

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



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**HEGESZTETT TOMPA- ÉS SAROKVARRATOK
HŐFOLYAMATAINAK VIZSGÁLATA VÉGES
ELEM MÓDSZERREL**

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

Konzulensek: **Dr. Gonda Viktor**
egyetemi docens
Kuti János
HSZI igazgató

Budapest, 2013.



Tartalom

Bevezető.....	2
1. A véges elem módszerről röviden	3
2. A VEM alkalmazási területei.....	4
2.1. Ismertebb szoftverek	4
3. A VEM szerepe a hegesztésben	4
4. MARC MENTAT	5
5. Modellalkotás	5
5.1. Keresztmetszeti modell felépítése	5
5.1.1. A tompavarrat-geometria létrehozása	5
5.1.2. A sarokvarrat-geometria létrehozása	6
5.2. A modellek parametrizálása a hőfeladatok megoldásához	7
5.2.1. Anyagtulajdonságok (Material properties).....	7
5.2.2. A hegesztési paraméterek beállítása (Weld path and weld fillers)	7
5.2.3. Peremfeltételek megadása (Boundary conditions).....	8
5.2.4. Kezdeti feltétel megadása (Initial conditions)	9
5.2.5. Különböző igénybevételek felvétele (Loadcases).....	10
6. Feladatok.....	10
6.1. Hevítési feladat.....	10
6.1.1. Futtatás a Goldak modell segítségével.....	11
6.1.2. Futtatás más paraméterezési eljárással.....	12
6.1.3. Lehűlési diagramok vizsgálata	13
6.2. Hűtési feladat	15
6.2.1. Hűtés alkalmazása.....	15
6.2.2. Intenzívebb hűtés alkalmazása	17
Összefoglaló	19
Irodalomjegyzék	20
Melléklet	21
Ábrajegyzék	22



Bevezető

A XXI. századi ipari tervezési, gyártási gyakorlatban széles körűen alkalmazott numerikus tervezési technológiák egyre inkább jelen vannak a hegesztett kötések is tartalmazó termékek tervezési folyamatában is. A mai hegesztési trendek azt mutatják, hogy a modellezés szerepe a technológia-tervezésben számottevően nő, megfelelő tapasztalati háttér áll rendelkezésre a valóságos környezetet jól megközelítő virtuális rendszerek felépítéséhez. Ezzel a módszerrel a vállalat anyagot, energiát, időt és költséget takaríthat meg, miközben a próbahegesztések számának minimálisra csökkentése mellett nő a gyártás termelékenységéje.

TDK dolgozatom célja olyan, jól parametrizált modellek létrehozása, mellyel a valóságban végbemenő folyamatokat kellően megközelítő mértékben lehet vizsgálni. Ehhez egy tompavarrat- és egy sarokvarrat-geometriával rendelkező modellt hoztam létre, és velük hőfeladatokat oldottam meg. A modellezés során azt tartottam szem előtt, hogy olyan modelleket készítsék, melyekre a lehető legkevesebb módosítás mellett további, mechanikus terhelési feladatok építhetők, valamint a kapott eredmények kellőképpen közelítsék meg a valóságban később végrehajtásra kerülő hegesztési vizsgálatok eredményeit.

Dolgozatom megírásának technológiai háttereként szolgált az Anyagtechnológiai folyamatok numerikus tervezésének alapjai kurzus^[1] gyakorlata. A szimulációkat a MARC MENTAT véges elem modellező szoftverrel végeztem.

Munkám megírásához nyújtott segítségéért köszönettel tartozom Dr. Dudás Zoltán tanár úrnak, az Anyagtechnológiai folyamatok numerikus tervezésének alapjai kurzus^[1] oktatójának, valamint konzulenseimnek, Dr. Gonda Viktor és Kuti János tanár uraknak.



1. A véges elem módszerről röviden

A véges elemes analízis (a továbbiakban VEA vagy VEM); angol nevén finite element analysis (FEA) a valóságban különböző igénybevételeknek (mechanikai terhelés, vibráció, hevítés, folyadékáramoltatás vagy más fizikai behatás) alávetett gépelemek, gépszerkezetek, rendszerek virtuális környezetben történő modellezésére szolgál. Segítségével még a prototípus legyártása előtt megtudhatjuk, hogyan viselkedne a tervezett termék valós körülmények között. Ezzel a technológiával hasznos időt és költséget takaríthatunk meg, miközben a termék minősége javul; valamint a gyártástervezés költségei is nagymértékben csökkenthetőek. A VEM mérnöki szaktudást, valamint megfelelő számítógépes eszközöket igényel.

A véges elemes módszer lényege, hogy a vizsgált geometriát megfelelően nagyszámú, véges elemre bontjuk, kialakítva ezzel a véges elemes hálót. Az elemek alakja kétdimenziós modellek esetén háromszög, vagy négyszög; térbeli kiterjedésű modellek esetén hexaéder vagy tetraéder, de akár egydimenziós modellt is készíthetünk. Az elemek kapcsolódási pontjai a csomópontok. A modellen nem maradhat olyan felület, hol nem található elem. Az analízis szempontjából kritikus felületeken sűrűbb hálózást (magasabb számú, kisebb kiterjedésű elemek), az előre láthatólag kevésbé számottevő felületeken ritkább hálózást (nagyobb kiterjedésű elemek) érdemes alkalmazni. A véges elem háló megfelelő kialakítása kiemelt fontosságú, hiszen a számításokat az elemeken végezzük.

Főbb előkészületi lépések a véges elemes analízis futtatásához:

- csomóponti rendszer (geometria) létrehozása
- elemek alkotása csomópontok segítségével
- anyagtulajdonságok megadása
- peremfeltételek meghatározása
- kezdeti feltételek meghatározása
- igénybevételek felvétele
- elemzési szempontok beállítása



2. A VEM alkalmazási területei

A véges elemes technológiát az iparvállalatok széles körben alkalmazzák; legfőképpen az autóipar, repülőgépipar, szerszámgépgyártás, építészet, biomechanika területén, de már léteznek geotechnikai problémák kezelésére is alkalmas szoftverek is.

2.1. Ismertebb szoftverek

Az ismertebb VEM programok közé tartozik az ABAQUS, a COMSOL, a MARC, a NASTRAN, a COSMOS, az ALGOR és az ANSYS.

A mai CAD rendszerek többsége már tartalmaz véges elemes modulokat is. A legismertebb ilyen szoftverek az Autodesk Inventor, a DS CATIA V5, a DS SolidWorks, vagy a PTC Pro/Engineer.

3. A VEM szerepe a hegesztésben

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 folyamat közben végbemenő sorozatos termikus expanziók, kontrakciók, fázisátalakulások, valamint a korlátozott alakváltozás a darabban maradófeszültségeket és deformációt okoznak.

Numerikus tervezési módszerekkel kellő pontossággal lehet megállapítani még a próbahegesztés előtt, hogy az adott konstrukció esetében melyek a megfelelően alkalmazható technológiák, beállítások, elemezhetővé válik a hegesztett szerkezettel szemben támasztott követelmények teljesülése. A valós körülmények között végbemenő hegesztési folyamat bonyolultságából adódik, hogy a számítások nem adhatnak 100%-osan helyes eredményt, a kiértékeléshez szükség van tapasztalati ismeretekre is.



4. MARC MENTAT

A MARC MENATAT egy, az 1970-es évek közepétől piacon lévő, népszerű, általános célú véges elem modellező rendszer. Moduljai széles körben alkalmazhatóak; dolgozhatunk lineáris vagy nemlineáris módszerrel egy, két, vagy három dimenzióban; végezhetünk statikus, dinamikus terheléses vizsgálatokat; hőfolyamatok, elektromágneses folyamatok elemzésére is alkalmas. Modern kezelőfelülettel rendelkezik, a parancsok bevitele nem bonyolult, alapanyag és elemkönyvtára lehetővé teszi bármely geometria vizsgálatát^[2].

A szoftvert alkalmazzák az autóiparban, űrkutatásban, rakétagyártásban, repülőgépgyártásban, hajógyártásban, biotechnikában, de elektronikus alkatrészek terén is. Alkalmas a TDK dolgozat feladatainak vizsgálatához.

5. Modellalkotás

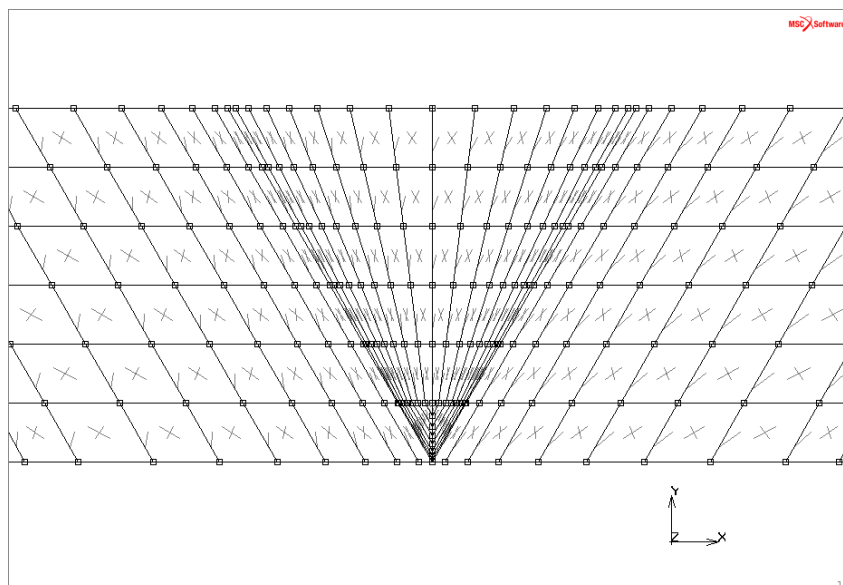
5.1. Keresztmetszeti modell felépítése

5.1.1. A tompavarrat-geometria létrehozása

A tompavarrattal rendelkező geometria két darab 125 mm x 4 mm-es elemből áll össze. A varrat típusa sík felületű egyoldali tompa V-varrat. A dolgozatban azért alkalmazom ezt a varratípust, mert így egyszerűbben lehet mindkét modellen azonos varratérfogatot létrehozni.

Első lépésként létrehoztam a csomóponti hálót, melynek pontjai, illetve segédegyenesek segítségével kialakítottam a szükséges varratgeometriát. Eztán a csomópontokat elemek rendszerébe foglaltam. Manuális hálózást alkalmaztam, háromszög, illetve négyszög alakú elemeket használtam; a varrat közvetlen környezetében magasabb, attól távolodva alacsonyabb elemszámmal (1. ábra).

A tompavarrat-modell varratának területe: $9,237579 \text{ mm}^2$.



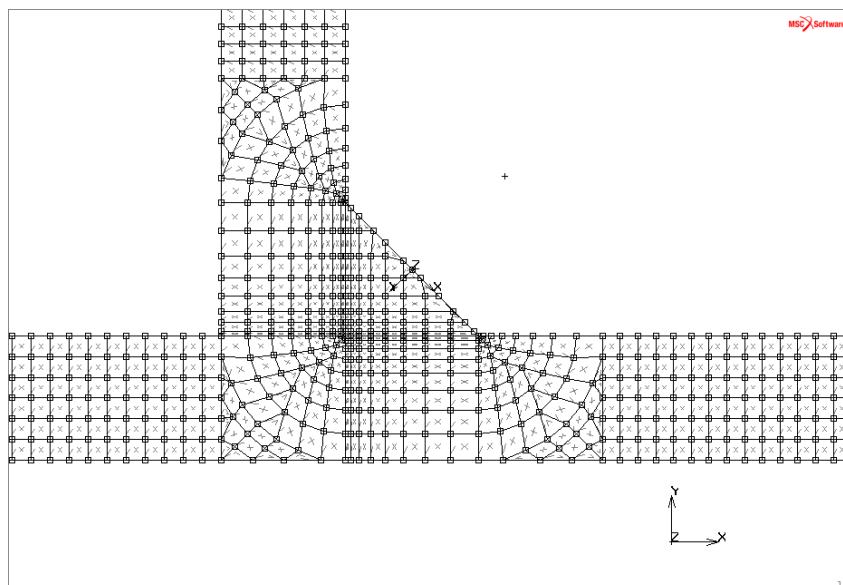
1. ábra: A tompavarrat-modell

5.1.2. A sarokvarrat-geometria létrehozása

A sarokvarrattal rendelkező geometria három darab 125 mm x 4 mm-es elemből áll össze egy T-kötésben. A varrat típusa aszimmetrikus sík felületű sarokvarrat, a szárhosszak egyenlő nagyságúak. A modell geometriáját az előzőekben leírtak szerint hoztam létre (2. ábra).

A modell varratának területe $9,2374511 \text{ mm}^2$.

A tompavarrat-modell varratának területe: $9,237579 \text{ mm}^2$, a felületek jó közelítéssel egyenlő nagyságúak.



2. ábra: A sarokvarrat-modell

5.2. A modellek parametrizálása a hőfeladatok megoldásához

5.2.1. Anyagtulajdonságok (Material properties)

A programfuttatások eredményeinek megfelelő összehasonlíthatóságának érdekében mindkét modellen ugyanazokat a beállításokat kell végrehajtani. A szerkezetek alapanyaga S235-ös acél, a hőfeladatok megoldásához speciális anyagfüggvények felvétele nem szükséges, a fajhő, az anyagsűrűség és a hővezetési tényező mellett a további anyagjellemzőket a hegesztési paraméterek között adom meg.

5.2.2. A hegesztési paraméterek beállítása (Weld path and weld fillers)

Első lépésként a hegesztési modulban definiáltam a hegesztési hőbevitel helyét és irányát (z). Az ömledék olvadáspontot 1535 °C-nak állítottam be. Ez a hőmérséklet a 0,5 másodperc időpillanatban aktiválódik a varrat területének minden elemére.

A Goldak modell

A hegesztési hőfolyamatok fizikájának lemodellezése összetett és nehezen megoldható feladat, a komplexitás csökkentésére matematikai modelleket alkalmazunk egy közelítően helyes megoldás elérésének érdekében; a fizikai folyamatok nagy részének elhanyagolása mellett. A MARC fentebb említett hegesztési modulban Goldak dupla-ellipszoid modelljét alkalmazza a hőáram modellezésére.^{[2],[3]}



A Goldak modell két különböző ellipszis kombinációjából áll, melyek egyike a hőforrás első negyedében, másika a hőforrás hátsó negyedében helyezkedik el.

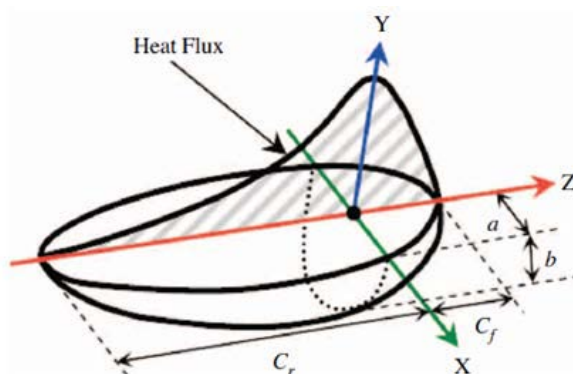
A hőáram eloszlása az első negyedben, $q_f(\text{watt}/\text{m}^3)$:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_f Q}{abc_f \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3\frac{x^2}{a^2}} \cdot e^{-3\frac{y^2}{b^2}} \cdot e^{-3\frac{z^2}{c_f^2}}$$

A hőáram eloszlása az első negyedben, $q_r(\text{watt}/\text{m}^3)$:

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q}{abc_r \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3\frac{x^2}{a^2}} \cdot e^{-3\frac{y^2}{b^2}} \cdot e^{-3\frac{z^2}{c_r^2}}$$

Ahol $Q = \eta IV$ az energiabevitel nagysága, a hatásfok η , a hegesztőáram I és a feszültség V szorzata. Az f_f és az f_r törttényezők az első és hátsó negyedben bevitt hő értékei, $f_f + f_r = 2$. Az a , b , c_f és c_r konstansok a hőforrás azon paraméterei melyek az ellipszisek méretét és alakját határozzák meg (3. ábra).



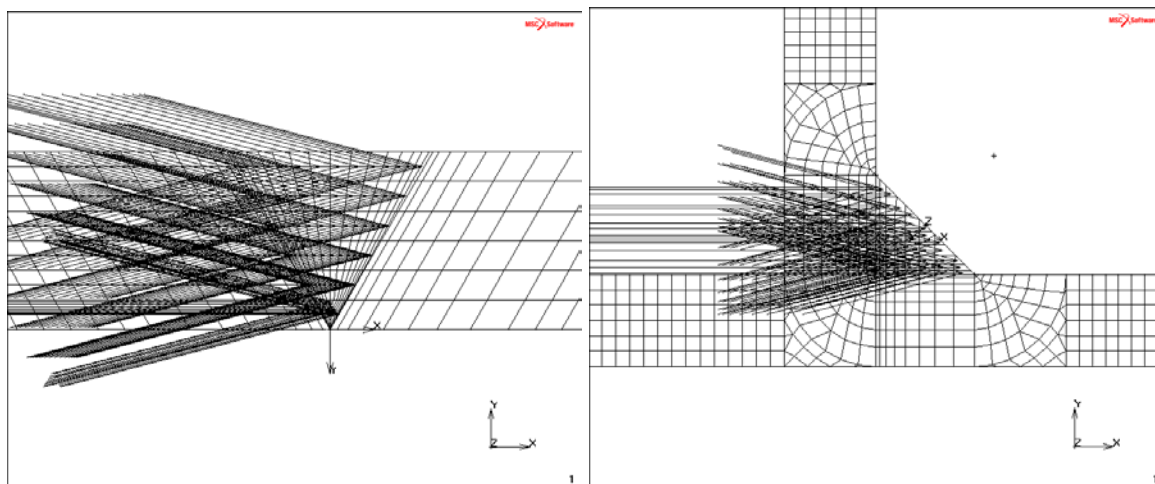
3. ábra: A Goldak modell^[3]

5.2.3. Peremfeltételek megadása (Boundary conditions)

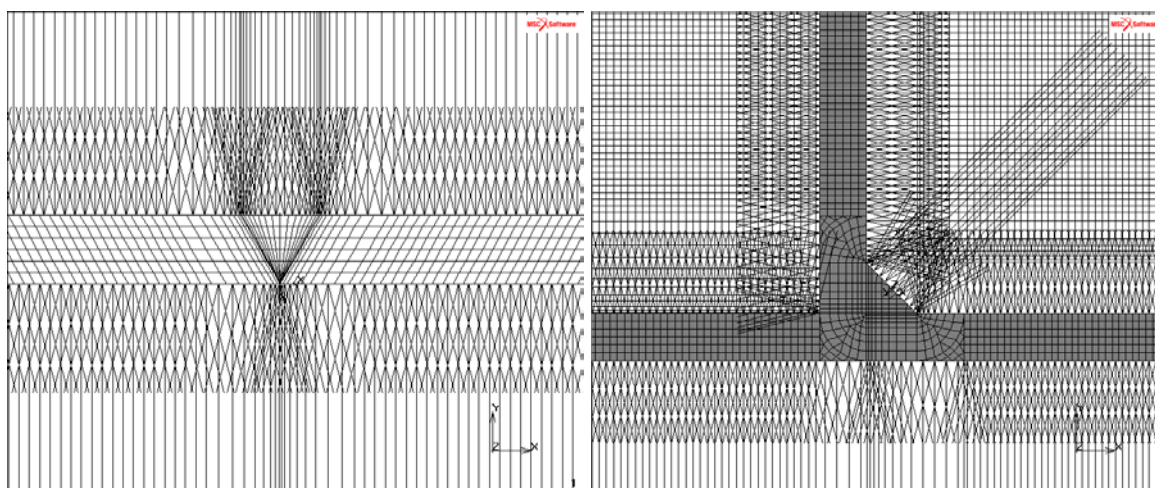
A hőfeladatok megoldásához két peremfeltétel beállítását tartottam szükségesnek. Hozzáadtam a hegesztési modulban megjelölt hegesztési útvonalat és ömledékfürdő tulajdonságokat, majd hozzárendeltem a varrat elemeit (4. ábra). A második peremfeltétel a környezet hőmérsékletének beállítása. Itt 20°C-ot adtam meg. A felületi hűtést is figyelembe vevő feladatok esetén itt állítottam be a hűtőhatás mértékét is. Ehhez a feltételhez



hozzárendeltem a keresztmetszeti modell teljes élhosszúságát elemenkénti felbontásban (5. ábra).



4. ábra: Az ömledékfürdő elemei



5. ábra: A felületi hűtés helyei (nyilakkal jelölve)

5.2.4. Kezdeti feltétel megadása (Initial conditions)

Az alapanyag hőmérséklete a hegesztés megkezdése előtt a környezeti hőmérséklet értéke, azaz 20°C.



5.2.5. Különböző 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 2000 másodperc. Ezt az időtartamot időlépésekre bontottam. Az első két másodpercben 0,01s, ezt követően a századik másodpercig 0,02s; a száztól kilencszáz másodpercig terjedő időközben már 100s; végül az ezredik és kétezredik másodperc között 500s az időlépték. Mivel a hegesztés modulban már beállítottam, hogy az ömledékfürdő hőmérséklete a 0,5 másodperc időpillanatban éri el az 1535°C-ot, így mindkét peremfeltételt aktívvá tettem az összes időegységre.

A parametrizált modell elkészült. Futtatható a feladat.

6. Feladatok

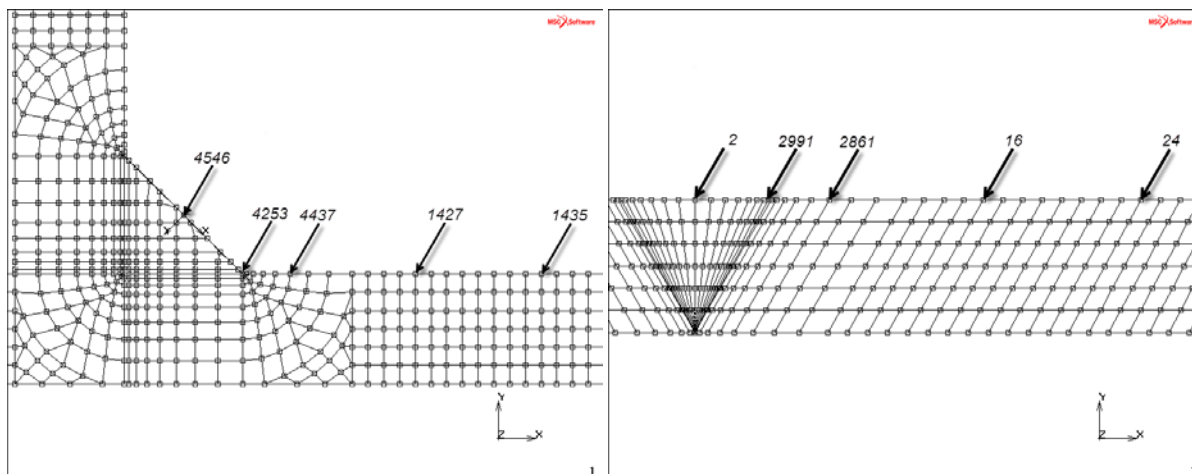
6.1. Hevítési feladat

Az első programfuttatás feladata ugyanakkora ömledék térfogat és ugyanakkora hőbevitel mellett az időfüggő hőfolyamat különbözőségének szemléltetése, valamint a varratkörnyezet változásának vizsgálata.

Elsőként definiáltam azokat a vizsgálandó csomópontokat, ahol később a hőmérsékletváltozás időfüggését kívánom vizsgálni, valamint a fontosabb időpillanatokat. Fontos, hogy mindegyik feladatban az időfüggés elemzéséhez ugyanazokat a csomópontokat és időértékeket vegyem fel, mert a modellek összehasonlítása csak így adhat elfogadható eredményt.

A modelleken 5-5 csomópontot jelöltem ki. Ezeket a 6. ábrán jelöltem be.

A hőmérsékletértékek helyi változásainak elemzéséhez kiválasztott időpillanatok a következők: 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 10 ; 2000 (utolsó) [s]



6. ábra: A hőmérsékletváltozás időfüggésének elemzéséhez kiválasztott csomópontok helyei

6.1.1. Futtatás a Goldak modell segítségével

A program futtatása sikeres volt, a MARC - ban ezt a 3004-es kód hivatott jelezni. Azonban az eredmény menüben észrevettem, hogy a beállítások nem a kívánt eredményt hozták. Az elváltozásokat a mellékletben található ábrák (1.m.-15.m.), segítségével mutatom be.

Megfigyelhető, hogy a két modell felmelegedési szakaszának hőmérsékletváltozása egyenlő nagyságú, az értékek megegyeznek. Ez a viselkedés a paraméterek közé felvett 0,5 másodperces olvadáspont aktiváció miatt elvárt, ugyanakkor a 0,5 – 3 másodperc időintervallumban megjelenő (varratközépponton értelmezett) hőtartó szakasz nem indokolt (1.m.-8.m. ábrák).

A harmadik másodpercben (151.-ik időegység) elkezdődik a lehűlési fázis, ami már megközelíti a valós lehűlési folyamatot, a sarokvarrat geometria hőmérséklet értékei intenzívebb mértékben csökkennek, mint a tompavarrat esetén. A tompavarrattal rendelkező geometria-keresztmetszetben az utolsó időpillanat (2000 s) eléréséig homogén és szimmetrikus hőmérséklet-eloszlás alakul ki; ahol a varrat elemei magasabb hőmérsékletűek (9.m.-13.m. ábrák).

A sarokvarrat-geometriára ez nem igaz. A 15.m. ábrán látszik, hogy a varrat hőmérséklete az utolsó időpillanatban alacsonyabb, mint a próbadarabok szélei felé tartó hőáram értéke, valamint a merőleges darab hőmérséklete sem magasabb ennél, úgy tűnik, mintha a függőleges elem elvonná a hőt a varratból (14.m. ábra).



Megállapítható az is, hogy a második másodperctől kezdve a varratfördőből meginduló hőáram elkezd lefelé vonulni, a vízszintes elemek irányában intenzívebben terjed, mint a függőleges elem irányában, holott a hőfolyamnak a függőleges és a jobboldali elemekben kellene intenzívebben és a baloldali elemekben kisebb mértékben terjednie. A feladatban számított lehűlési szakasz végén a sarokvarrat legmelegebb pontja $41,4^{\circ}\text{C}$, a leghűsebb $37,6^{\circ}\text{C}$; a tompavarrat legmelegebb pontja $111,7^{\circ}\text{C}$, a leghűsebb $111,5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű (13.m., 15.m. ábra).

A módszer tehát nem alkalmas a dolgozat céljának elérésére, a két folyamat ily módon érdemben nem összehasonlítható, az eredmény nem szolgálhat valós vizsgálatok alapjául, így más parametrizálási eljárás indokolt.

6.1.2. Futtatás más paraméterezési eljárással

A második lehetséges megoldást a hegesztési modul figyelmen kívül hagyásával készítettem. A peremfeltételek (boundary conditions) közül kitöröltem a hegesztési modulhoz kapcsolt beállításokat és elemhalmazt. Ezután új termikus peremfeltételként felvettem egy volumetrikus fluxust és annak intenzitását ($\text{J}/\text{mm}^3/\text{s}$), majd hozzárendeltem a varrat elemeit. A MARC gyakorlata szerint a hőátadási analízis terhelései hőfluxusok, olyan skaláris mennyiségek, melyeket annak intenzitásával definiálunk^[2]. Az igénybevételek (loadcases) közül szintén kitöröltem a korábbi hegesztési beállításokat, majd az első egy másodperces időintervallumra beállítottam az új peremfeltételt.

A feladat ellenőrzése (Job check) sikeres, futtatható a vizsgálat.

A futtatás eredményeit tekintve már a 0,25 másodperc időpillanatban észlelhető a különbség az előző modellhez képest (16.m. és 17.m. ábrák). Ugyanabban az időpillanatban nem egyezik meg a legmelegebb pontok hőmérsékletének értékei, valamint kirajzolódik a hőbevitel helye és jól elkülönülnek a hőátmenetek már a varratgeometrián belül is.

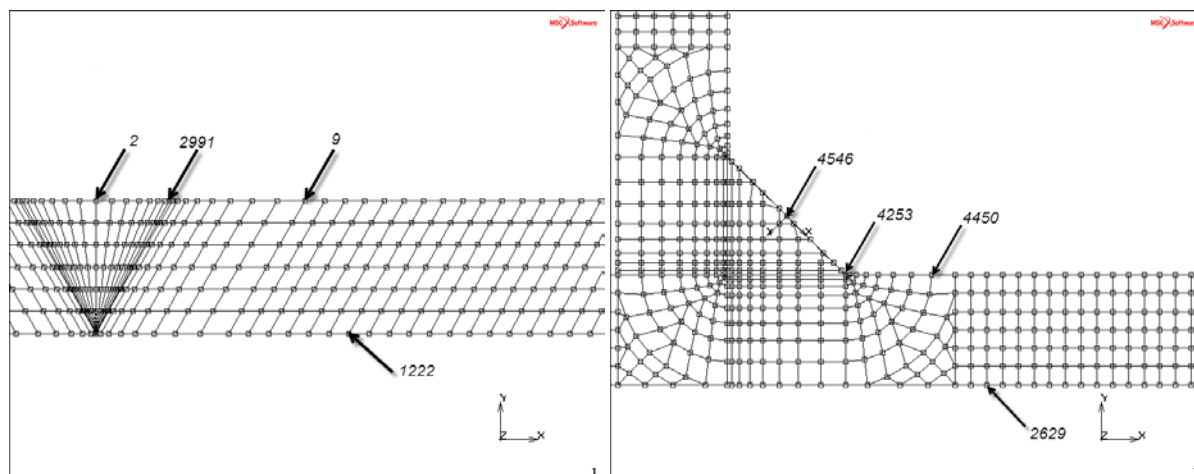
Jelen esetben nem azt állítottam be, mikor emelkedjen a varrat hőmérséklete olvadáspont fölé, hanem, hogy egy másodpercig tartson a hőbevitel. Az egy másodperc időpillanatban már több, mint 100°C különbség figyelhető meg a két modell között, valamint láthatóan tovább kellene melegíteni a sarokvarratot ugyanakkora ömledék-hőmérséklet eléréséhez, mint a tompavarrat esetében (20.m. és 21.m. ábrák).

Igazolódni látszik a beállítások helyessége a lehűlési szakaszban is, ahol immár nem csak a tompavarrat-geometria mutat homogén hőeloszlást, bár a sarokvarrat bal oldali elemének nem kellene a másik két elemmel egyenlő mértékben hőt felvennie (22.m.- 27.m. ábrák). A vizsgálat szempontjából ez nem kimondottan releváns, a diagramokon sem ábrázolom. A sarok-geometria ebben az esetben is gyorsabban hűl. Az utolsó időpillanatban a sarokvarrat ábráján (29.m. ábra) szembetűnik, hogy a varrat az előző beállításhoz képest nem hűlt ki, a hő nagy részét a függőleges és a jobboldali elem veszi fel, míg a bal oldali elem kevésbé vesz rész a hő elvezetésében.

Megállapítom tehát, hogy a második futtatás eredményei jobban megközelítik a valós körülményeket, így ez a beállítás alapjául szolgálhat további feladatok megoldásának.

6.1.3. Lehűlési diagramok vizsgálata

Az új eredmények kiértékeléshez, valamint a diagramok kirajzolásához más csomópontokat választottam (7.ábra). Inkább a varrat közvetlen környezetére koncentrálok, valamint a darabok alsó éleinek pontjait is figyelembe veszem. Csakúgy, mint a korábbi vizsgálatnál, itt is megközelítőleg egyenlő távolságban helyezkednek el a csomópontok a varrat szélétől.



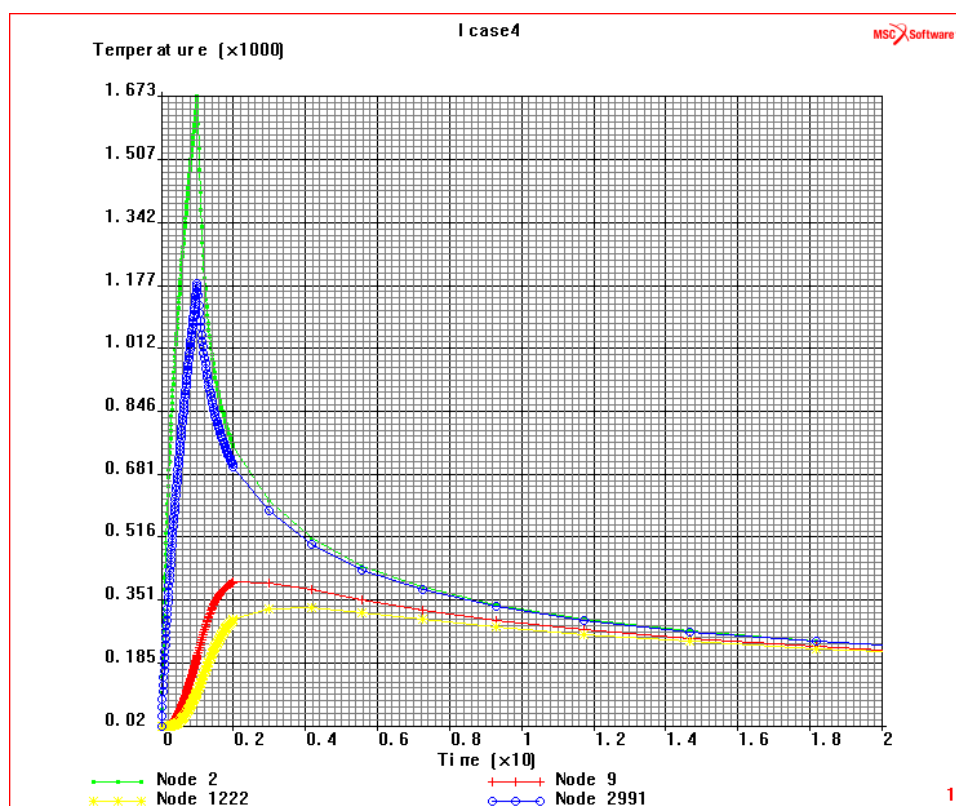
7. ábra: A hűlésnél vizsgált csomópontok helyei

Első ránézésre szembetűnik, hogy a két modell lehűlési görbéinek alakulása nagyon hasonló (8-9. ábrák). A varratkeresztmetszet szimmetriatengelyének legfelső csomópontja, a hőbevitel helye a legmelegebb az első másodpercben. A tompavarrat-modell esetében a

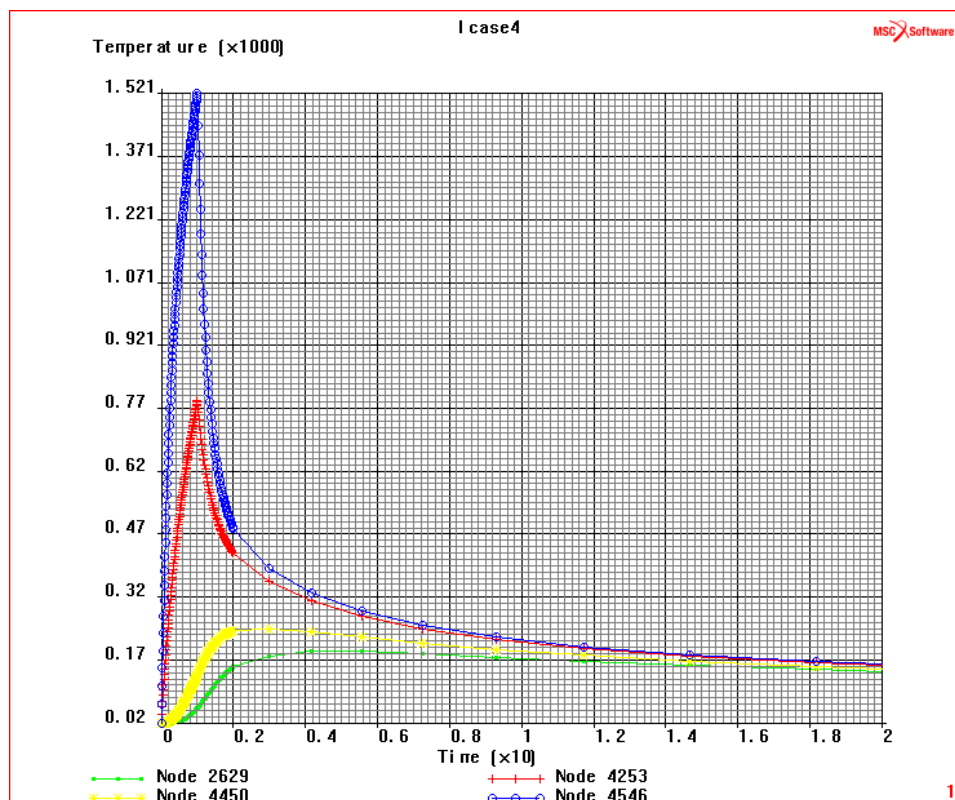


középpont hőmérséklete eléri az 1673°C -ot is, míg a sarokgeometria középpontja csak 1521°C -os a felmelegedési fázis végén. A diagramokon látható, hogy a nagyobb geometria ugyanakkora hőmérsékletre melegítéséhez több időre van szükség, a tompavarrat görbéi meredekebben emelkednek minden vizsgált pontban. A sarokgeometria esetében a felmelegedési szakasz hőterjedése is lassabb, a varrat széle és a középpont között nagyobb hőmérsékletkülönbség esik, mint a tompavarratban. Az elemek alsó, távolabb eső pontjaiban elért legmagasabb hőmérséklet feleakkora nagyságú a sarokvarratban, mint a tompavarratban. Maximumértékeiket a lehülési fázisban érik el, az ömledékfürdéből érkező hőáram a varrathoz közelebb eső felső pontokat a második, a távolabb elhelyezkedő alsó pontokat a negyedik másodpercig melegíti.

A lehülési szakaszban a varrat pontjainak és a közvetlen környezetük pontjainak görbéi összetartanak a vizsgált időtartam végéig, hiszen a darabok elvonják a hőt a varrat környezetéből. Mindkét esetben jó közelítéssel homogén hőeloszlás alakul ki a 2000.-ik másodpercre, a tompavarrat-geometria 60°C -ra, a sarokvarrat-geometria 47°C -ra hűl le. A nagyobb geometria láthatóan több hőt nyel el.



8. ábra: A tompavarrat csomóponti hőmérsékletváltozásainak görbéi (0-20s)



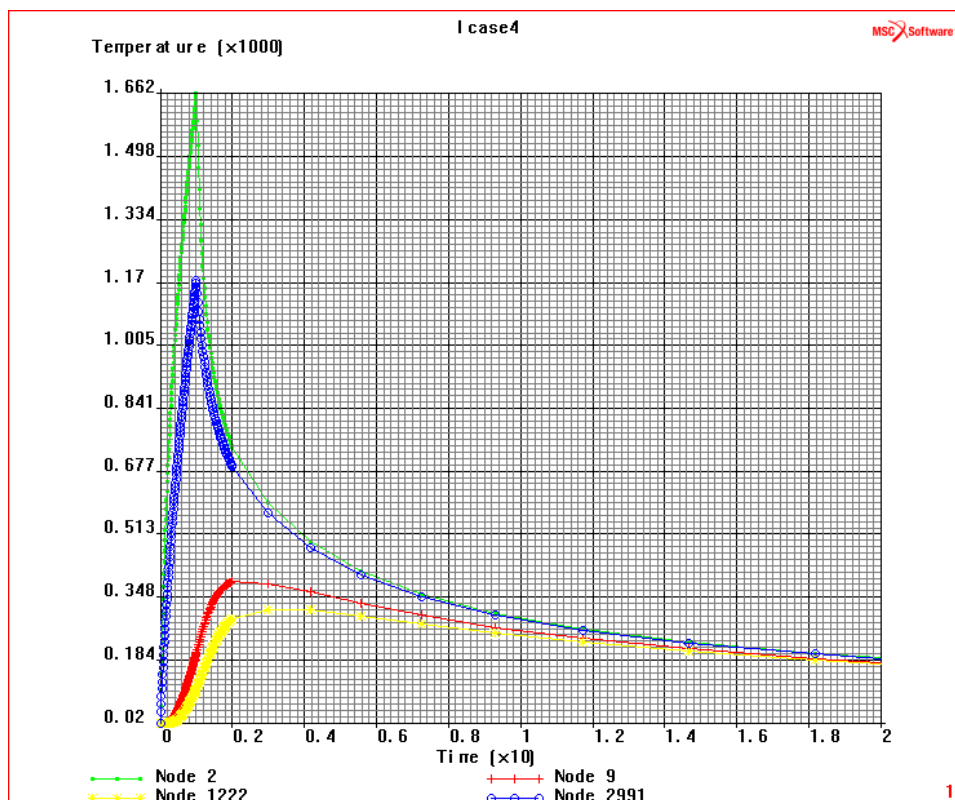
9. ábra: A sarokvarrat csomóponti hőmérsékletváltozásainak görbéi (0-20s)

6.2. Hűtési feladat

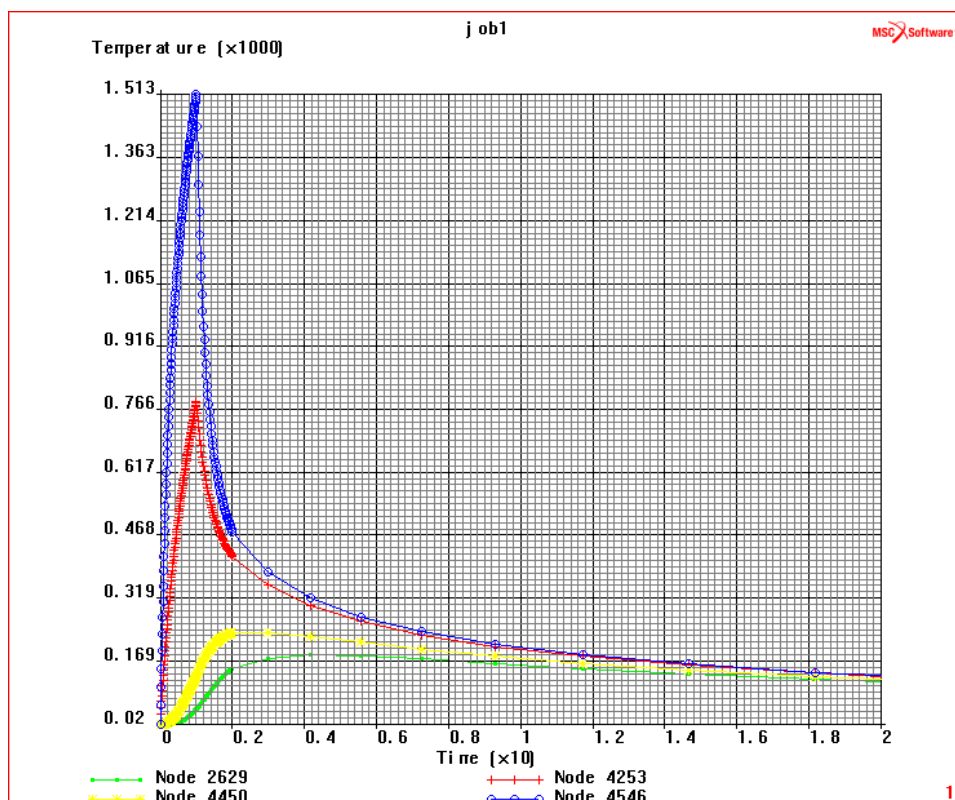
6.2.1. Hűtés alkalmazása

A felületi hűtőhatás vizsgálatához a parametrikus modellen csak a hűtési peremfeltételen (boundary conditions) kell változtatni. Az elején beállított nulla hűtési tényező értéket most 0,0001-re emeltem ($\text{J}/\text{mm}^2/\text{s}$). A diagramokat az előző feladatban megjelölt csomópontokra rajzoltam fel, az összehasonlíthatóság érdekében (10-11. ábrák).

A legszembevetőbb változás az előző diagramokhoz képest talán az, hogy míg a varratközéppont hőmérséklete az első másodpercben közel 10°C -kal csökken, a varrat széleinek hőmérséklete csak 1°C -kal. A távolabb eső pontok hőmérséklet-csökkenése a maximum helyeken $1-3^\circ\text{C}$ közötti. A modellek közel azonos mértékben hűlnek. A legfontosabb változás azonban az, hogy a lehűlési fázis görbéi intenzívebb esést mutatnak, az utolsó időpillanatban már megközelítik a környezeti hőmérséklet értékét (20°C).



10. ábra: A tompavarrat csomóponti hűlési görbéi (0-20s)



11. ábra: A sarokvarrat csomóponti hűlési görbéi (0-20s)

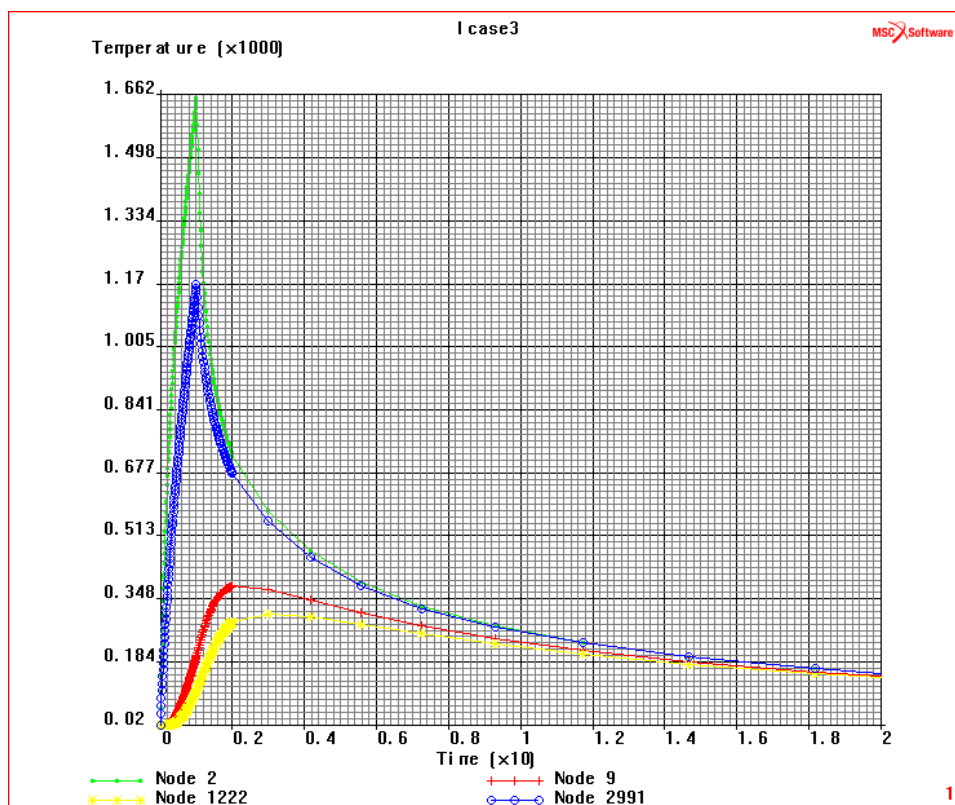


6.2.2. Intenzívebb hűtés alkalmazása

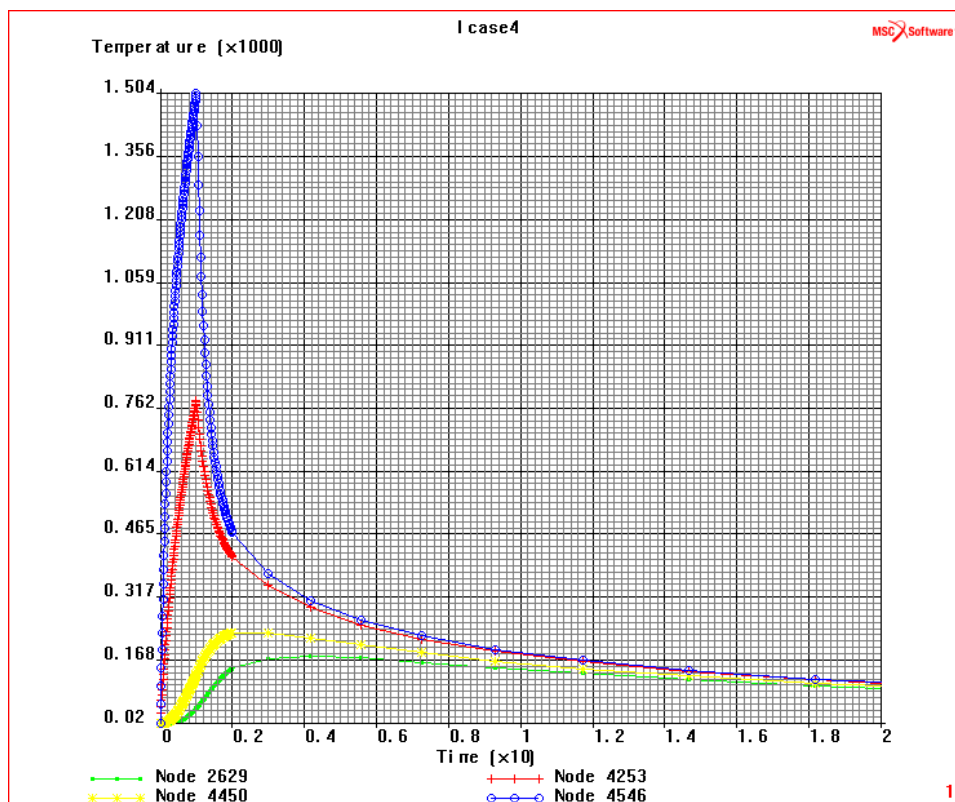
Érdekes megfigyelni mi történik a modellekkel egy intenzívebb hűtés alkalmazása esetén. Ehhez a hűtési tényezőt 0,002 értékre állítottam.

A görbék (12-13. ábrák) maximum értékeit ebben az esetben is ugyanabban az időpillanatban érik el, tehát a hűlés ugyanolyan egyenletességgel megy végbe. Érdekes, hogy az előző, gyengébb hűtéshez képest a tompavarrat középpontjának maximális hőmérséklete nem változik, míg a sarokvarrat középpontjában újabb közel 10°C-os maximumcsökkenés megy végbe. A tompavarrat esetében a távolabb eső pontok hőmérséklet csökkenése a felmelegítési szakaszban is alacsonyabb, 1°C körüli, míg a sarokvarrat pontjaiban 3-4°C. A lehűlési szakasz görbéi ismét intenzívebben csökkennek, a sarokvarrat-geometria már az utolsó időpillanat előtt több száz másodperccel 20°C-os hőmérsékletű (14. ábra).

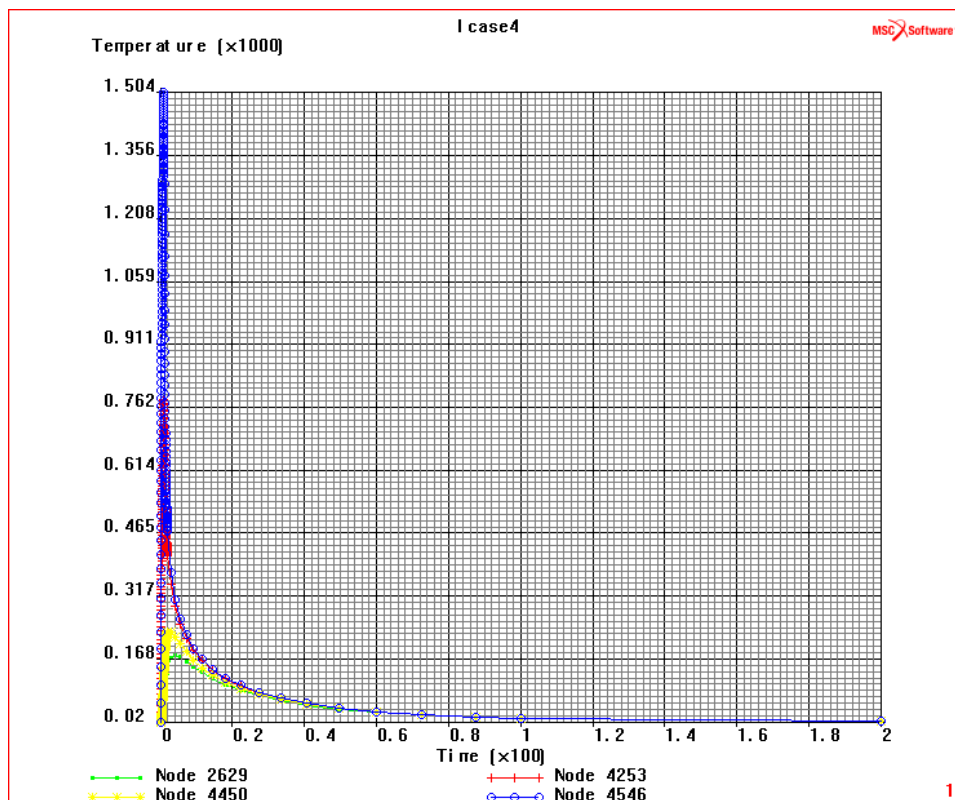
Megállapítható, hogy a sarokvarrat-geometria esetében nem indokolt külső hűtőhatás alkalmazása, a geometria nagy méretéből adódóan jobb hőelnyelési tulajdonsággal rendelkezik.



12. ábra: A tompavarrat csomóponti, intenzívebb lehűlési görbéi (0-20s)



13. ábra: A sarokvarrat csomóponti, intenzívebb lehülési görbéi (0-20s)



14. ábra: A sarokvarrat csomóponti, intenzívebb lehülési görbéi (0-200s)



Összefoglaló

TDK dolgozatom célja olyan, jól parametrizált modellek létrehozása volt, mellyel a valóságban végbemenő folyamatokat kellően megközelítő mértékben lehet vizsgálni. Úgy gondolom a második paraméterezési beállítással ezt sikerült elérni. Beigazolódott az a véges elem modellező rendszereket használók körében ismert és számításba vett tény, hogy a virtuális programfuttatások eredményei nem adnak 100%-ban helyes képet a modellek valós viselkedéséről; valamint az is, hogy a szimulációk helyességének megítéléséhez szükség van tapasztalati ismeretekre is.

Ezeket a modelleket a későbbiekben fel lehet használni különböző terheléses vizsgálatokhoz is, a hegesztés közben esetlegesen végbemenő deformációk modellezésére. A virtuális keresztmetszeti modellek viselkedését szeretném összehasonlítani valóságos körülmények között hegesztett próbadarabok viselkedésével. Jó esély van rá, hogy a hőfolyamatok eredményei közelítik egymást.



Irodalomjegyzék

- [1] BAGAF11NNC Anyagtechnológiai folyamatok numerikus tervezésének alapjai kurzus elektronikus jegyzete, szerző: Dr Dudás Zoltán (BME-ATT / 2012.09.03.)
- [2] Marc® 2010 Volume A: Theory and User Information
- [3] Nuraini, A.A., Zainal A.S.M. and Azmah Hanim, M.A.: The Effect of Welding Process Parameter on Temperature and Residual Stress in Butt-Joint Weld of Robotic Gas Metal Arc Welding, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7(7): 814-820, 2013 ISSN 1991-8178
- [4] Lars-Erik Lindgren: FINITE ELEMENT MODELING AND SIMULATION OF WELDING PART 1: INCREASED COMPLEXITY Journal of Thermal Stresses, 24:141-192, 2001 Copyright 2001 Taylor & Francis 0149-5739/01 \$12.00 + .00
- [5] Lars-Erik Lindgren: FINITE ELEMENT MODELING AND SIMULATION OF WELDING. PART 2: IMPROVED MATERIAL MODELING Journal of Thermal Stresses, 24:195-231 , 2001 Copyright 2001 Taylor & Francis 0149-5739 /01 \$12.00 + .00

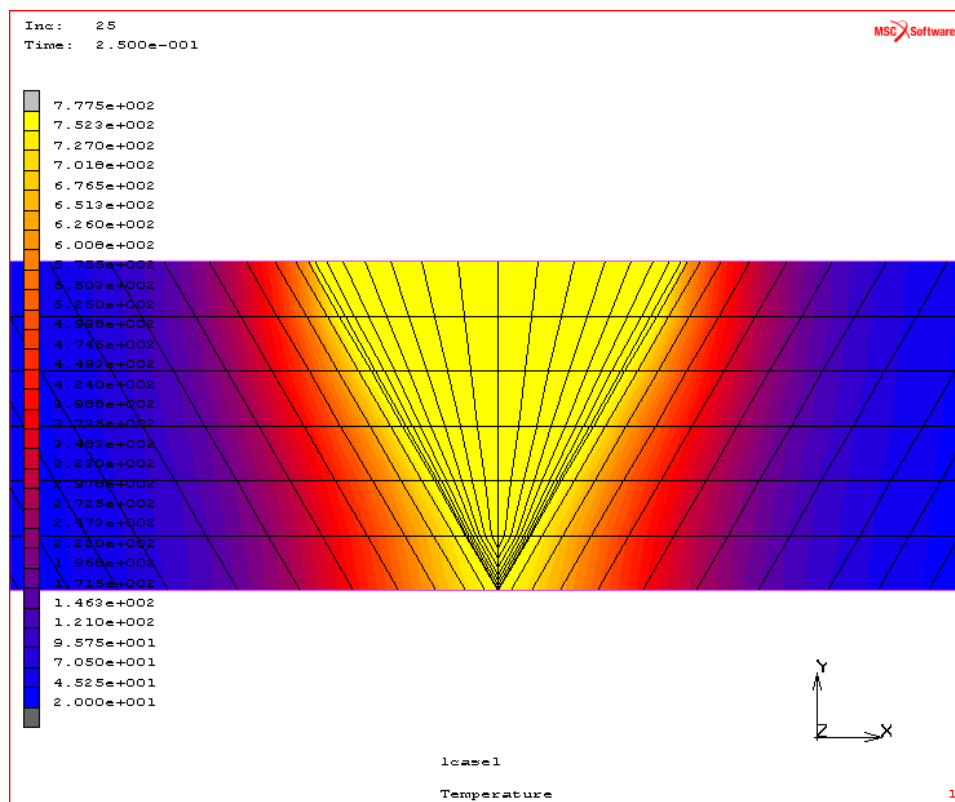


Melléklet

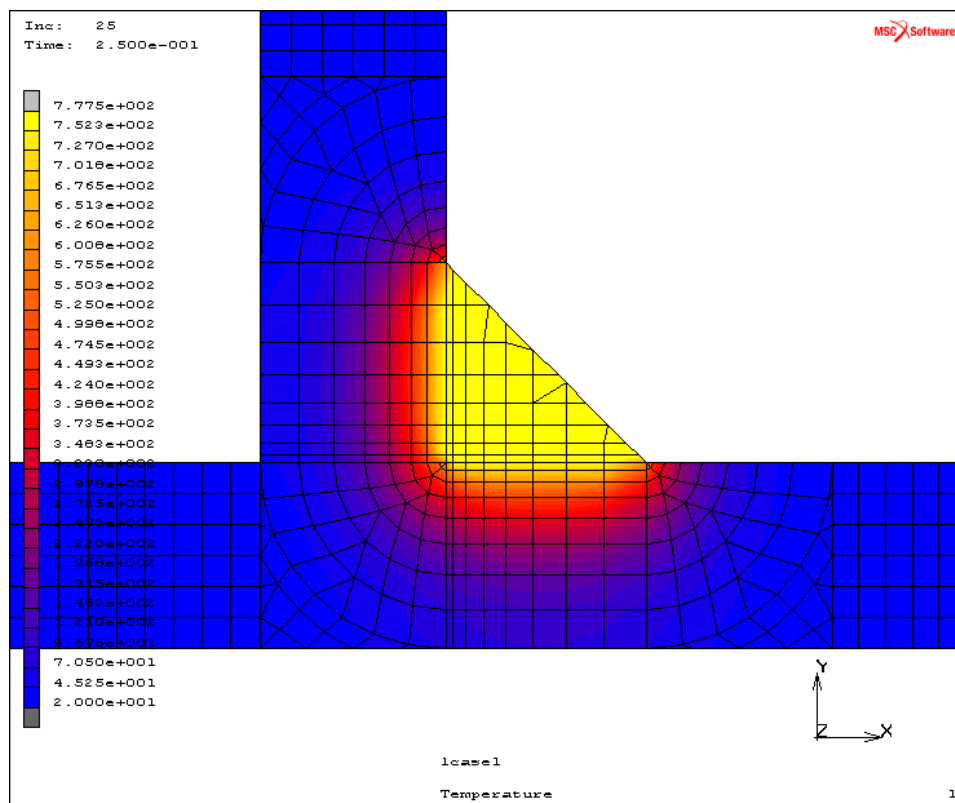


Ábrajegyzék

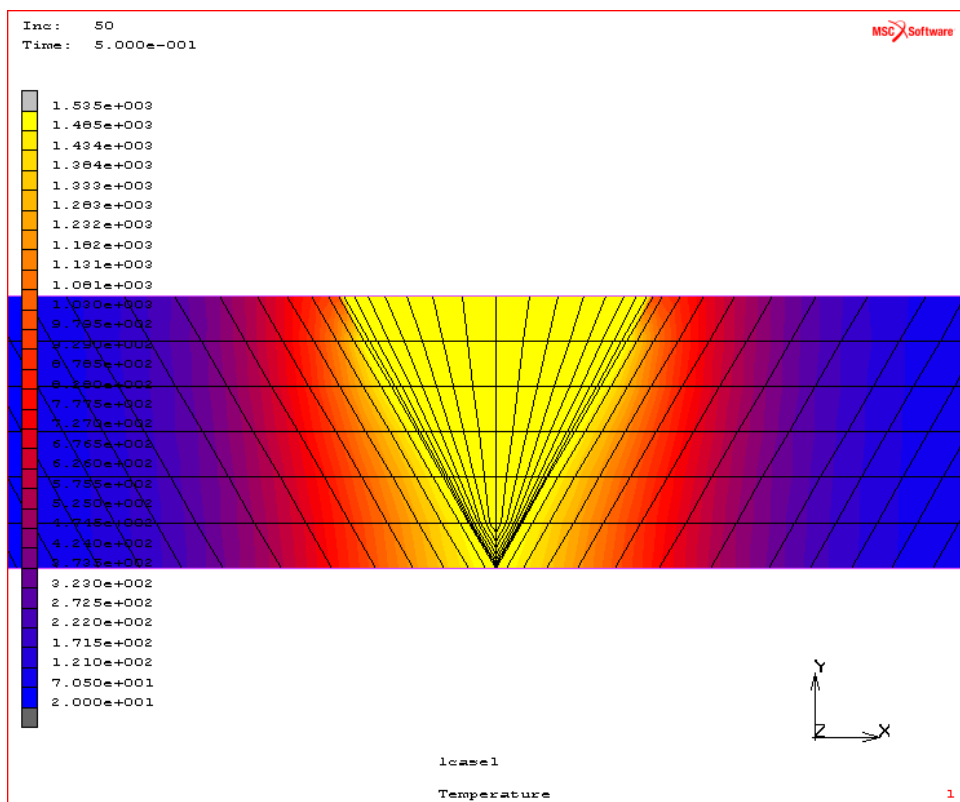
1.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=0,25s$	23
2 m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=0,25s$	23
3.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=0,5s$	24
4.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=0,5s$	24
5.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=1s$	25
6.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=1s$	25
7.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=2s$	26
8.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=2s$	26
9.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=4s$	27
10.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=4s$	27
11.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=10s$	28
12.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=10s$	28
13.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=2000s$	29
14.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=300s$	29
15.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=2000s$	30
16.m. ábra: Tompamodell (választott megoldás), $t=0,25s$	31
17.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=0,25s$	31
18.m. ábra: Tompamodell (választott megoldás), $t=0,5s$	32
19.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=0,5s$	32
20.m. ábra: Tompamodell (választott megoldás), $t=1s$	33
21.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=1s$	33
22.m. ábra: Tompamodell (választott megoldás), $t=2s$	34
23.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=2s$	34
24.m. ábra: Tompamodell (választott megoldás), $t=4s$	35
25.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=4s$	35
26.m. ábra: Tompamodell (választott megoldás), $t=10s$	36
27.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=10s$	36
28.m. ábra: Tompamodell (választott megoldás), $t=2000s$	37
29.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=2000s$	37



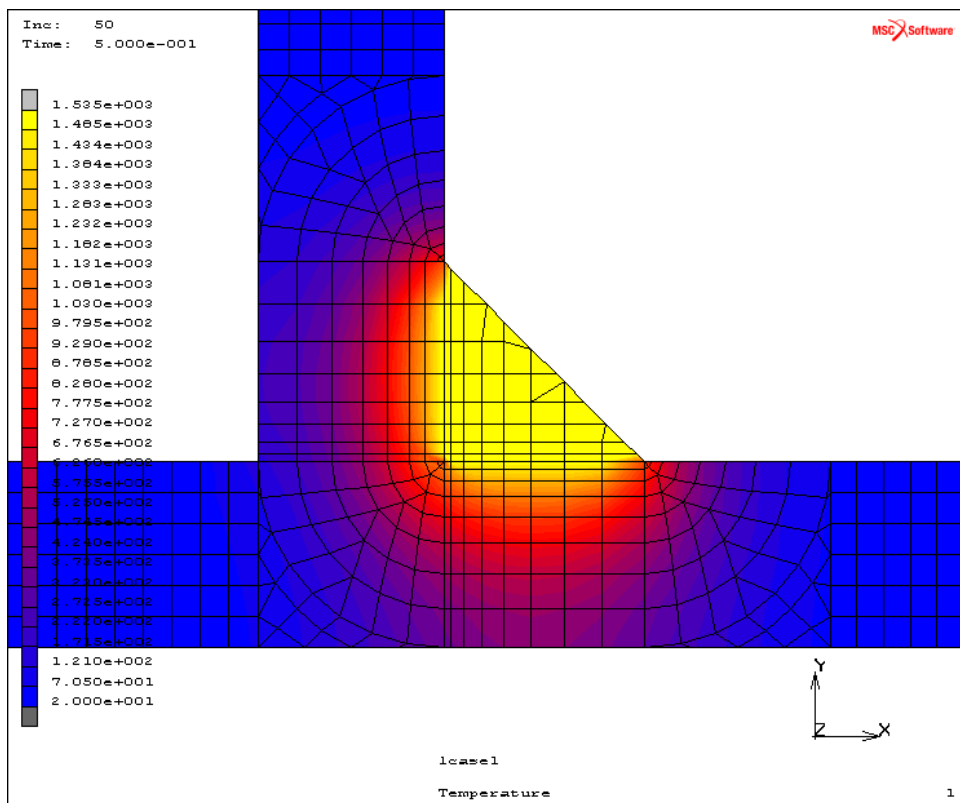
1.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=0,25s$



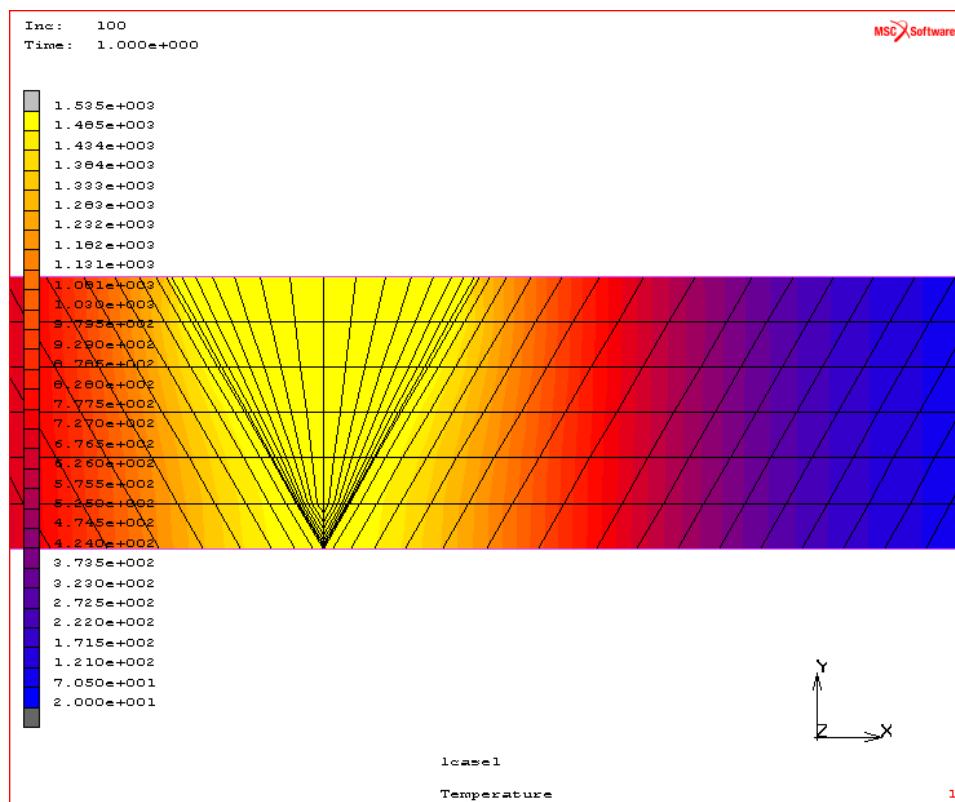
2 m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=0,25s$



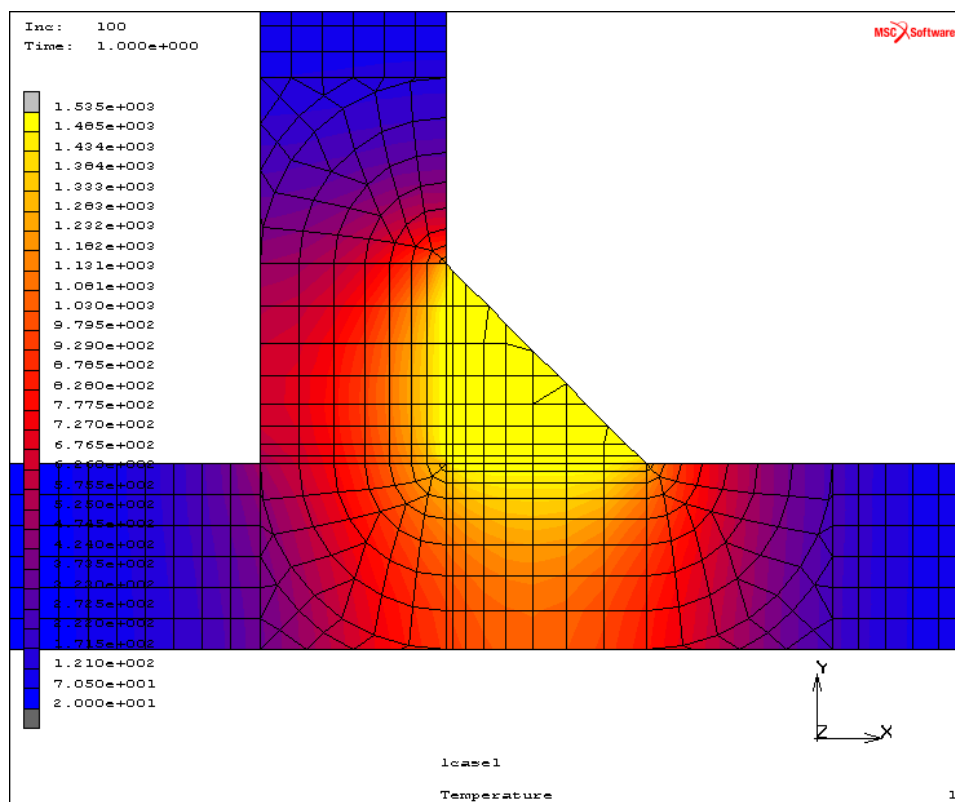
3.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=0,5s$



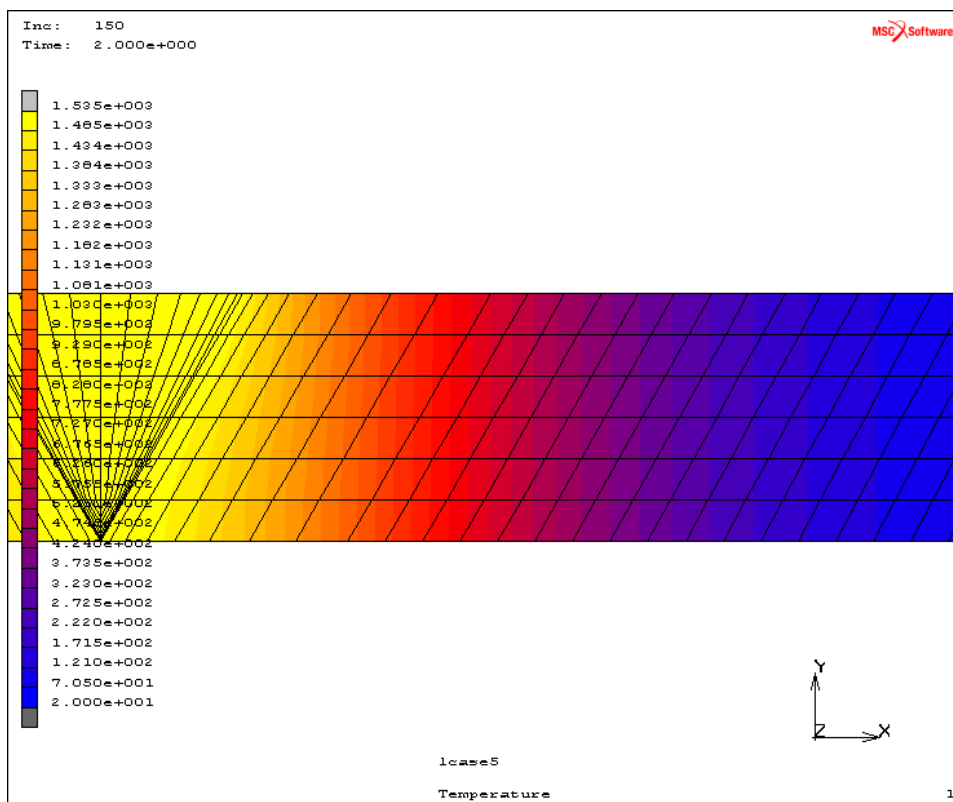
4.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=0,5s$



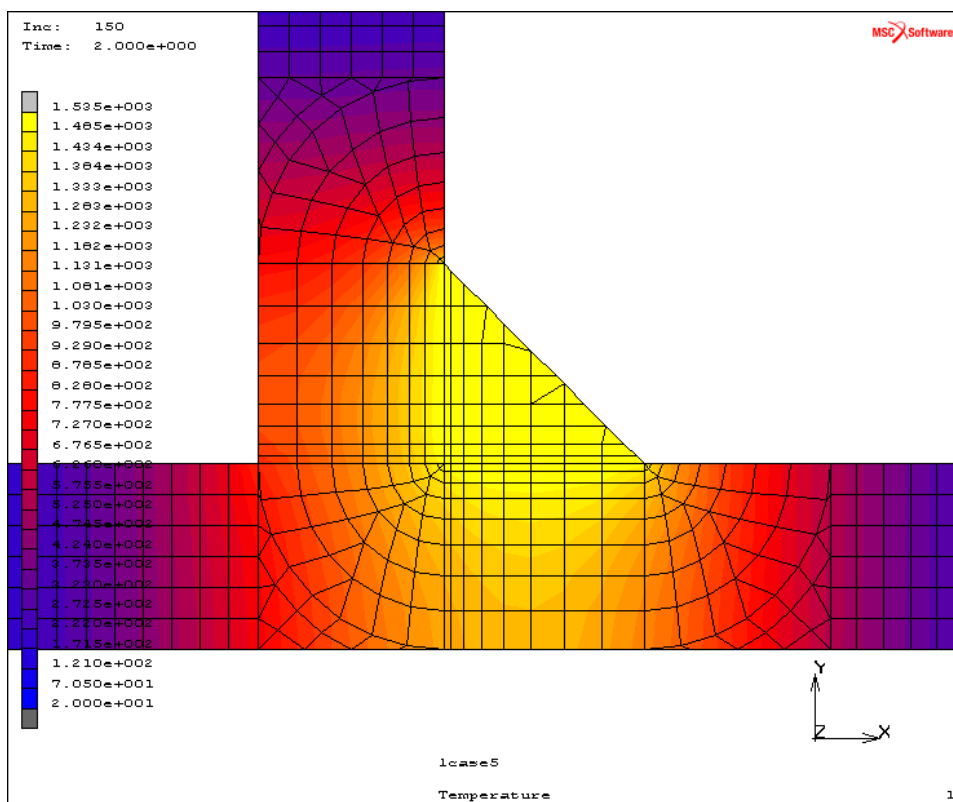
5.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=1s$



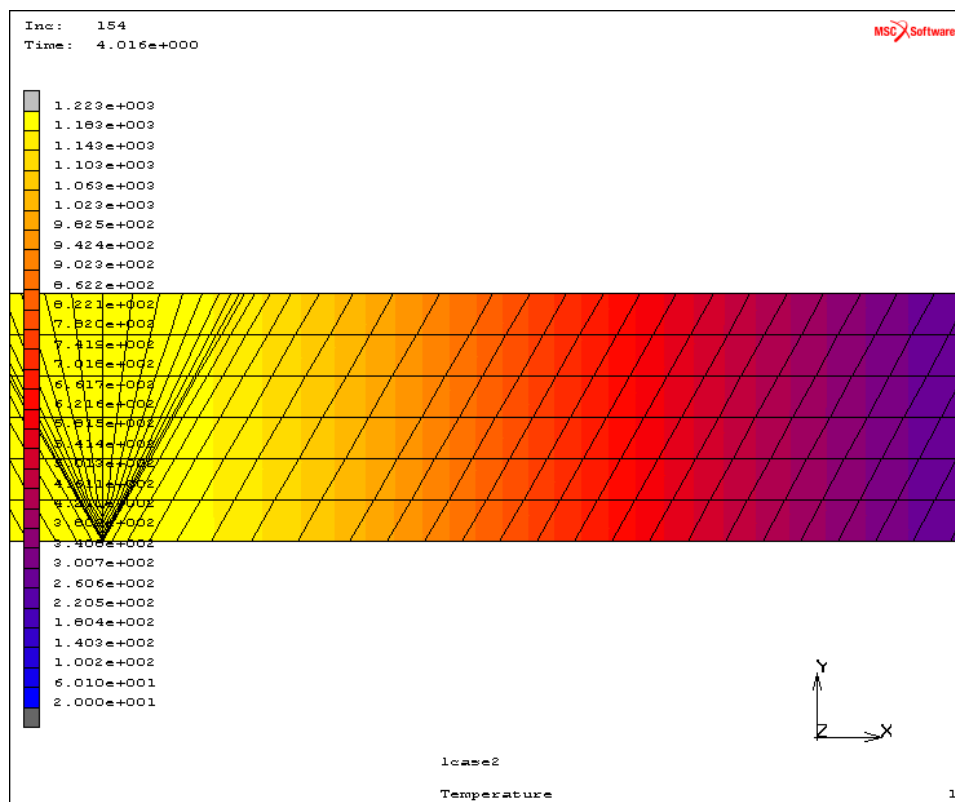
6.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=1s$



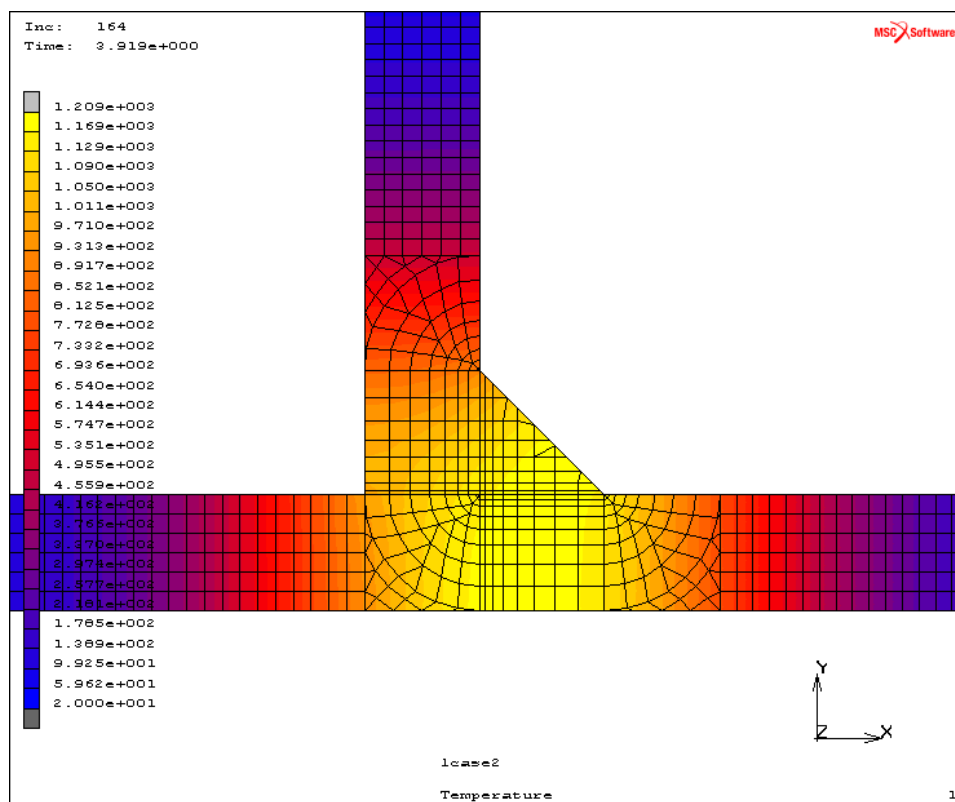
7.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=2s$



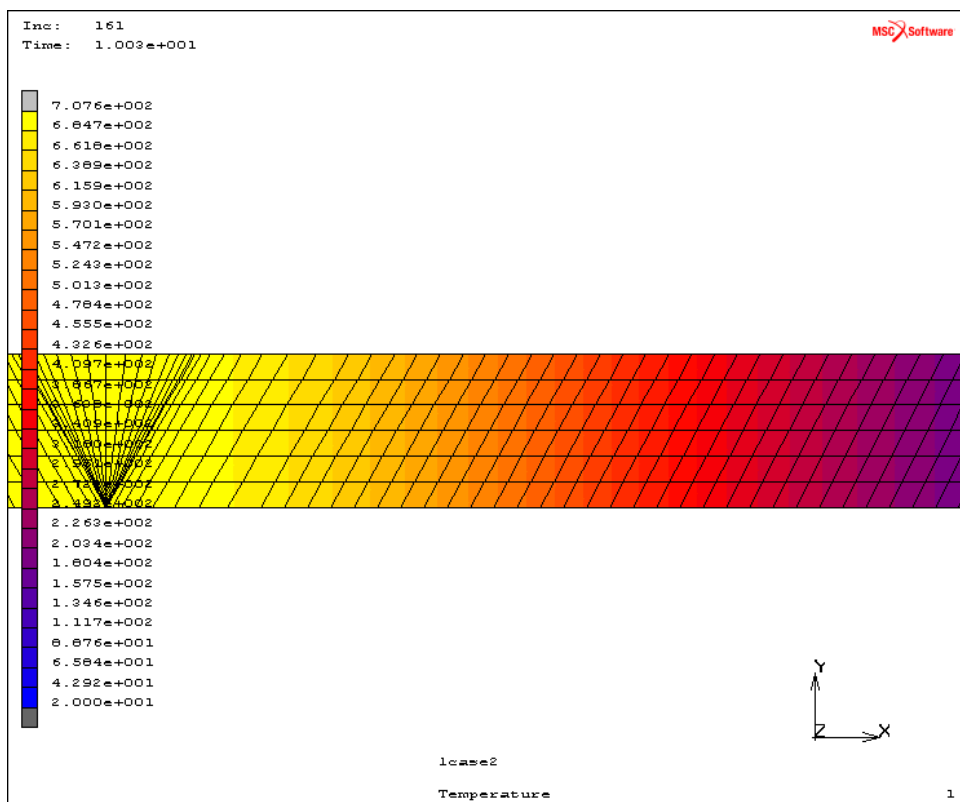
8.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=2s$



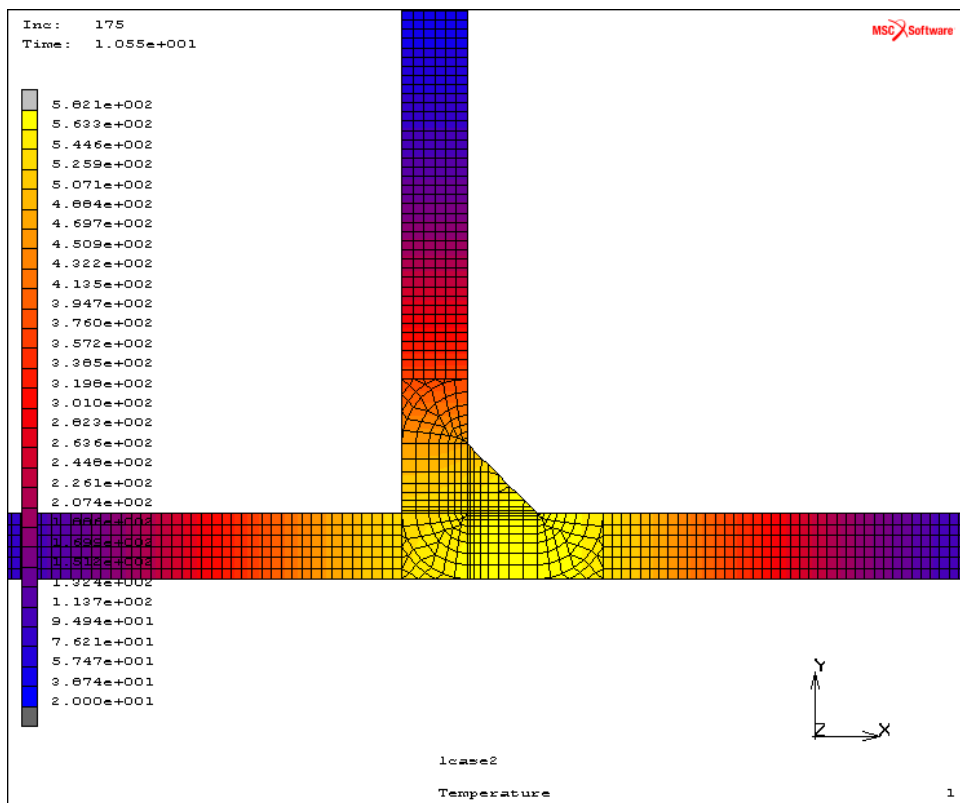
9.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=4s$



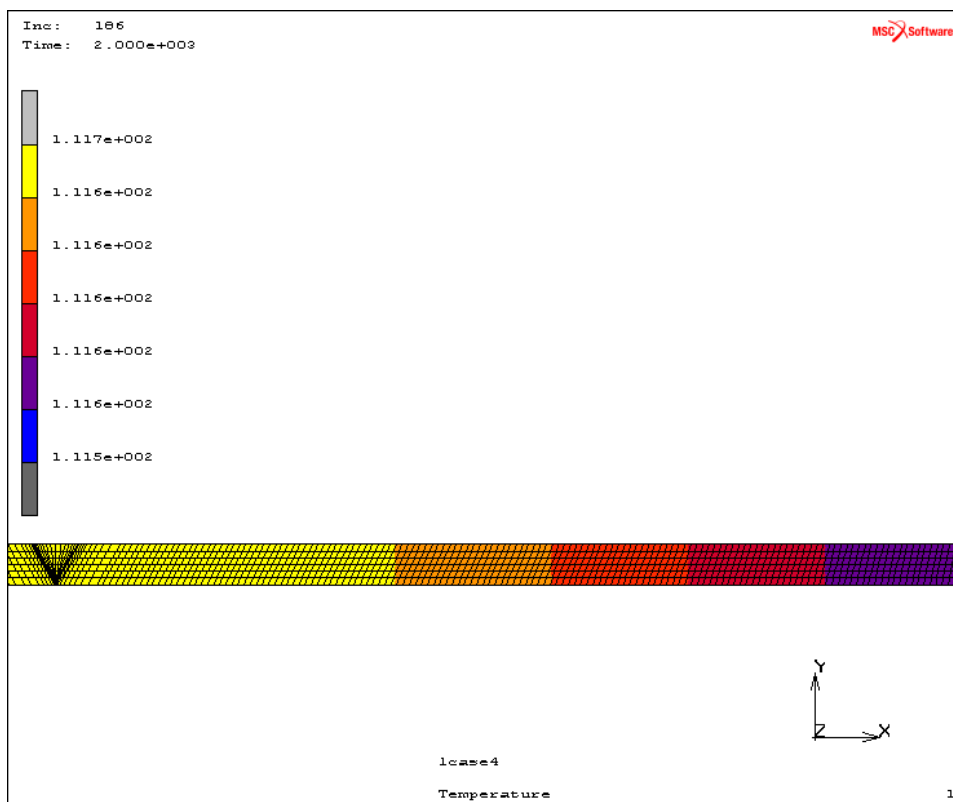
10.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=4s$



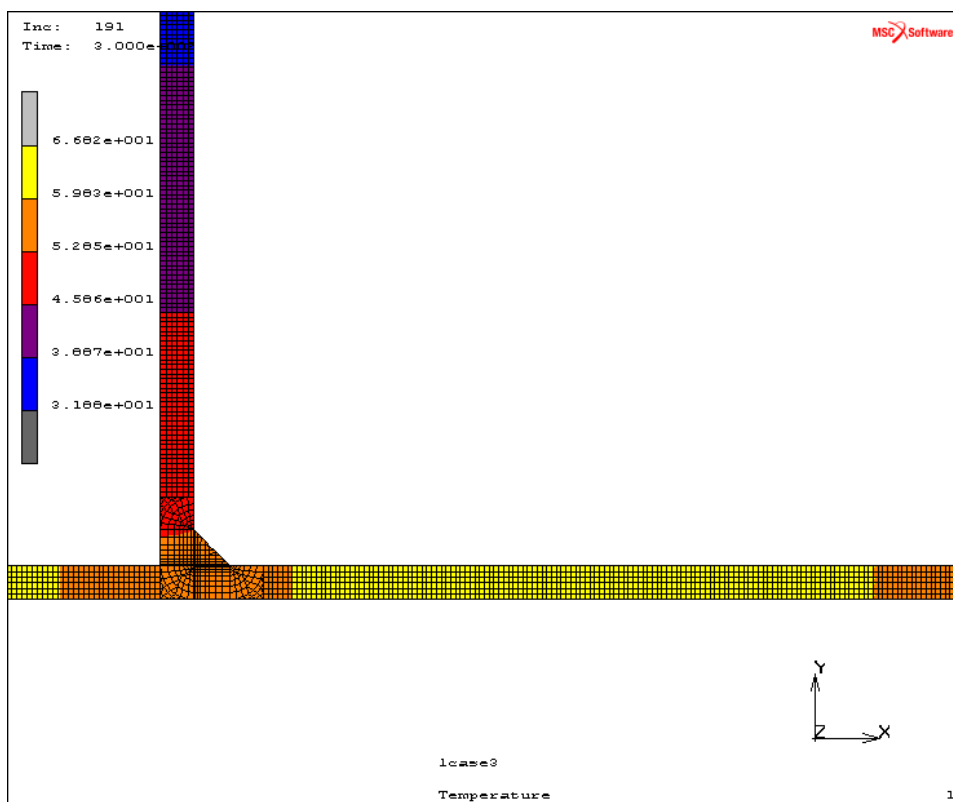
11.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=10s$



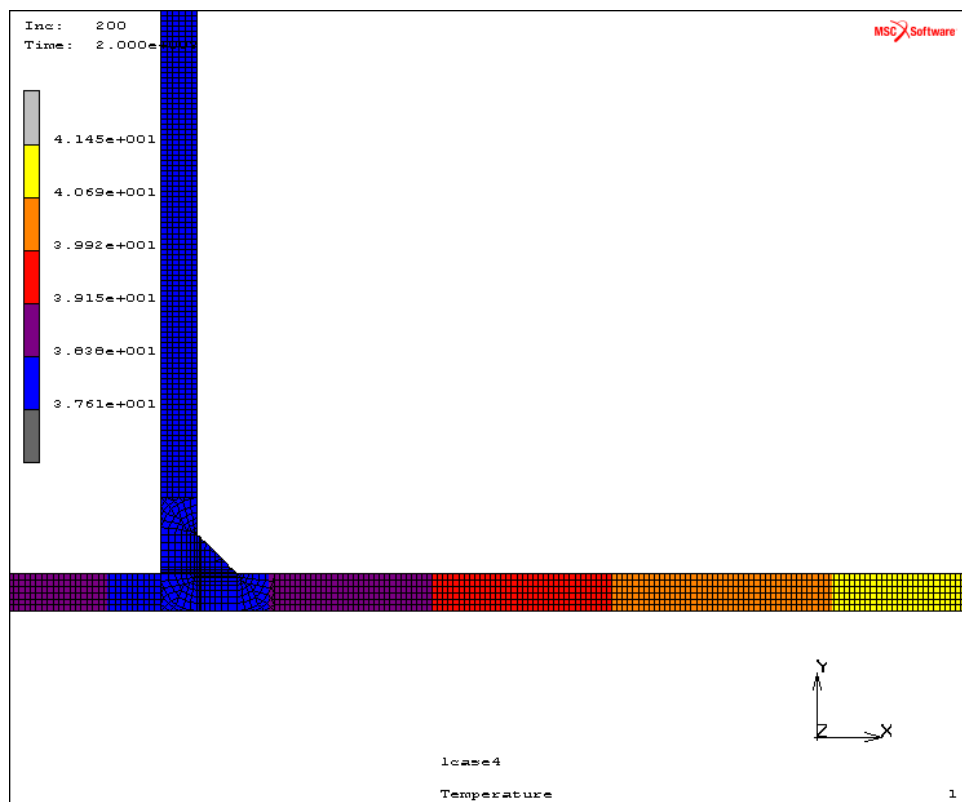
12.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=10s$



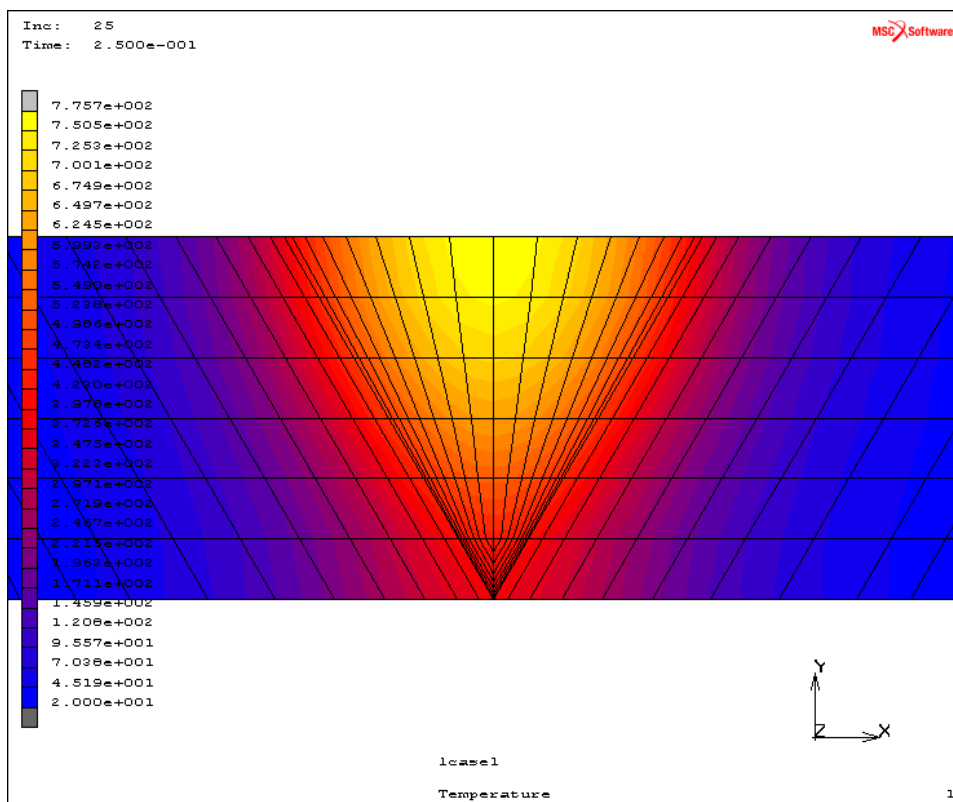
13.m. ábra: Tompamodell (Goldak), $t=2000s$



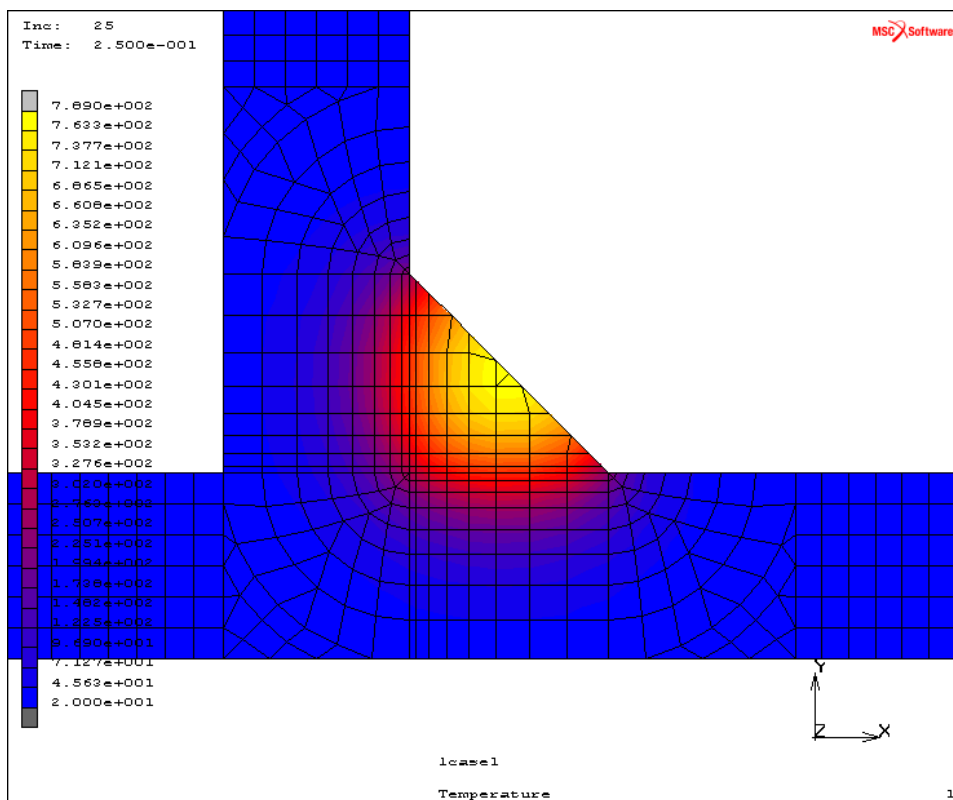
14.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=300s$



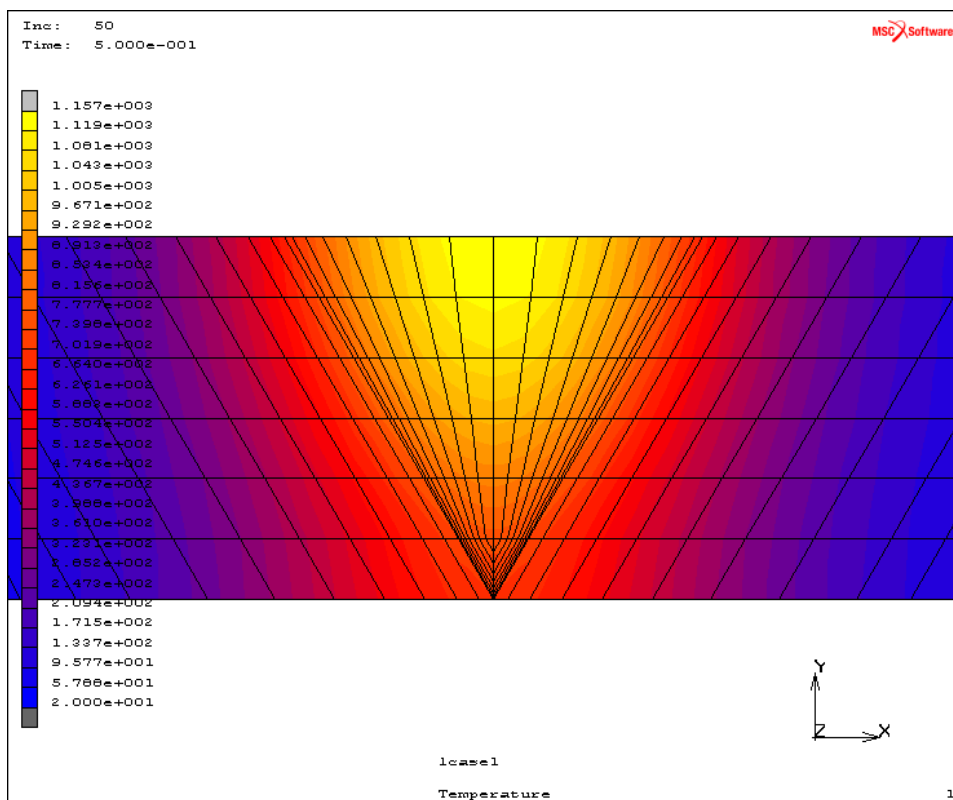
15.m. ábra: Sarokmodell (Goldak), $t=2000s$



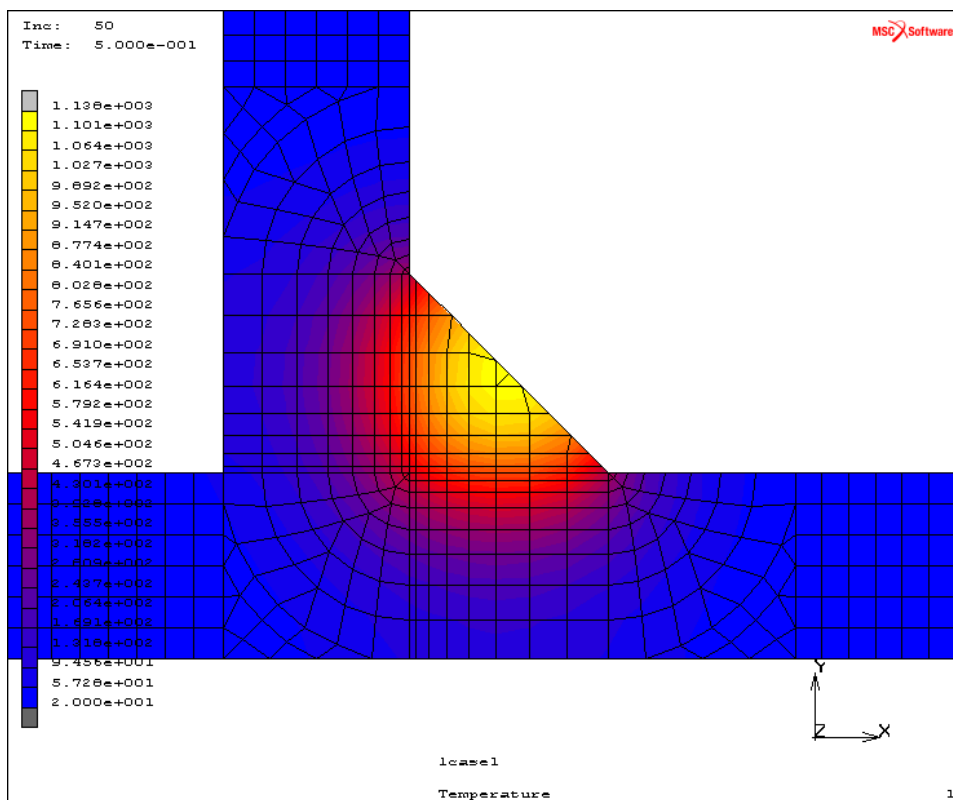
16.m. ábra: Tompamodell (választott megoldás), $t=0,25s$



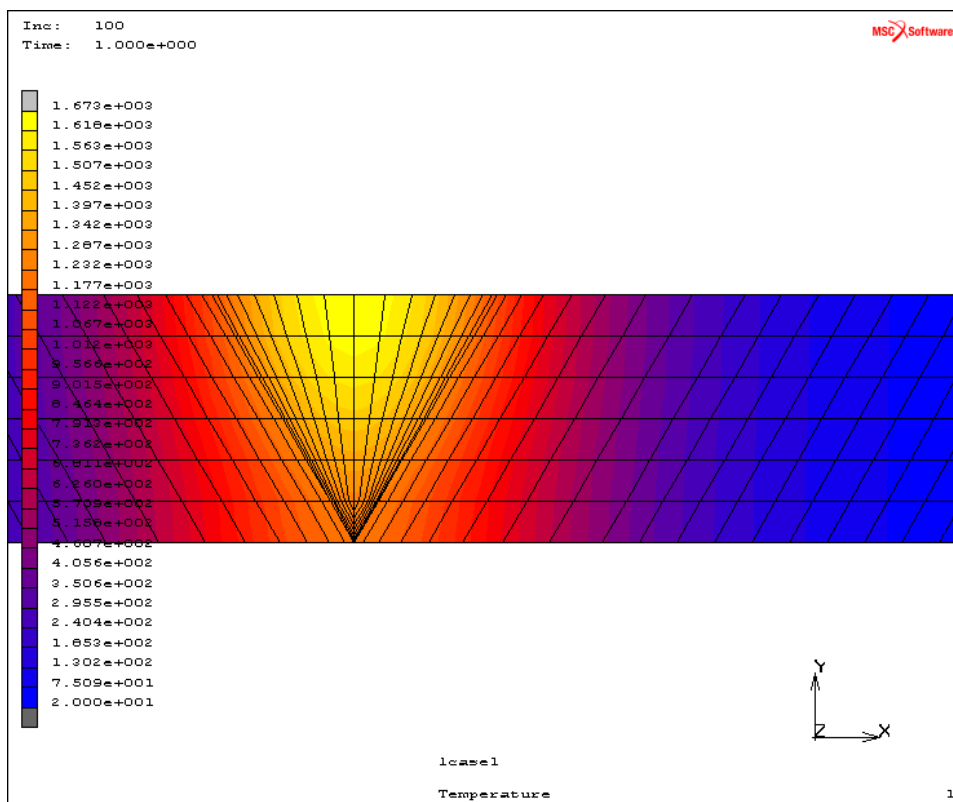
17.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=0,25s$



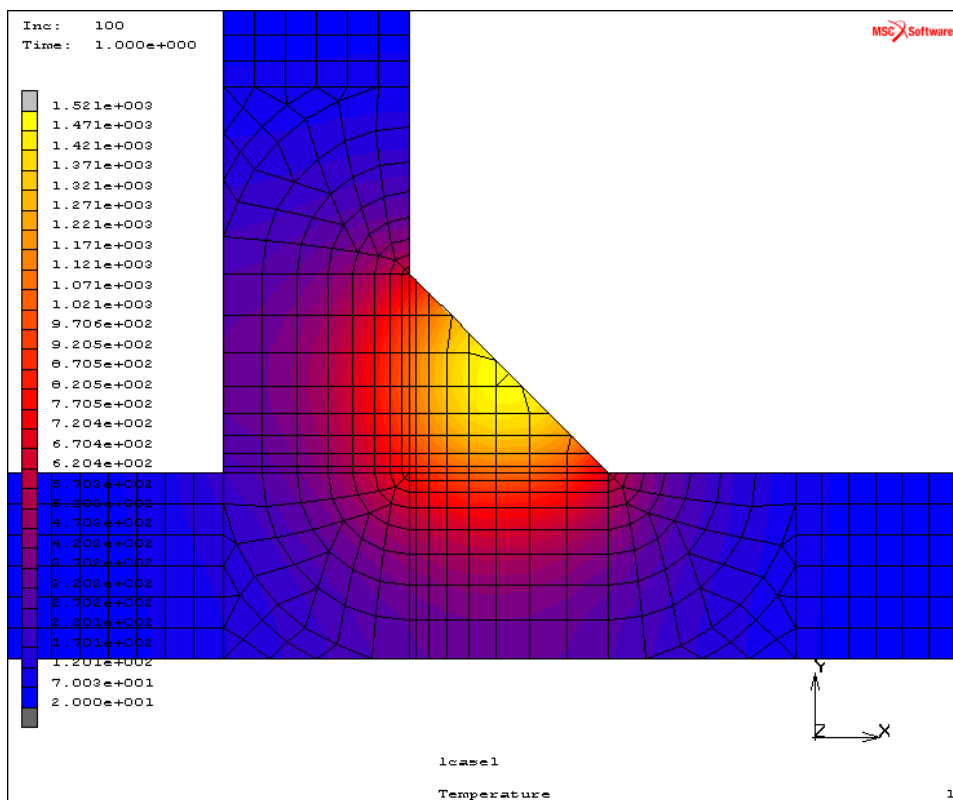
18.m. ábra: Tompamodell (választott megoldás), $t=0,5s$



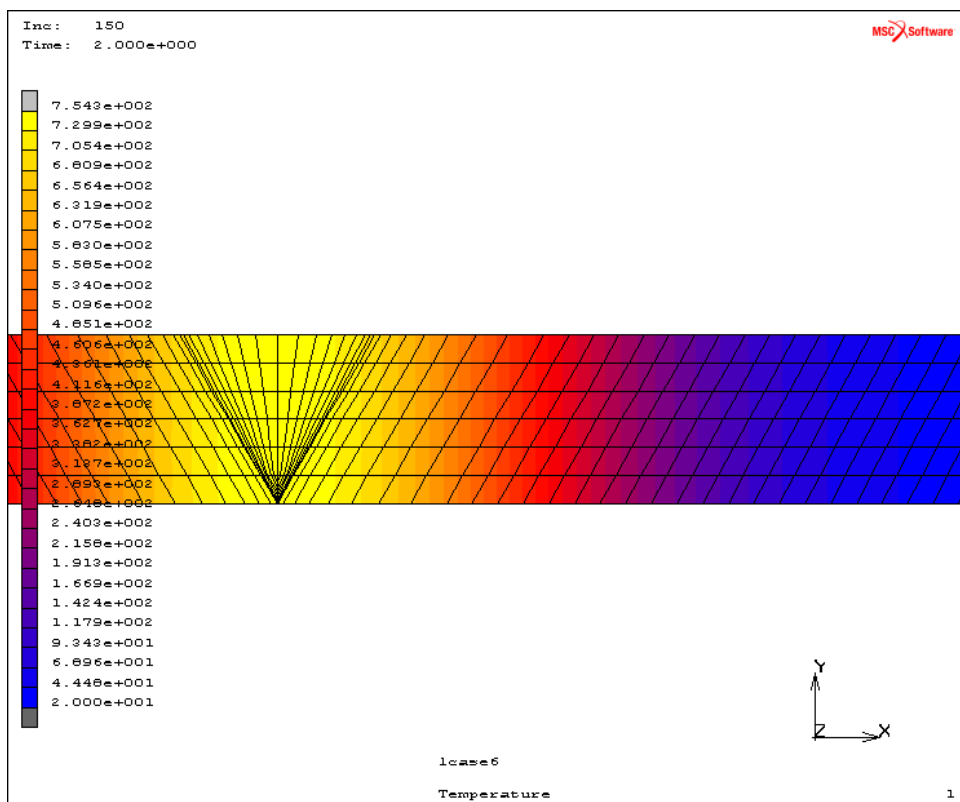
19.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=0,5s$



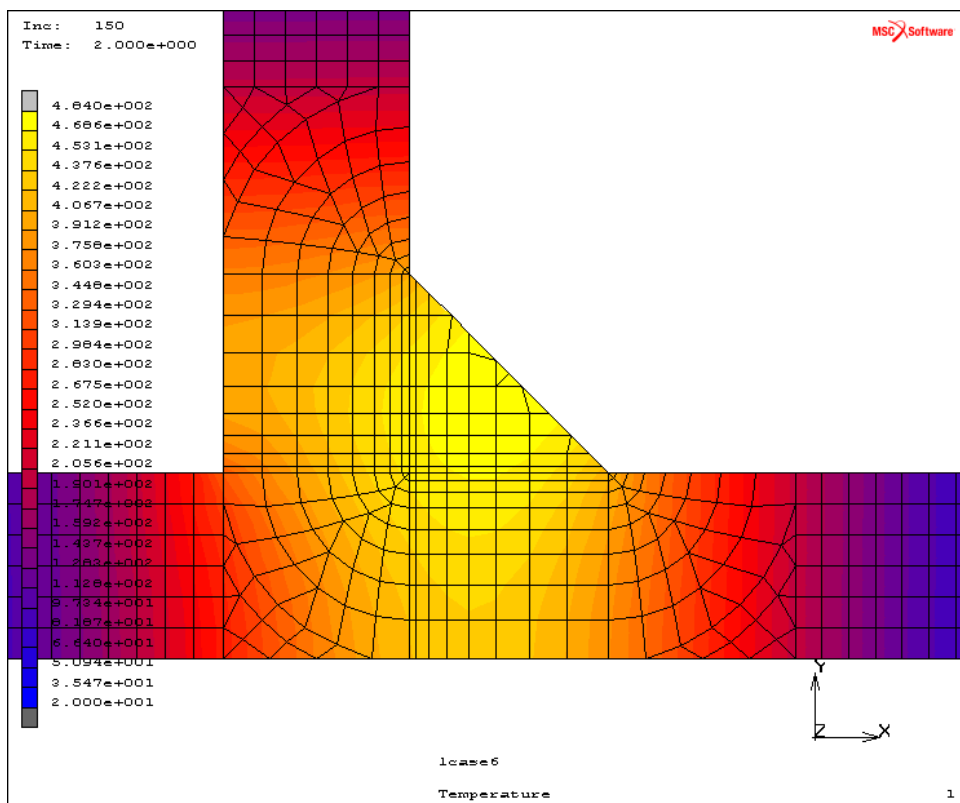
20.m. ábra: Pompamodell (választott megoldás), $t=1s$



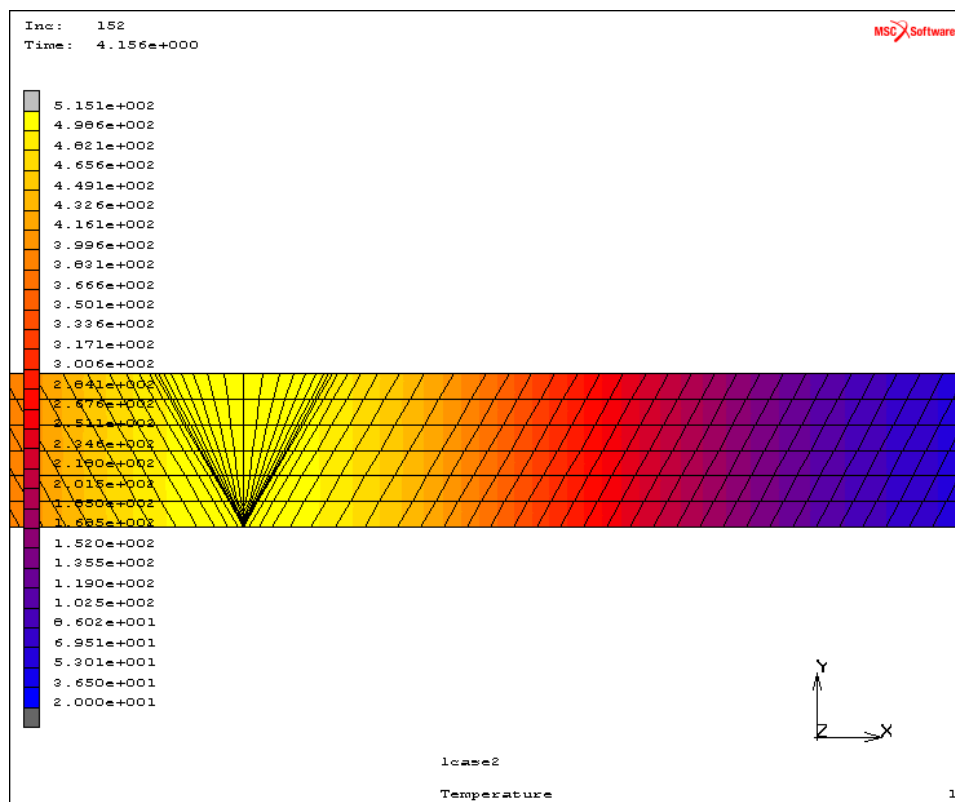
21.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=1s$



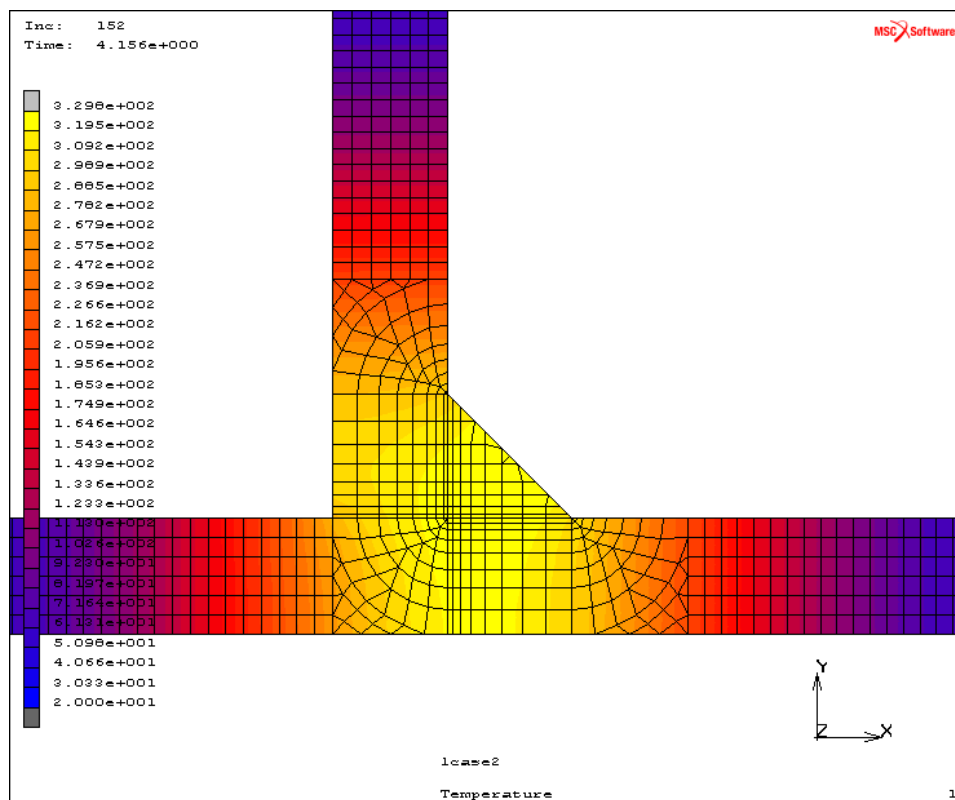
22.m. ábra: Tompamodel (választott megoldás), $t=2s$



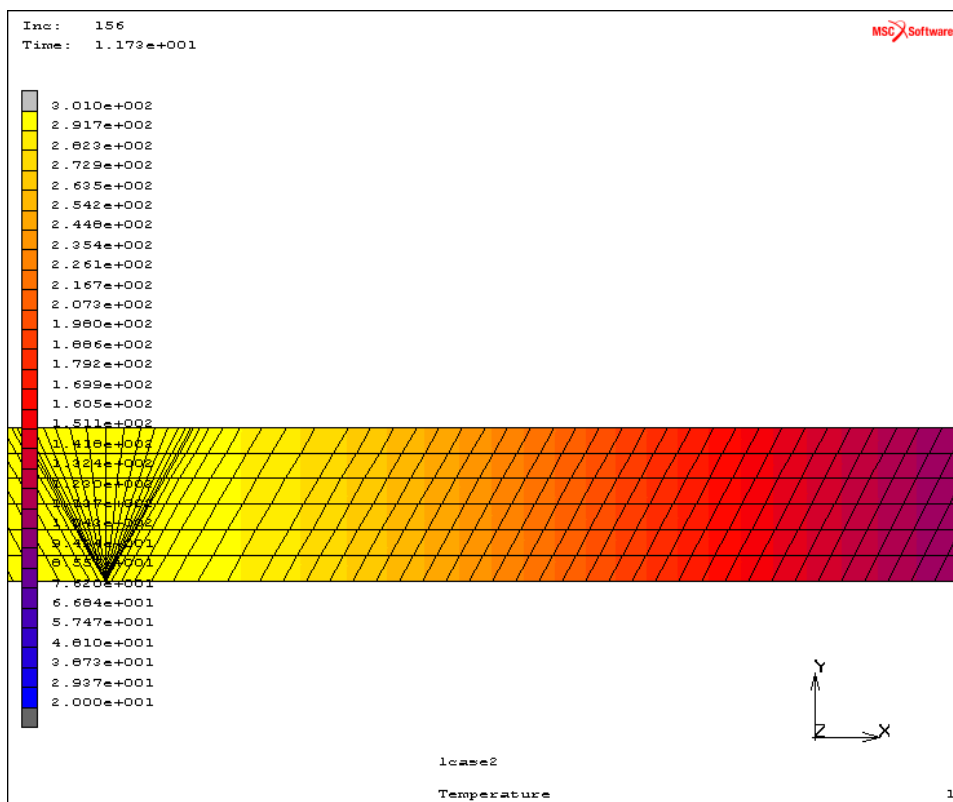
23.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=2s$



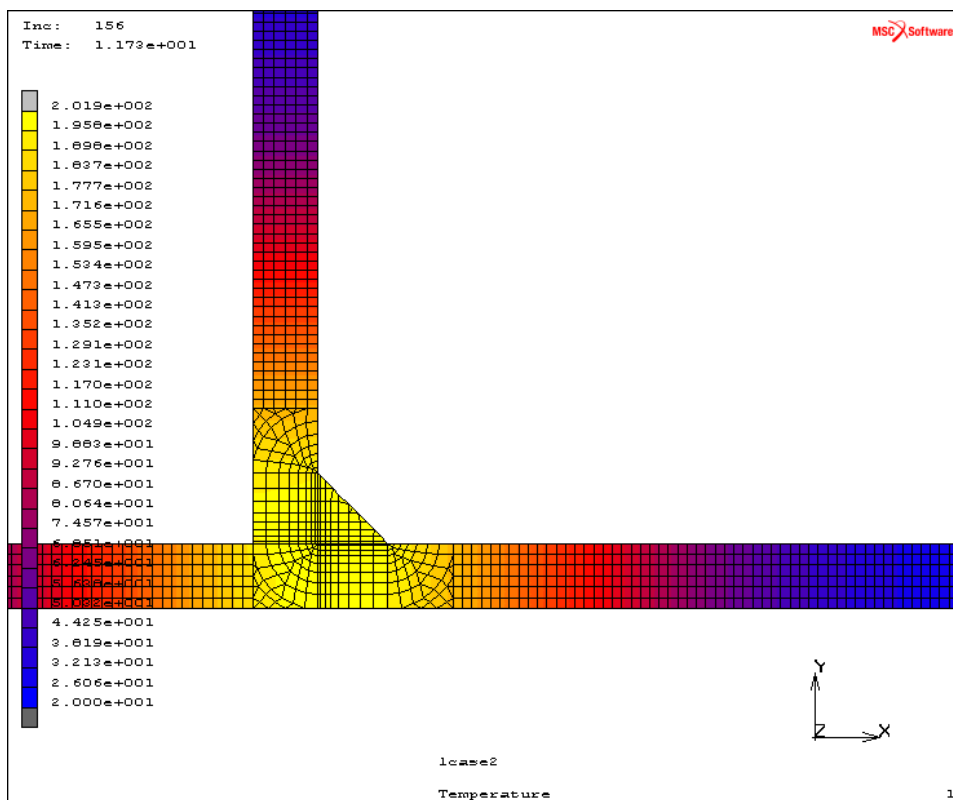
24.m. ábra: Pompamodell (választott megoldás), $t=4s$



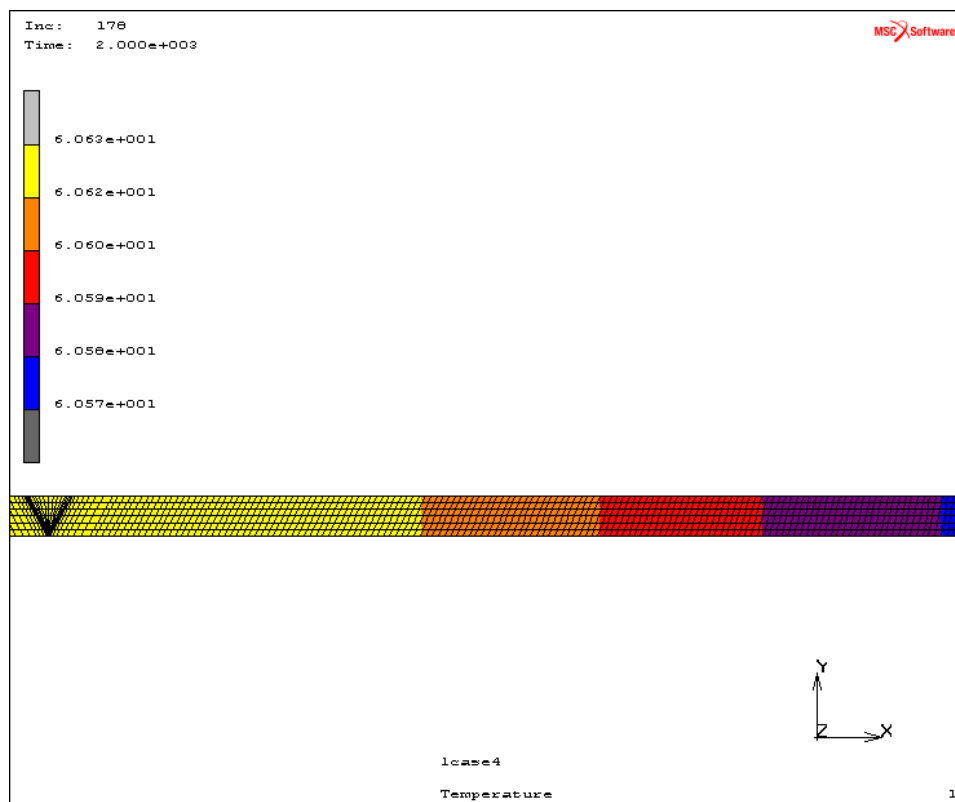
25.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=4s$



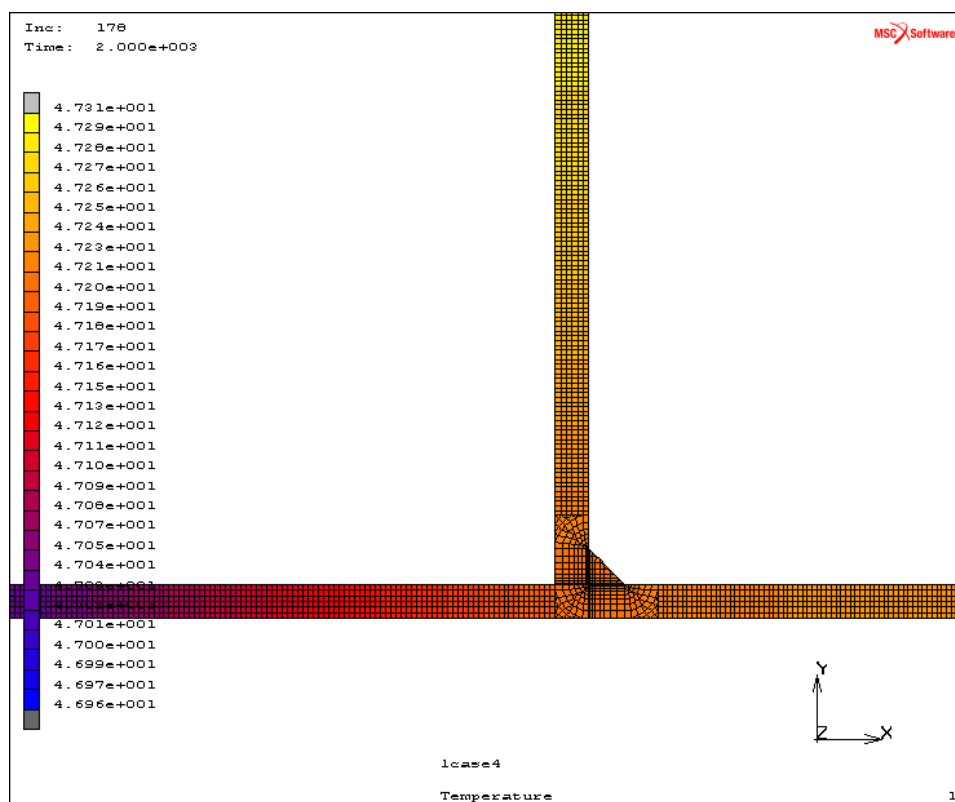
26.m. ábra: Tómpamodell (választott megoldás), $t=10s$



27.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=10s$



28.m. ábra: Tompamodell (választott megoldás), $t=2000s$



29.m. ábra: Sarokmodell (választott megoldás), $t=2000s$