési technológiák esetében különösen igaz, hogy a hőhatások és erőhatások eloszlása a munkadarabban egyenlőtlen, ez a hely és az idő függvényében folyamatosan változó igénybevételt ad.

A hegesztett kötések tulajdonságait a bennük végbemenő hőciklusok és az anyag reakciói határozzák meg. A hegesztés hőtani vizsgálatának mindenkor célja meghatározni, hogy az alkalmazott hőforrás által milyen hőmérsékletmező jöhet létre és ez az idő függvényében hogyan viselkedik, milyen hőciklusok játszódnak le. A hegesztés hőciklusai határozzák meg a varrat dermedését, valamint az alapanyag hőkezelési állapotát, így a kötés szövetszerkezeti és feszültség-állapot változásait is (1.ábra).



1.ábra: Kis C tartalmú acél szövetszerkezete lehűléskor

A hőhatásövezetben végbemenő folyamatok közül a szemcsedurvulásnak, az újrakristályosodásnak, az allotróp átalakulások befolyásának, valamint a szegregációs folyamatnak van döntő jelentősége.

Az acélok jellegzetesen allotróp fémek anyagok. Az acélok hegesztése történhet közel egyensúlyi vagy nem egyensúlyi állapotban, hőkezeltségüktől függően. Közel egyensúlyi állapotban a repedések és az edződés elkerülése érdekében nagy fajlagos hőbevitellel kell hegesztetni. Ezen kívül a lehűlési sebesség csökkentése végett előmelegítést is szokás alkalmazni. A nem egyensúlyi, például nemesített darabok hegesztésénél az anyag szövetszerkezeti változása a megeresztési (t_m) hőmérséklet elérésével kezdődik, így a nemesítéssel kapott szilárdságnövekedés az A_{cl} elérésére elvész ^[1].



A hegesztett szerkezetek lehűlését, azonos értelemben vett keménységét többek között az alábbi tényezők befolyásolják:

- az anyag hőfizikai tulajdonságai
- a hegesztéssel bevitt hő
- az anyagvastagság
- a környezeti hőmérséklet

A lehűlési idő kritikus értékét az a hűlési sebesség határozza meg amely a hegesztett kötésben mechanikai túlterhelést, például eredményez. Vékony lemezek esetén a lehűlési idő a hőbevitel $\left(Q, \left[\frac{kJ}{mm}\right]\right)$, a lemezvastagság (s , [mm]), az előmelegítési hőmérséklet (T_0 [°C]) ismeretében számítható. Meghatározott hőbevitel mellett az anyag 800°C-ról 500°C-ra történő hűlése alatt eltelt idő az alábbi összefüggés alapján számítható ki:^[2]

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \cdot T_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{Q^2}{s^2} \left[\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right] \cdot F_2$$



2. Hőmérő eszközök

A hőmérséklet mérésének két alapvető technológia rendszere az érintkezéses (kontakt) hőmérés és érintésmentesen a sugárzó hő mérése. A kontakt hőmérő közvetlenül érintkezik a mérendő testtel. Ilyen típusú hőmérők az ellenállás hőmérők, félvezető hőmérők (termisztorok), termoelemek. A sugárzó hő mérésekor a mérőeszköz és a munkadarab között nincs fizikai kapcsolat, ezek a hőmérők a pirométerek^[3].

2.1. Ellenálláshőmérők

Az ilyen típusú hőmérők a hőmérséklet értékeket elektromos ellenállás méréseéből vezetik le. A rendszer alapja egy közismert tény, miszerint a fémek ellenállása a hőmérséklet növekedésével emelkedik. Azonban az ellenállásváltozás nem csak a hőmérséklet emelkedésétől függ, hanem a fém rácsszerkezetének változásától is. A kristályrács megváltozását a hőigénybevétel mellett a fém szennyeződései, a mechanikai behatások is befolyásolják.

Ellenálláshőmérő csak nagy tisztaságú fémből készülhet. Az erre a célra alkalmazott alapanyagok a réz, a nikkel és a platina. A mérőfej lehet lapos vagy hengeres alakú. Az ellenállásvezetékét valamilyen hőálló szigetelőanyagra, kerámiára vagy üvegre csévélik fel. A műszer pontszerű mérésekhez nem használható^[4].

2.2. Termisztorok

Félvezető anyagból készülnek. Termisztorral a rajta átfolyó áramerősséget mérjük. Két típusa van, a PTK (Positive Temperature Coefficient) és az NTK (Negative Temperature Coefficient). A PTK típusú termisztoron mért ellenállása meghatározott hőmérséklettartományban növekszik, ha a hőmérséklet nő. Az NTK termisztor ellenállása ezzel szemben a hőmérséklet növekedésével csökken. A félvezető anyagok ellenállása magas hőmérséklet hatására csökken, ezért ezeket a műszereket csak a környezeti hőmérséklethez közeli tartományban alkalmazzuk (0-150°C)^[4].

2.3. Termoelemek

A termoelemek két különböző anyagú vezetőből állnak. A forrasztási pontban a vezetőn termofeszültség keletkezik. A termofeszültség az érintkezési pontok és a hidegpont hőmérséklet különbségének és az alkalmazott anyagösszetételnek a függvénye, ezt a vezető mentén létrejövő hőmérsékleteloszlás nem befolyásolja. A termoelemek által szolgáltatott feszültség: néhány mV/100 °C. Az alkalmazási hőmérséklet akár 1300 °C is lehet.



2.4. Pirométerek

A pirométerek a mérendő testből emittáló hősugárzást észlelő eszközök. Az anyag által kibocsájtott sugárzás mennyisége az anyagminőség és a hőmérséklet függvénye. A mérőeszköz detektáló képességét minden annak útjába kerülő elem rontja, akkor legmegfelelőbb a mérés, ha csak a mérendő test van a detektor látómezőjében. A detektorok csak azt a sugárzási hullámhosszt érzékelik amit az érzékelő el tud nyelni.

A hegesztési hőfolyamatban nem állandósult állapotú hőmérsékleti mező alakul ki, melynek változása a varrat közelében – térben és időben is – a legintenzívebb. Ha a hegesztett darab adott pontjában a felületi hőmérsékletet, illetve annak időben változását szeretnénk nyomon követni a 20-1300 °C-os hőmérsékleti tartományban, akkor lényegében csak a termoelemes és a pirométeres (hőkamerás) mérés jöhet szóba. A szerelt, védőburkolattal ellátott termoelemek időállandója a gyors hőmérsékletváltozás nyomon követését nem teszi lehetővé, így azok nem alkalmazhatók. A hőkamerás és pirométeres rendszerek igen érzékenyek a felületminőségre, pl. felületi oxidréteg kialakulása esetén pontatlan mérés adódik.

Mérlegelve a kutatási feladat specialitásait és a szükséges mérési megbízhatóság szintjét, a hőmérsékletmérést 0,15 mm átmérőjű termoelem szálak ponthegesztésével végeztük.

3. Hőmérséklet mérése termoelemmel

„A hőelem két különböző anyagú, egymással összeforrasztott huzal. forrasztási pontjában a hőmérséklettel arányos és a huzalok anyagától függő elektromotoros erő (hőelektromotoros erő, termofeszültség) fejlődik. A hőelemes hőmérsékletmérő rendszer zárt áramkör, melyben a különböző anyagú huzaloknak több, de legalább két találkozási helyük, kötési pontjuk van. A mérhető hőelektromotoros erő a kötési pontokban keletkező hőelektromotoros erők algebrai összege. A hőelem pozitív szára az a szár, mely a tiszta platínával ugyanazon hőmérsékletkülönbség mellett a másik szárnál nagyobb, pozitív hőelektromotoros erőt (termofeszültséget) ad.” [4]



A termofeszültség jelenséget felfedezőjéről Seebeck effektusnak is szokás nevezni.

A termofeszültség a hőmérséklet függvényében (0°C -hoz viszonyítva):

$$U(t, 0) = \alpha t + \frac{\beta}{2} \cdot t^2 + \frac{\gamma}{3} \cdot t^3$$

Az α, β, γ állandókat méréssel lehet meghatározni. Ehhez egy három pontos termofeszültség mérés szükséges.

Az érzékenység:

$$\dot{E} = \alpha + \beta \cdot t + \gamma \cdot t^2$$

Az érzékenység a hőmérséklet függvénye, így a termofeszültség a hőmérséklet nemlineáris függvénye^[5].

A termoelemek csak elektromosan jól szigetelt környezetben helyezhetők el. A hidegpont hőmérsékletének állandó értéken tartása igen fontos, hiszen a termofeszültség a melegpont és a hidegpont hőmérsékletkülönbségével arányos. Hidegpontként általában olvadó jeget, forrásban lévő víz gőzét használnak, de sok esetben a szobahőmérséklet, mint hideg pont is megfelelő. Hegesztési hőmérsékletek mérésekor a hidegpontnak a szobahőmérsékletet szokás tekinteni.

Ha a termoelem és a jelfeldolgozó egység egymástól távol helyezkedik el, akkor a jeltorzulás elkerülése érdekében kompenzációs vezetékkel kell alkalmazni. Ezek olyan ötvözetből készülhetnek, melyek termoelektromos tulajdonságaikban megegyeznek a termoelem anyagával. Minden termoelem anyagnak megvan a saját kompenzációs vezeték anyagpárja.

Ha a hőelemet sokat használjuk magas hőmérsékleten (500°C felett), akkor idővel csökken a termofeszültség. Értéke két év alatt akár a felére is lecsökkenhet. Ezt a jelenséget a termoelem összetételének megváltozása okozza, ugyanis a hőelem komponensei a forrasztási felületen keresztül diffundálnak.

A termoelemek anyaga fém vagy félvezető lehet. Leggyakrabban fémből készült hőelemeket alkalmazunk. Bármely két fémből készülhet hőelem, azonban csak egy adott számú szabványos hőelem használatos, amelyek előre látható feszültséget szolgáltatnak nagy hőmérséklet tartományban. Az egyes hőelem típusok feszültség-hőmérséklet értékpárjait a termopotenciál sorból olvashatjuk ki. A termopotenciál sor a különböző fémek és a platina között ébredő termofeszültség értékeket tartalmazza (2.ábra).



K^oC

K típusú hőelem - a termoelektromos feszültség, mint a hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$] függvénye
Hőegypont - 0 $^{\circ}\text{C}$

$^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$^{\circ}\text{C}$
Termoelektromos feszültség [mV]												
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889	-40
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527	-30
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156	-20
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778	-10
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392	0
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397	0
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798	10
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203	20
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612	30
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023	40

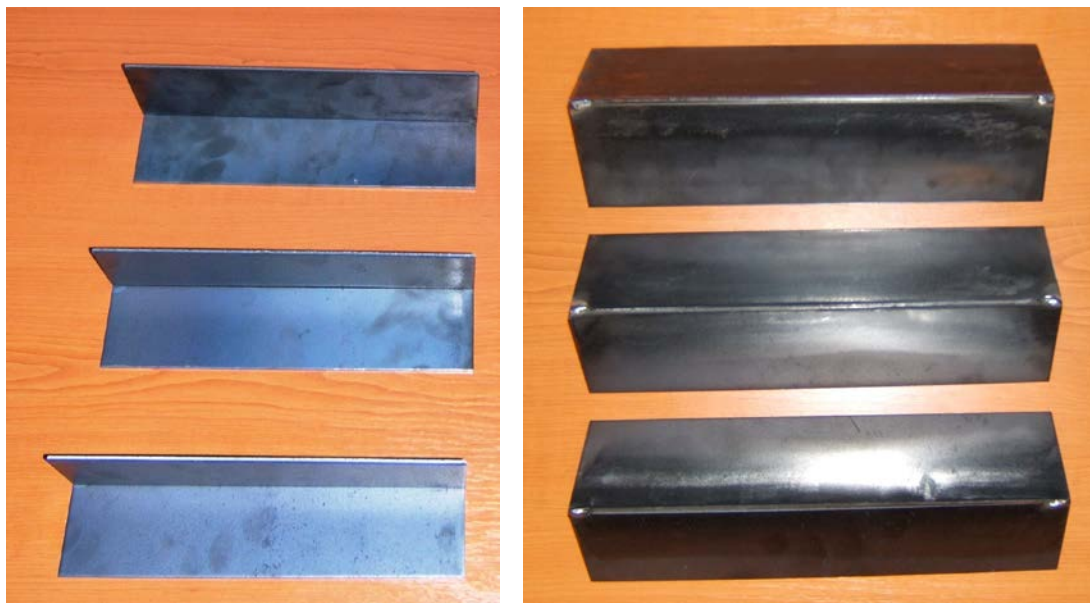
2.ábra: K típusú hőelem termopotenciál sora a $[-40^{\circ}\text{C}; 40^{\circ}\text{C}]$ hőmérséklettartományban

4. Hegesztési munkadarabok előkészítése

A hegesztési kísérletekhez használt próbadarabok anyaga S235 anyagminőségű, hidegen hengerelt általános rendeltetésű szerkezeti acél.

Minden lemez $3 \times 60 \times 250$ mm méretű. A lemezeket $1000\text{mm} \times 2000\text{mm}$ -es táblából lemezolló gép segítségével vágtam ki.

A lemezek egyik oldalát a termoelemek megfelelő kötésének biztosítása érdekében lecsiszoltam. A lemezeket fűzővarratokkal rögzítettem egymáshoz a lemezek érintkező élének sarokpontjaiban. A függőleges elem oldaléle teljes szélességében felfekszik a vízszintes elem felületén (3.ábra).



3.ábra: A fűzővarratokkal ellátott sarokgeometria

5. Alkalmazott hegesztő eljárás

A próbadarabok hegesztéséhez fogyóelektrodás védőgázos kézi ívhegesztő berendezést használtam. A hegesztőgép típusa KEMPPI Minisystem MP2400 MIG, MM20 huzalelőtoló egységgel. Az alkalmazott védőgáz UN1013 jelű szén-dioxid gáz. A huzalelektroda típusa Böhler EMK6 (Ø0,8 mm) általános felhasználású rézbevonatos elektróda (EN ISO 440:1995: G3Si1).

Beállítások:

- Huzalelőtoló sebesség 5,5
- áramerősség átlagértéke 130 A
- Gáz áramlási sebesség 10L/perc



4.ábra: Az alkalmazott hegesztőberendezés

6. A mérőrendszer felépítése

A hőmérsékletváltozás mérésére K-típusú (NiCr-Ni) hőelemeket használtam. A nikkell-króm általános célú hőelem, -200°C - 1200°C hőmérséklettartományban alkalmazható. Termoelektromos érzékenysége $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.

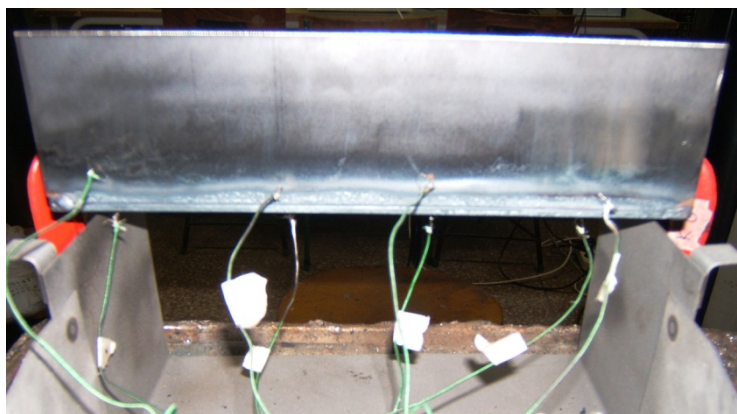
Az elemeket kisüléssel elven működő kondenzátoros gép segítségével hegesztettem fel a munkadarabokra (5.ábra).



5.ábra: Termoelem hegesztő gép



A hőelemek a munkadarabok előzetesen lecsiszolt hátfelületére megközelítőleg egyenlő távolságban kerültek fel (6.ábra). A felhelyezés során arra törekedtem, hogy az egyes termoelemek vezetősálai a lehető legközelebb kerüljenek egymáshoz, pontszerű érintkezési felületet létrehozva. A rögzítés után az elemek két vezetősálának szabad végein eső feszültségkülönbséget multiméterrel ellenőriztem, a szálszakadás és az elégtelen felhelyezésből eredő hibák elkerülésének érdekében.



6.ábra: A termoelemek rögzített helyzete (a hegesztés után)

A megfelelő merevség és az elemek helyzetének biztosítása céljából a próbadarabokat tartóegységhez rögzítettem. A tartó és a munkadarab két ponton érintkezik (7.ábra).

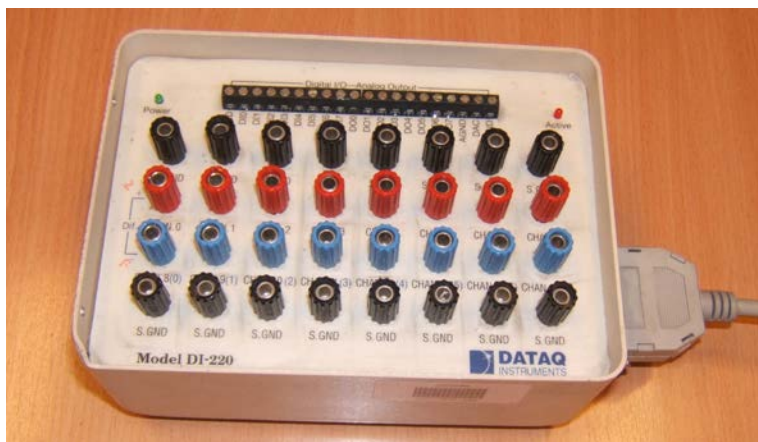


7.ábra: A próbadarab befogása

A termoelemek szabad végeit adatgyűjtőhöz csatlakoztatva az érintkezés helyén keletkező potenciálkülönbséget számítógépes szoftver segítségével regisztrálni tudtam.



A hardver típusa DATAQ Instruments DI-220 típusú nyolc csatornás adatgyűjtő egység, a regisztrátumokat WinDaq szoftverrel dolgoztam fel (8.ábra).



8.ábra: DATAQ Instruments DI-220 adatgyűjtő egység



9.ábra: Az adatgyűjtő-munkadarab összeköttetés termoelemekkel

7. A mérés menete

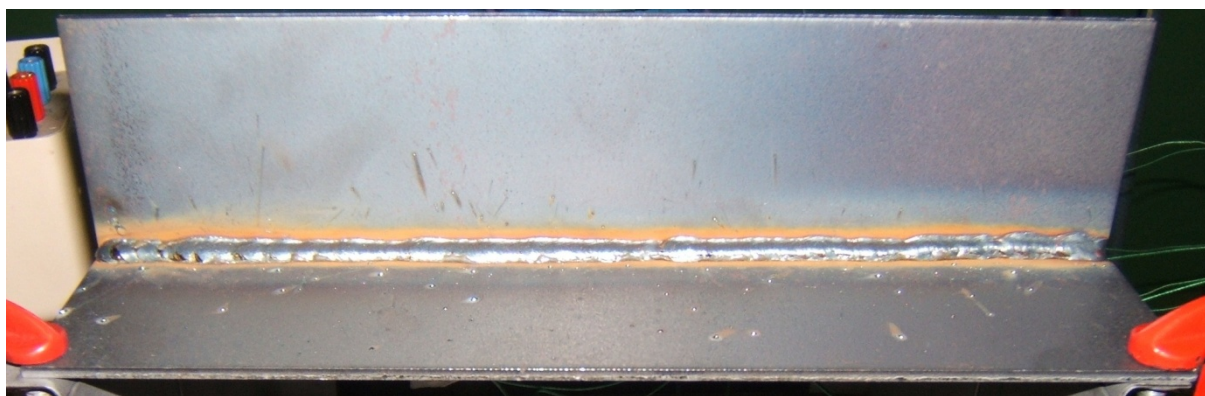
A hegesztési kísérletek során öt darab sikeres mérés végeztem el. Azokat a méréseket számítom sikeresnek, ahol a felhegesztett nyolc darab hőelemből legalább öt a helyén maradt, tehát nem olvadt le, vagy pattant le a próbadarabról.

A regisztrátumok adatsorainak könnyebb azonosítása érdekében minden termoelem érintkezési pontját megmértem a darab széleihez viszonyítva, valamint a munkadarab leemelésekor esetlegesen leváló elemek pontos helyzetét is rögzítettem.



Az adatgyűjtő szoftver elindítása után ellenőriztem, hogy van-e jel minden csatornán, majd újraindítva a regisztert megkezdtem a hegesztést. Az adatok regisztrálásának időtartama minden mérés esetén 30 perc. A véges elem modellek időfüggő terheléseinek beállításához szükségem volt a hegesztési időkre is. Minden varrat hegesztési idejét stopperrel mértem, ezek átlagértéke adja a modellek teljes hőbeviteli idejének az összegét. A mérés során szellőztető berendezést nem használtam, a hegesztés zárt térben ment végbe, csak a mérési idő lejártá után kapcsoltam be a szellőztető rendszert.

A modellezéshez szükségem volt a munkadarab környezeti hőmérsékletére, melyet minden mérés előtt regisztráltam egyszerű szobahőmérő segítségével. Pontosabb eszközre itt nincs szükség, hiszen a százados nagyságrendű eltérések a varrat magas hőmérsékletéhez képest elhanyagolhatóak. Ezeknek a mért hőmérsékletnek az átlagértékét használtam fel a modellezés során.



10.ábra: Hegesztett sarokvarrat

8. A hőmérsékletszámítás algoritmusa

A jelfeldolgozó szoftver által regisztrált termofeszültség adatokat excel táblába kimentve az alábbi algoritmus segítségével hőmérséklet értékekké alakítottam:

$$\alpha + \beta \cdot U - \gamma \cdot U^2 + \delta \cdot U^3 + 20 = C^{\circ}$$

ahol: $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ a K típusú hőelemre jellemző termopotenciálok, melyek értékei:

$$\alpha = 1,62424 \text{ mV}$$

$$\beta = 25,59437 \text{ mV}$$

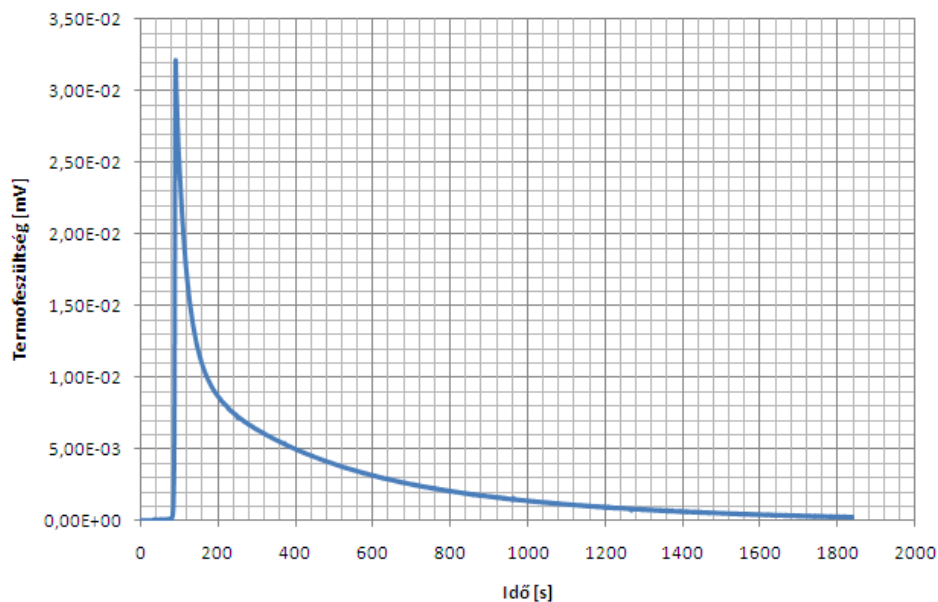
$$\gamma = 0,09619 \text{ mV}$$

$$\delta = 0,00154 \text{ mV}$$



így a harmadfokú polinom:

$$1,62424 + 25,59437 \cdot U - 0,09619 \cdot U^2 + 0,00154 \cdot U^3 + 20 = C^\circ$$

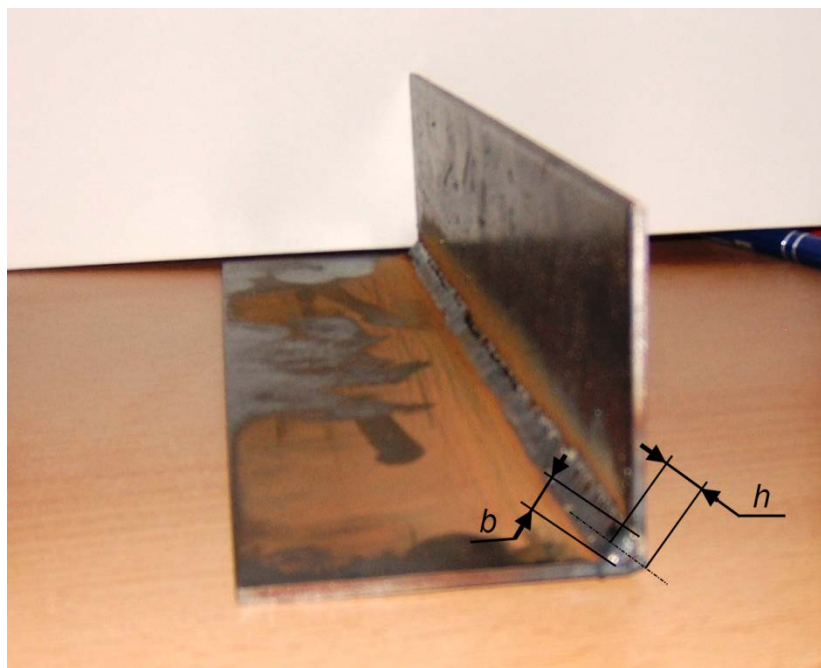


11.ábra: Az egyik vizsgált pont termofeszültség-idő görbéje

9. Modellezés

9.1. Háromdimenziós modell létrehozása

Mivel a próbadarabokat kézzel hegesztettem, ezért a varratok koronaoldali méretei nem egyeznek meg annak minden keresztmetszetében. Minden kész munkadarabon tolómérővel megmértem a varratszélességet, valamint a varrat középvonalában a korona magasságát a lemez gyökoldali lapjához képest (12.ábra). A tolómérő hozzáférhetőségi korlátai miatt két ponton, a varrat elején és végén mértem. A mérési eredményekből vett átlagértékek adták a modellezéshez szükséges varratgeometria értékeket (13.ábra).

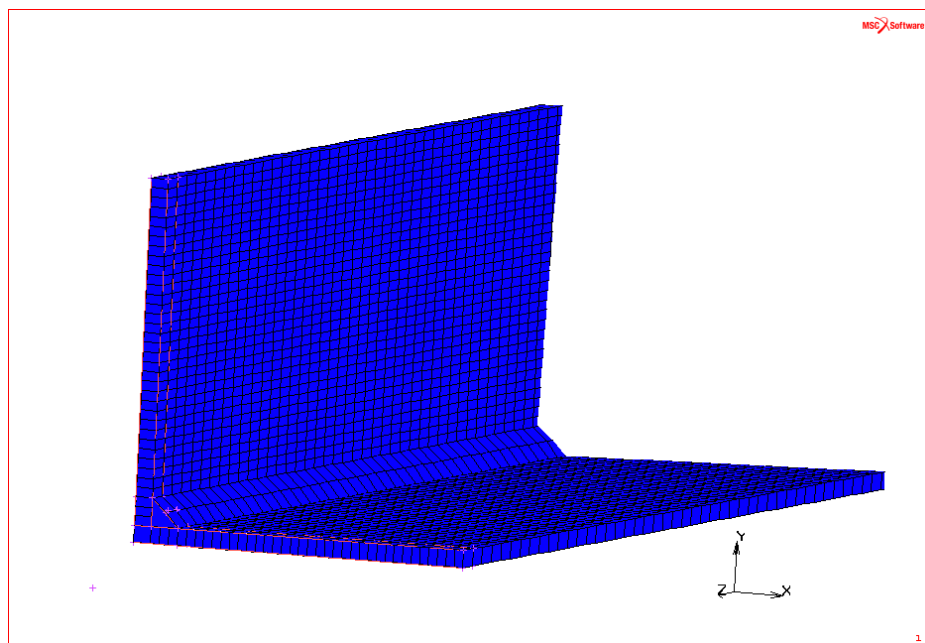


12.ábra: A varrat mérendő méretei

n	b ₁	b ₂	b̄	h ₁	h ₂	h̄
1	6,2	7,5	6,85	7,9	8,1	8
2	6,9	6,7	6,8	7,9	8,1	8
3	7,8	7,3	7,55	8,2	8,5	8,35
4	7	6,5	6,75	8,5	7,8	8,15
5	6,5	6,9	6,7	8	7,5	7,75
		b̄ _(n=1-5)	6,93		h̄ _(n=1-5)	8,05

13.ábra: A varratok mérettáblázata

A véges elemes modell létrehozásának első lépéseként felépítettem a csomóponti hálót egy elemszélesség kiterjedésben a próbalemezek méreteinek megfelelően, majd a fentebb említett átlagértékek segítségével kialakítottam a varratgeometriát. A csomópontok rendszerét elemekkel fedtem le. Kézi hálózást alkalmaztam, hexaéder alakú elemeket használtam. Az elemek mérete viszonylag nagy, azért nem alkalmazok nagyobb elemsűrűséget, mert a peremfeltételeket és azok aktiválódási idejének beállítását egyesével kell elvégezni. A hálózás után az egy elemszélességnek megfelelő kiterjedésű geometriát a próbadarabok hosszmeretének megfelelő értékre sokszoroztam (14.ábra).



14.ábra: A sarokgeometria háló

9.2. A modell parametrizálása

9.2.1. Anyagtulajdonságok (Material properties)

A hőfolyamat futtatásához speciális anyagfüggvényekre nincs szükség, valamint, mivel a Marc hegesztési modulját nem alkalmazhatom olyan modellek esetében, ahol nem definiált a legmagasabb hőmérséklet, így az anyagra jellemző állandók megadása elegendő^[6].

S235 anyagjellemzők:

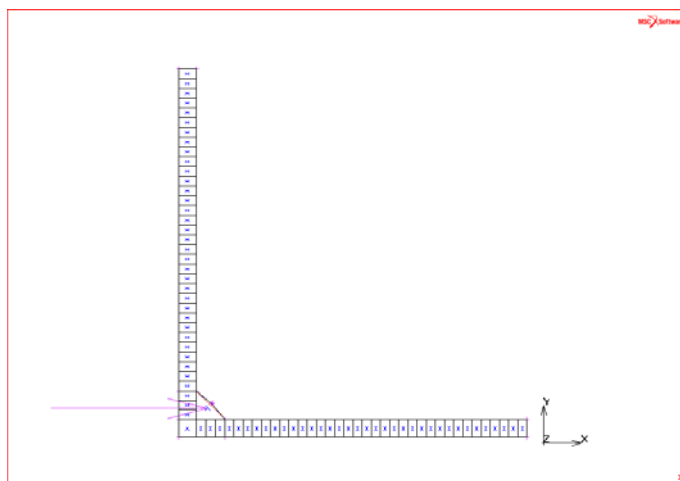
- fajhő: $500 \frac{J}{kg^{\circ}C}$
- anyagsűrűség: $7.85 \frac{kg}{dm^3}$
- hővezetési tényező: $0.04 \frac{W}{mm^{\circ}C}$

9.2.2. Peremfeltételek megadása (Boundary conditions)

A termikus peremfeltétel beállításához felvettem egy volumetrikus fluxust és annak intenzitását ($J/mm^3/s$), majd hozzárendeltem a varrat elemeit (15.ábra). Minden varratelem külön peremfeltételként szerepel, hiszen az összes varratelem egy időpillanatban nem lehet aktív. Az aktív elem után következő többi elem deaktivált állapotban van, egészen addig, amíg az adott elemre vonatkozó időfüggő hőterhelés (loadcase) le nem jár.

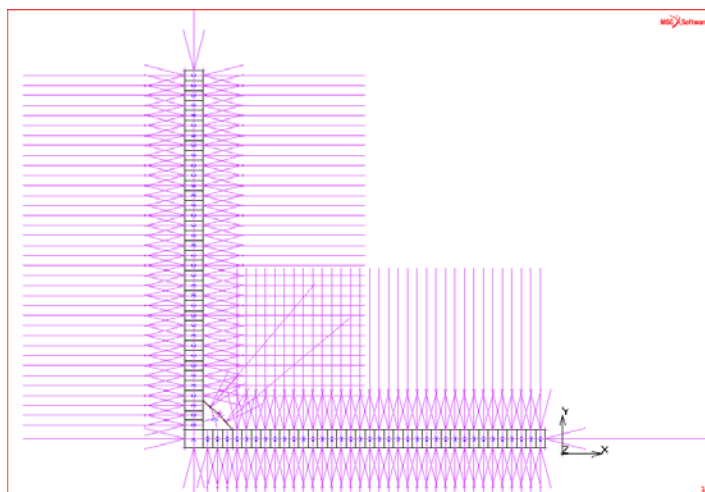


A MARC gyakorlata szerint a hőátadási analízis terhelései hőfluxusok, olyan skaláris mennyiségek, melyeket annak intenzitásával definiálunk^[7].



15.ábra: A termikus peremfeltétel ábrázolása

Fontos figyelembe venni a környezet hűtőhatását. Új peremfeltételként hozzáadtam egy az egész felületre értelmezett felületi hűtőértéket. Ennek értéke $30 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$. Ez a hűtőhatás a szimuláció teljes időtartama alatt aktív a modell minden elemére (16.ábra).



16.ábra: A felületi hűtés alkalmazása

9.2.3. Kezdeti feltétel megadása (Initial conditions)

Az alapanyag hőmérséklete a hegesztés megkezdése előtt a környezeti hőmérséklet értéke, a tíz darab mérés mindegyike előtt a hegesztőlaborban mért hőmérsékletek átlagértéke, ami $21,6^\circ C$.



9.2.4. Igénybevételek felvétele (Loadcases)

Hogy vizsgálni tudjam a hőmérsékletfolyam alakulását, meg kell határozni a folyamat időtartamát, valamint időegységekhez kell rendelni a peremfeltételek aktiválódásának időpontját. Ezt itt tudom megtenni. Az teljes vizsgált időtartam 1800 másodperc (30 perc). Ezt az időtartamot időlépésekre bontottam. A hegesztési idők méréseiből származó átlagérték adta a hőbevitel időtartamát, ami 82 másodperc.

Mivel minden egyes elem a hegesztés irányában mérve 5 mm hosszú (a teljes hossz 250 mm), ezért az átlagértéknek megfelelően sarokvarratok esetében 1,62 másodpercig aktív a hőbevitel egy elemen. Egy loadcase-hez egy peremfeltétel tartozik, ami megszabja, mely elemek aktívak, melyek nem. Az éppen aktív elem előtt elhelyezkedő hexagonok aktívak maradhatnak, hiszen a hőbeviteli időtartam lejártá után csak a környezeti hűtőhatás érvényes rájuk. Ez a peremfeltétel minden loadcase esetében a teljes vizsgált időtartam alatt aktív.

Az elemre eső hegesztési időt, valamint a mérés befejeztéig hátralévő időt további időléptékekre bontottam fel. Az első 82 másodpercben 0,03s, ezt követően a századik másodpercig 0,45s; a száz és ezernyolcszáz másodperc között 100s az időlépték. A parametrizálás az igénybevételek felvételével befejeződött, a feladat ellenőrzése (job check) után futtatható a szimuláció.

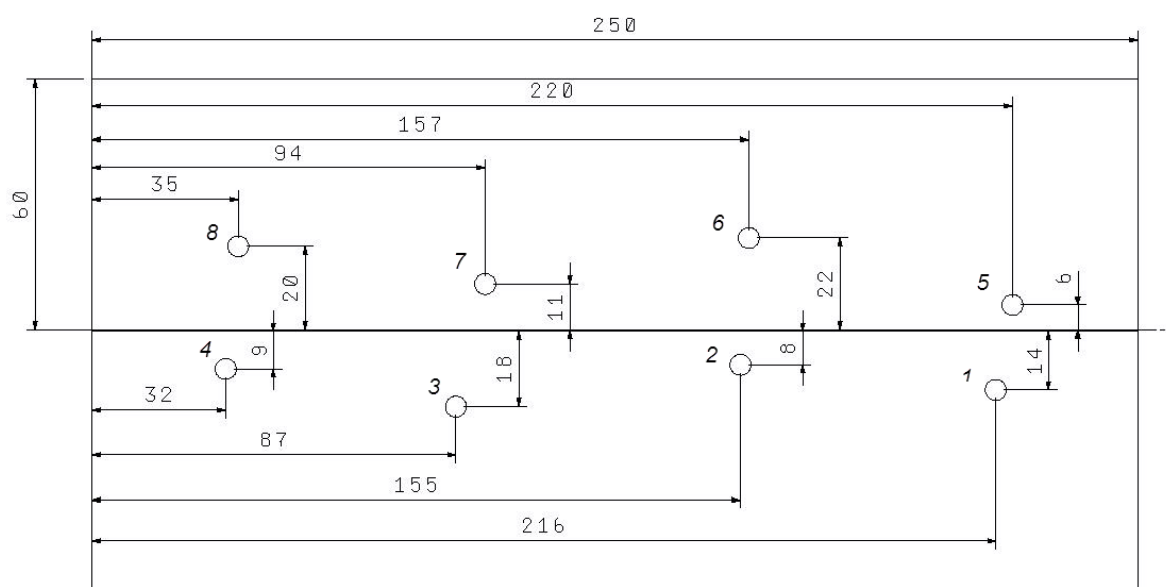


10. Eredmények, következtetések

10.1. Mérési eredmények

10.1.1. Adatok kijelölése

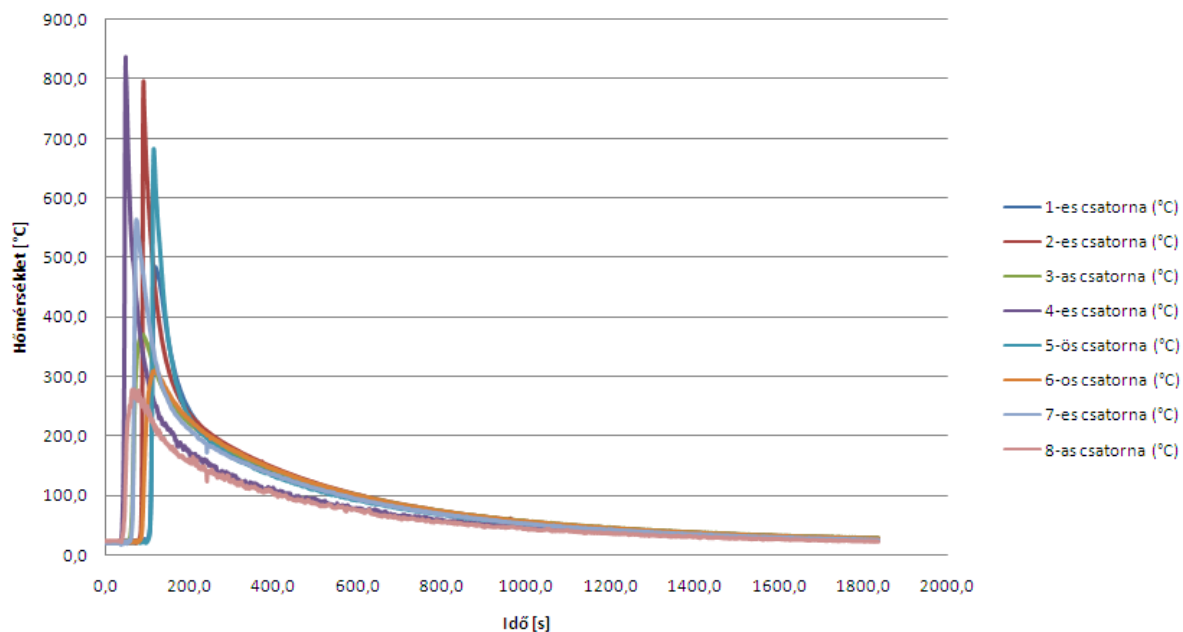
Az öt sikeres mérés közül a legjobb eredményt mutatom be. Ekkor mind a nyolc hőelem mérőképes maradt a kísérlet teljes időtartama alatt. A termoelemek kapcsolódási pontjai a csatornakiosztás feltüntetésével alábbi ábrán láthatóak:



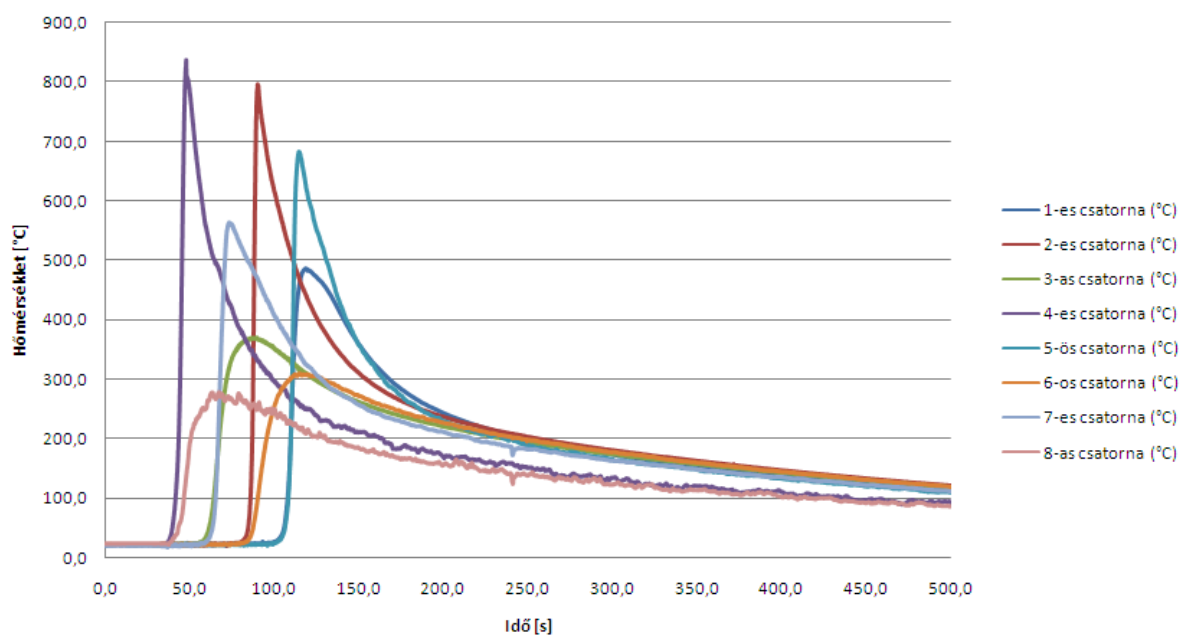
17.ábra: A termoelemek kapcsolódási pontja

10.1.2. Regisztrátumok

A termofeszültségből számított hőmérséklet értékeket egy közös diagramon ábrázolva megfigyelhető hogyan csökken a hőmérséklet a munkadarab hátfelületén a varrat környezetétől távolodva. A négyes és a kettes csatorna mért a legközelebb a varrathoz, attól 9 mm távolságban a lemez hátfelülete 800 °C-os volt. A hatos és nyolcas csatorna mért a legmesszebb a varrattól közel azonos távolságban, de a nyolcas csatorna által mért értékek körülbelül 40°C-al alacsonyabbak a próbadarab széléhez közeli helyzete miatt.



18.ábra: A termofeszültség görbék a teljes vizsgált időtartamon



19.ábra: A termofeszültség görbék a [0-500°C] időintervallumon

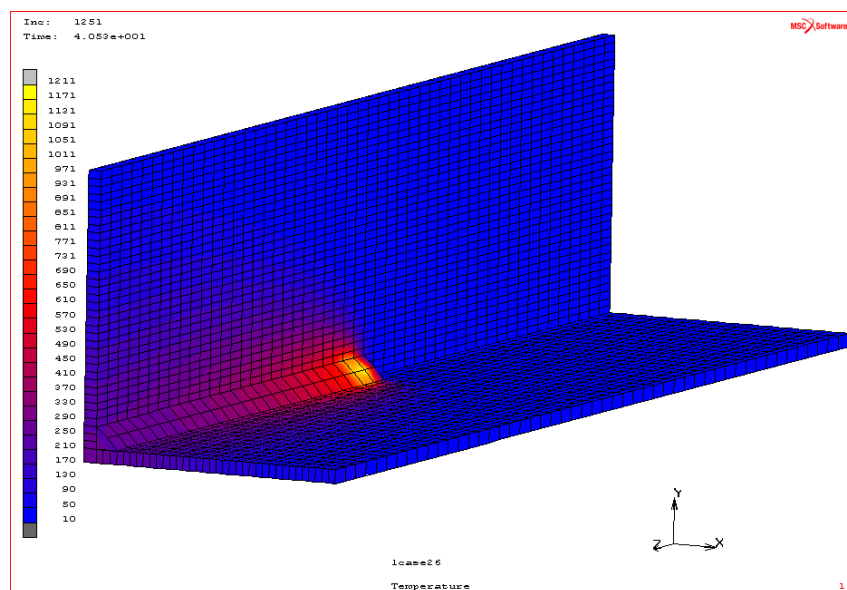
Ha a mért görbék megfelelő közelítéssel (30-50°C) illeszkednek a modellezésből kapott eredményekkel, akkor a modell varratának környezetében felvett pontok lehülési görbéit kirajzolva megállapítható azok lehülési sebessége.



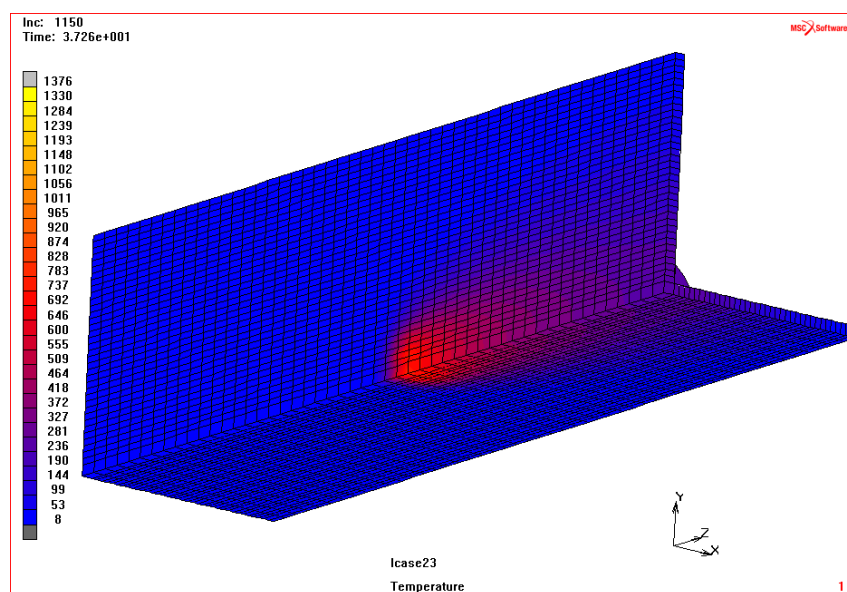
10.2. Modellezési eredmények

10.2.1. Szemrevételezés

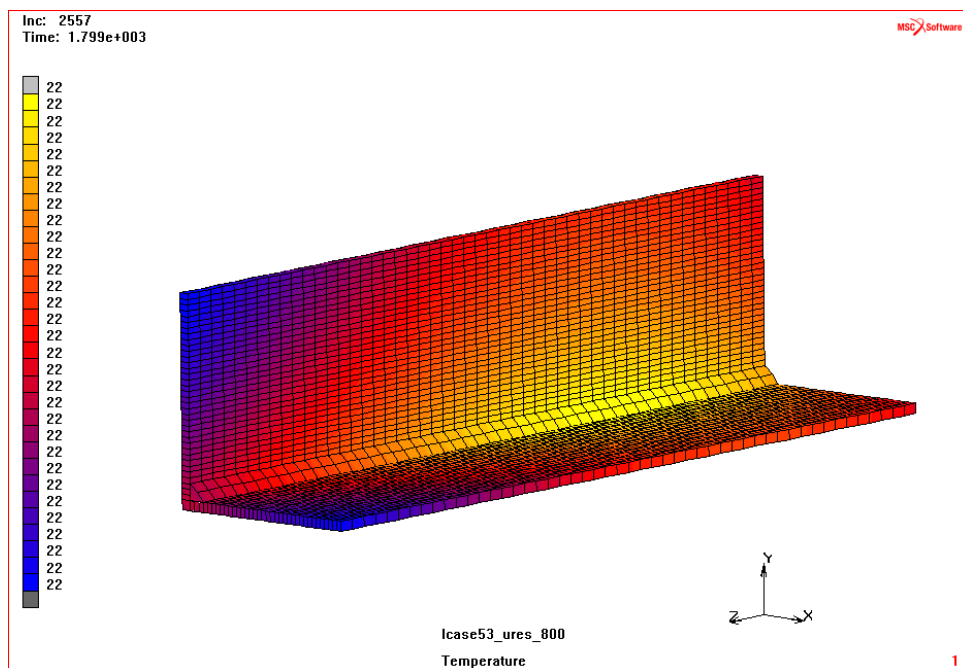
A programfuttatás sikeres volt, a MARC - ban ezt a 3004-es kód hivatott jelezni. A mozgó hőforrás „ívjelenségének” tompa csepp alakjából látszik, hogy közepes sebességgel hegesztettünk. A lemezek szélei felé tartó hőáram vonalai jól kirajzolódnak a munkadarab mindkét oldalán (20-21.ábra). A szimuláció végére a darabban homogén hőeloszlás alakul ki (22.ábra).



20.ábra: A mozgó hőforrás jelensége



21.ábra: A mozgó hőforrás jelensége a munkadarab hátoldalán



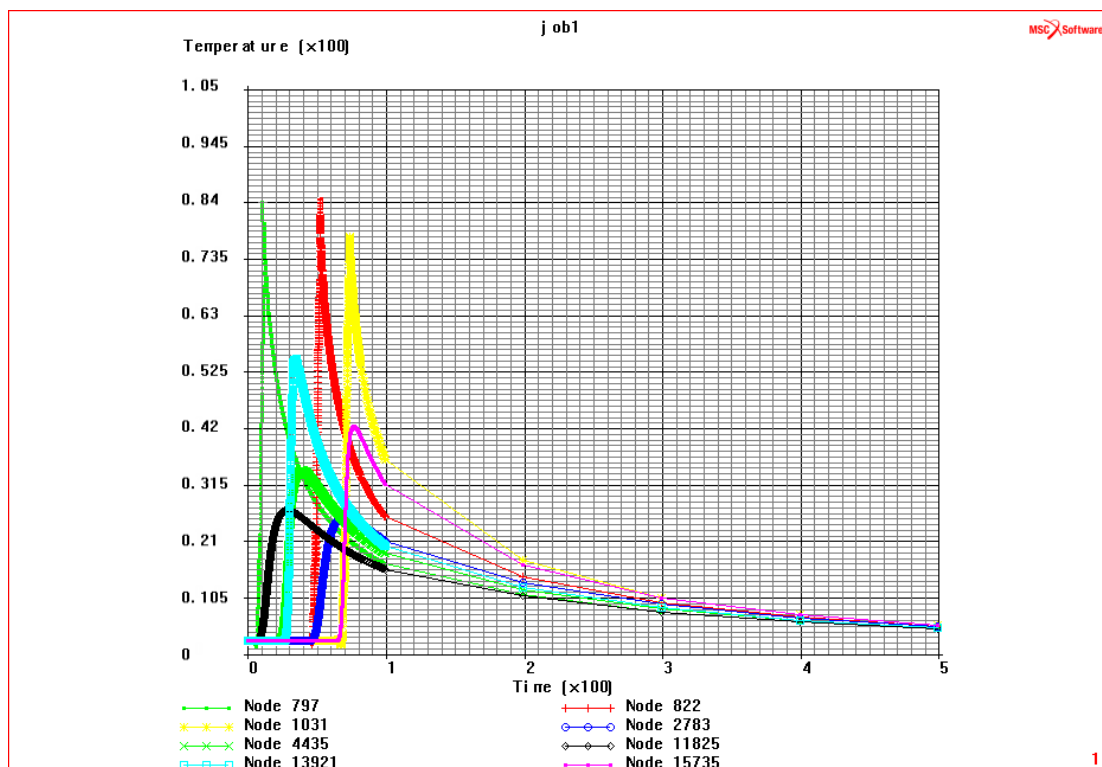
22.ábra: A hőeloszlás a modellezés utolsó időpillanatában

10.2.2. Adatok kijelölése

A szimuláció eredményeinek kiértékeléséhez a mérésnél használt kapcsolódási pontokat jelöltem ki a modelleken.

Látható, hogy a mérési és modellezési eredmények görbéi nagyban hasonlítanak egymásra. A két eredmény görbéinek maximumértékei között körülbelül 40°C-os differencia figyelhető meg. Ez a jelenleg alkalmazott viszonylag alacsony varrat és lemez elemszám mellett igen jónak mondható (23.ábra).

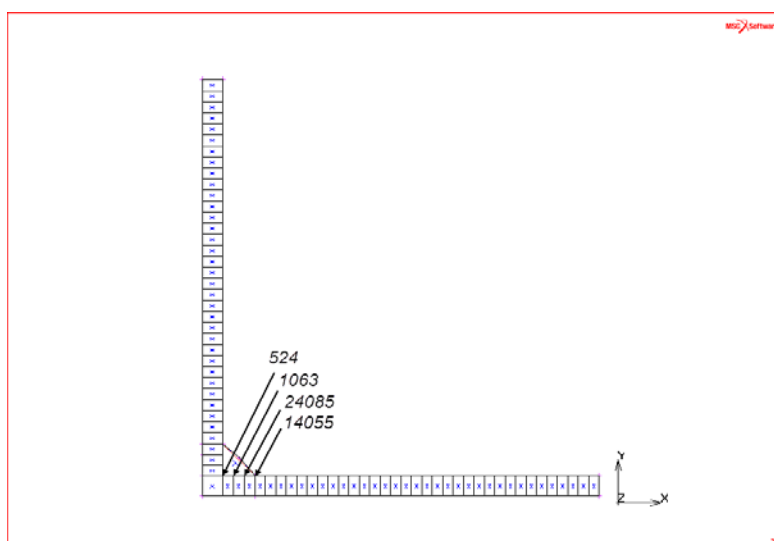
Megfigyelhető továbbá, hogy a 797-es számú csomópont (4-es csatorna), valamint a 822-es számú csomópont (2-es csatorna) eredményei a modellben és a mérésben szinte megegyeznek, holott a többi görbéhez hasonlóan eltérő eredményeknek kellene szerepelni. Ennek oka szintén az alkalmazott véges elemek sűrűségében keresendő, ez a két mérési pont közel helyezkedik el a varrathoz, a varrat elemhatárain pedig bizonytalan a hőmérséklet.



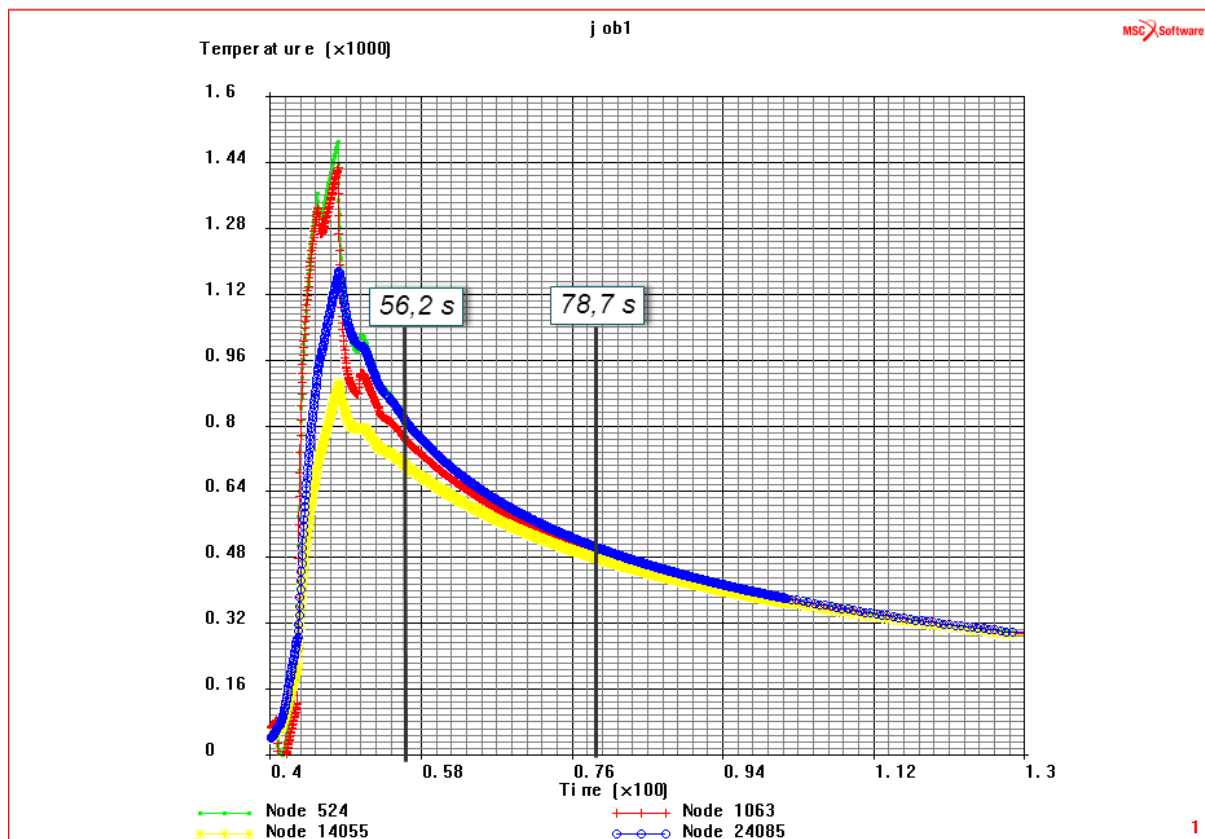
23.ábra: A modell vizsgált csomópontjainak hőmérséklet-idő görbéi

Megállapítható tehát, hogy a görbék megfelelő közelítése miatt a varrat környezetében választott csomópontok görbéiből számított lehűlési sebesség érték hasonló közelítésben ad képet a valóságos folyamatról.

A varrat szélén vizsgált csomópontokat a környezeti hűtőhatás figyelembevétele miatt nem a modell szélén, hanem körülbelül a közepén vettem fel (24.ábra).



24.ábra: A varrat szélének vizsgált csomópontjai



25.ábra: A vizsgált csomópontok lehülési görbéi

A lehülési sebesség értékét a 800°C-500°C hőmérséklettartományban vizsgálva, a 300°C-os hőmérséklet csökkenés a modell szerint 22,5 másodperc alatt megy végbe.

Ennek megfelelően a lehülési sebesség értéke:

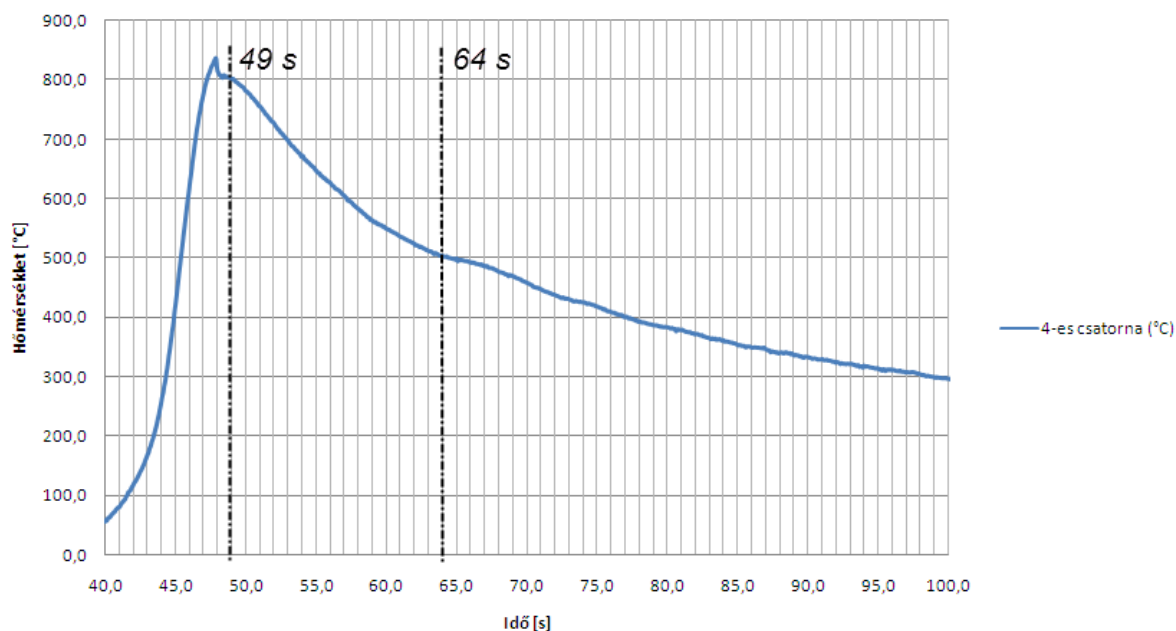
$$\frac{\Delta T}{\Delta t_{8/5}} = \frac{300^\circ\text{C}}{22,5\text{s}} = 13,333 \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}}$$

Tehát a hegesztés szempontjából kritikus hőmérséklettartományban másodpercenként 13,3°C-ot csökken a hőmérséklet.



10.2.3. Következtetések

A modellezési eredményből kapott lehülési sebesség értékének valóságosságát a mérési eredmény legmagasabb hőmérsékletet mért pontjának lehülési sebességének számításával tudom vizsgálni (26. ábra).



26.ábra: A 4-es csatornán mért pont lehülési görbéje

A lehülési sebesség értékét a 800°C-500°C hőmérséklettartományban vizsgálva, a 300°C-os hőmérséklet csökkenés a próbadarab hátfelületén a varrat közelében 15 másodperc alatt megy végbe.

Ennek megfelelően a lehülési sebesség értéke:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t_{8/5}} = \frac{300^{\circ}\text{C}}{15\text{s}} = 20 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$$

Tehát a hegesztés szempontjából kritikus hőmérséklettartományban a próbalemez hátfelületén a varrat közelében másodpercenként 20°C-ot csökken a hőmérséklet. Ez az érték magasabb a modellezéssel kapott értéknél, ami arra enged következtetni, hogy a varrat szélén számított lehülési sebesség valós lehet.



Összefoglaló

A mért és számított eredmények közelítése alapján a modellezés eredményei reálisnak bizonyultak, tehát véges elemes rendszerben történő modellezéssel kellőképpen meg lehet közelíteni a valóságos folyamatokat.

Ezek az eredmények értékeit tekintve nem adhatnak 100%-os bizonyosságot azok pontosságáról, ugyanakkor további pontosításra lehetőség van, például a véges elemes háló elemeinek sűrítésével.

Az elért eredmények lehetőséget adnak további feladatok megoldására, az eredményeket a modell elemeinek számának növelésével pontosítani lehet, ezeket össze lehet hasonlítani egy tompahegesztéssel készült méréssel, illetve olyan további modellezési problémák is megközelíthetővé válnak, mint a hegesztett varratok anyagszerkezeti módosulásainak modellezése.



Irodalomjegyzék

- [1] Gáti József - Horváth László - Kisfaludy Antal - Kovács Mihály - Réger Mihály - Tóth László: Anyagtechnológia II., BMF-BGK, Budapest, 1994
- [2] Dr. Gáti József-Dr. Kovács Mihály: Kötéstechnológia, Bánki Donát Műszaki Főiskola, Budapest, 1999
- [3] Dr. Boros Andor: Villamos mérések a gépészetben, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1978
- [4] Hargittay Emil: Méréstechnikai gyakorlat, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1968
- [5] Termoelem-hőmérők, BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, elektronikus jegyzet, fam 05.02.14.
- [6] Harangozó József: Hegesztett tompa- és sarokvarratok hőfolyamatainak vizsgálata véges elem módszerrel, TDK dolgozat, Budapest, 2013
- [7] Marc® 2013 Volume A: Theory and User Information