



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia 2014

Tartószerkezeti szekció

Hegesztési eljárás modellezése numerikus módszerrel

Készítette:
Kollár Dénes
Szerkezet-építőmérnök MSc hallgató

Belső konzulens:
Dr. Kövesdi Balázs
egyetemi docens

Budapest
2014

Tartalom

1	Célkitűzés	4
2	Problémakör bemutatása	5
2.1	Deformációk	5
2.2	Sajátfeszültségek	6
2.3	Gyártástechnológiai lehetőségek és megkötések.....	7
3	Eddigi felhasználási területek.....	10
3.1	Tompavarratos kapcsolat	10
3.2	Hegesztett T-kapcsolat	10
3.3	Hegesztett szelvényű oszlop	11
3.4	Karimás csőkapcsolat	12
3.5	Kerékabroncs	14
3.6	CANDU [®] -típusú reaktortartály.....	16
4	Modellezési kérdések	18
4.1	Hegesztésszimuláció szintjei	18
4.2	Termikus és mechanikai analízis	19
4.3	Termikus analízis.....	20
4.3.1	Hőforrások felvétele	20
4.3.2	Anyagjellemzők	23
4.3.3	Lehetséges elemtípusok.....	28
4.4	Mechanikai analízis	30
4.4.1	Anyagjellemzők	30
4.4.2	Lehetséges elemtípusok.....	34
4.5	Speciális ANSYS parancsok	35
4.6	Verifikáció lehetőségei	36
4.6.1	Beolvadás és varratlak vizsgálata	36
4.6.2	Hegesztés modellezésére kifejlesztett program.....	36
4.6.3	Verifikált kutatások	37
4.6.4	Andersson-modell	37
4.6.5	Christensen-kísérlet	38
4.6.6	Nyúlásmérő bélyegek	39
4.6.7	Hőkamerás felvételek	40
5	Tompavarrattal kialakított kapcsolat szimulációja.....	41

5.1	Alkalmazott elemtípusok	41
5.2	Geometria és megtámasztási viszonyok	41
5.3	Anyagjellemzők és hegesztési paraméterek	42
5.4	Termikus analízis eredményei	43
5.4.1	Hőmérsékleti mezők.....	43
5.4.2	Beolvadási és hőbefolyásolt zóna alakja.....	44
5.4.3	Lehűlési görbék	44
5.4.4	Hőáramok	46
5.5	Mechanikai analízis eredményei	46
5.5.1	Elmozdulások.....	47
5.5.2	Metszetek - elmozdulások.....	49
5.5.3	Feszültségek	50
5.5.4	Metszetek - feszültségek	53
6	Szimuláció verifikációja és eredmények összehasonlítása	56
6.1	Geometria és alkalmazott elemtípus.....	56
6.2	Anyagjellemzők és hegesztési paraméterek	56
6.3	Termikus analízis eredményei	58
7	Konklúziók és további kutatási lehetőségek	61
8	Szakirodalom.....	62

1 Célkitűzés

A hegesztési eljárások az iparban a legfontosabb és legtöbbször alkalmazott kapcsolat-kialakítási módszerek közé tartoznak. Bármilyen információ egy hegesztett darab alakjáról, méretéről és sajátfeszültségeiről különösen fontos a minőség tökéletesítésében. [1]

A folyamat során a hőmérséklet megváltozik, az ötvözetben mikroszerkezeti átalakulásokat eredményezve, melyek az anyagtulajdonságok módosulásához vezetnek. A felmelegedés és lehűlés térfogati változásokat idéz elő. A termikus deformációk – amelyek, elasztikusak a hegesztési zóna közelében – és az ebből adódó kialakuló feszültségek maradó torzulásokat okoznak. Ez a hegesztett szerkezetek összeszerelését megnehezíti és a minőség romlásához vezet. Továbbá bizonyos alkalmazásoknál ez a torzulás olyan mértékű lehet, hogy a szerkezet teljes egészében használhatatlanná válik. [1]

A kísérlet alapú, hőkamerás vizsgálatokat célszerű numerikus módszerekkel is támogatni, melyekkel további virtuális kísérletek is végezhetők. E módszerek jelentősen megkönnyítik és felgyorsítják a tervezés folyamatát is. A végesesemes módszer használata a termékfejlesztéseknél már bevált módszer, azonban gyártási folyamatok vizsgálatánál nem kifejezetten terjedt el. A fejlődés legfőbb oka az ipari igény a termelékenység és a termékek minőségének növelésére. Ezeken kívül a különböző gyártási paraméterek hatásának jobb megértése áll még a középpontban. Jelentősége a feszültségek és deformációk kialakulásának meghatározásában rejlik, annak érdekében, hogy meg lehessen becsülni például a repedéskialakulásra és fáradásra való hajlamot és így kivédeni a gyártás vagy használat során esetlegesen kialakuló hibákat. A szimuláció a gyártási folyamatok optimalizálására is alkalmazható. Acélszerkezetgyártó cégek esetében a gyártási selejtek számának minimalizálása is kardinális kérdés. [1]

A kutatás célja tehát a hegesztési folyamatok numerikus szimulációja, és a kidolgozott modellek verifikálása. Ennek keretén belül a hőforrás keltette hőeloszlást és hőterhelést, illetve az alakváltozások és sajátfeszültségek vizsgálatát végeztem el ANSYS 14.0 program alkalmazásával. A gyártásból adódó tökéletlenségek meghatározása különösen fontos aspektusa a témának, hiszen szelvények, lemezmezők esetében a szabványok csak közelítő értékeket adnak meg a kezdeti imperfekciók felvételéhez.

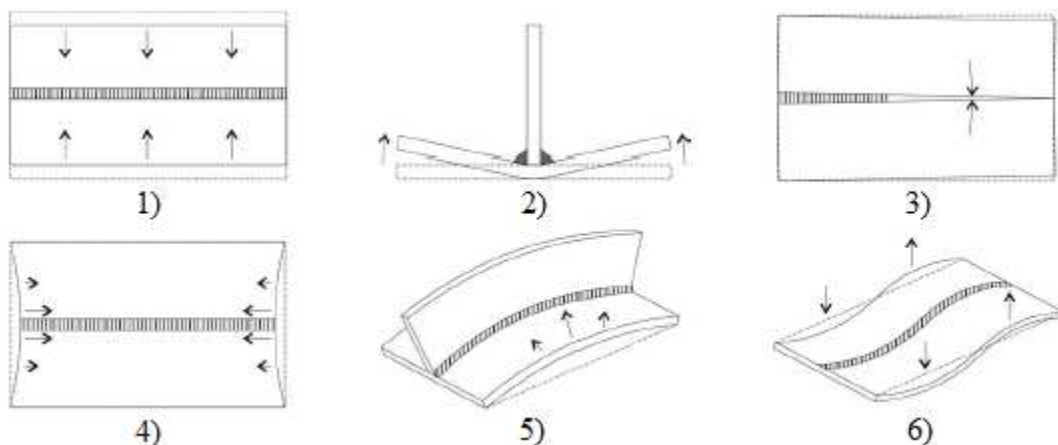
2 Problémakör bemutatása

„A hegesztési maradó feszültségek – mint sajátfeszültségek – a munkadarab inhomogén melegedése és hűlése következtében jönnek létre [2]. Ha a termikus nyúlások és a lehetséges fázisátalakulási nyúlások elegendően nagyok, akkor állandó plasztikus deformációk jönnek létre. A hő hatására az anyag tágul – ahol olvadáspont fölötti hőmérsékleten folyadék halmazállapotú –, viszont a táguló anyagrészt körbeveszi az anyag fel nem hevített nagyobb része, ez akadályozza az alakváltozást [3]. Mivel a koncentrált hőforrás miatt a hőmennyiség kis mennyisége jut el az anyag többi részébe, így a felhevült anyag hideg anyagba ütközve nem tud tovább tágulni, és zömül. A kitágult anyag lehűlés közben nem tudja az eredeti méretét elérni. A két anyagrészt a hegesztési varrat kapcsolja össze, gátolva a szabad alakváltozást. Az így létrejövő zsugorodás következményei lesznek a későbbi maradó feszültségek.

A hegesztés által létrejövő torzulások hasonló módon alakulnak ki, mint a feszültségek, csak ellentétes tendenciával. Amikor az alakváltozás szabadon létrejöhet, a feszültségek lecsökkennek, ellenben, ha az alakváltozás gátolva van, akkor magas feszültségek alakulnak ki.” [4]

2.1 Deformációk

A hegesztés folyamán kialakuló deformációkat három különböző csoportba oszthatjuk: hosszirányú, keresztirányú és vastagságirányú deformációk. A vastagságirányú deformációkért elsősorban a külpontos varratkialakítások felelősek. Az alakváltozások igen jelentősek lehetnek és – amellet, hogy a szerkezet teherbírására kedvezőtlen hatással vannak – akár a szerkezet összeállítását is megnehezíthetik. [5]



1. ábra: Hegesztés során kialakuló deformációk alaptípusai [5]

Az 1. ábra mutatja azokat a deformációkat, melyek a hegesztés során kialakulhatnak. Természetesen ezek az alapjelenségek kombinálódhatnak. Az ábrán az egyes részleteknek a következő jelenségek felnek meg: 1) *keresztirányú zsugorodás*; 2) *szögtorzulás*; 3) *síkbeli vetemedés*; 4) *hosszirányú zsugorodás*; 5) *hajlítás*; 6) *hullámosodás*.

A *keresztirányú zsugorodás* jelensége nem egyenletes lefutású. Hegesztés közben elfordulás következik be, valamint a jelenlévő megtámasztások merevsége is befolyásolja. Így hatással vannak a már meglévő varratok is, de hasonlóan kisebb a zsugorodás a vastagság növekedésével is. [4]

Tompavarratok esetében aszimmetrikus, semleges tengelyhez képest külpontos varratkialakításkor következik be a *szögtorzulás*. Sarokvarratok esetében a lemezek ilyen jellegű deformálódása jelentős lehet, amit a megfelelő varrat és lemezmérettel lehet befolyásolni. [4]

A *síkbeli vetemedést* a lemezek vastagsága és a rövid hegesztési szakaszok kialakítása befolyásolja kedvezően. Extrém esetben akár az illesztési hézag is záródhat, ha nem védekeznek ellene. [4]

Tompavarratok *hosszirányú zsugorodása* a varrat hosszának nagyjából ezredrésze. A sarokvarratok esetében jelentősen függ a gátló keresztmetszettől, vagyis a szélesebb, illetve vastagabb lemez esetén kisebb az értéke. [4]

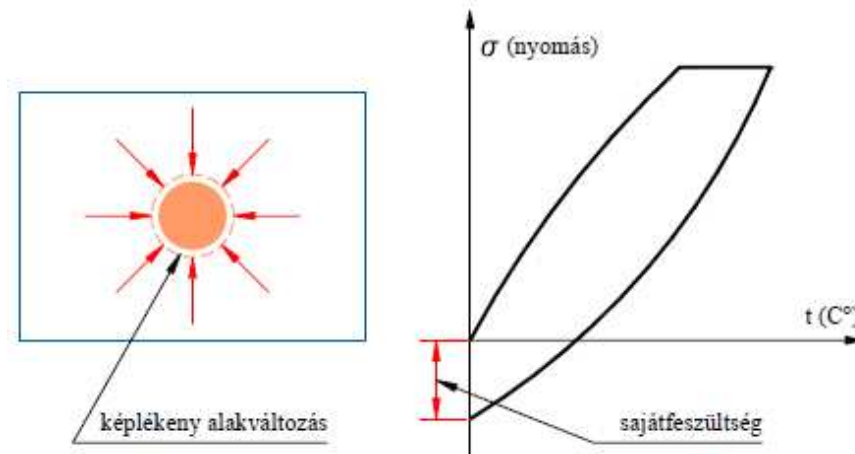
A *hajlítási deformációknak* két változata lehetséges: *hosszirányú és keresztirányú hajlítási deformáció*. A semleges tengelytől távoli, külpontos varratkialakítás miatt alakulnak ki. Jelentős például T keresztmetszet hegesztése során.

Amikor a külső élek nem tudnak ellenállni a nyomófeszültségnek, a lemezben *hullámosodás* (horpadás) keletkezik. Hasonló módon kihajlíthatják a lemezt a kritikuskál nagyobb varrathosszak. [4]

2.2 Sajátfeszültségek

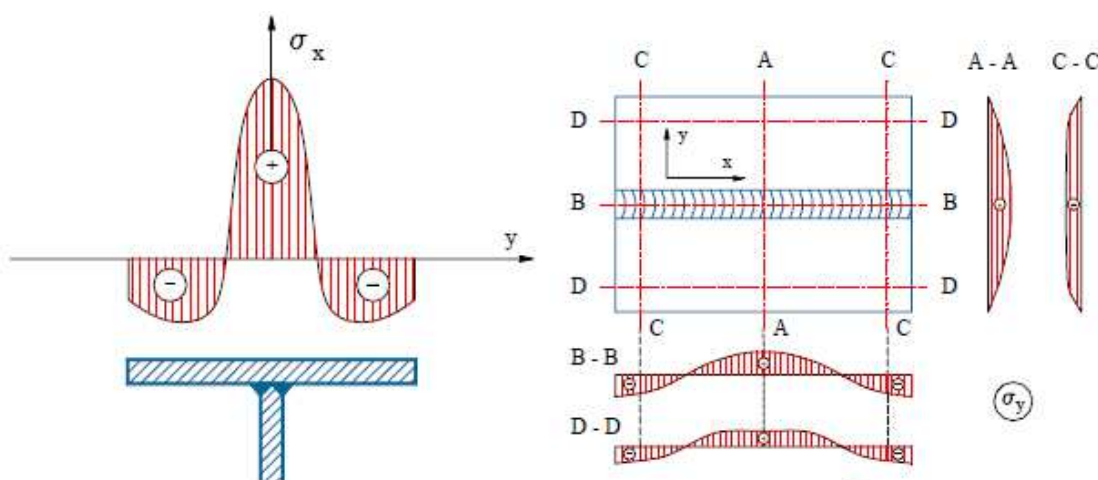
Hegesztés során a lemezek intenzív és egyenlőtlen hőmérsékletváltozást szenvednek, melynek hatására deformálódnak és jelentős sajátfeszültségek keletkeznek bennük.

A hőforrás környezetében az anyag képlékenyen alakváltozik, amely a hegesztés után sem tűnik el (2. ábra).



2. ábra: Képlékeny zóna és maradó sajátfeszültség [6]

Az anyag belülről kifelé tágul, így a varrat mellett kezdetben nyomófeszültségek jelennek meg, de maga a hegfürdő nem vesz fel erőt. A hőforrás elhaladtával a varrat szilárdulni, és ezzel együtt a lehülés miatt zsugorodni kezd, ami a belső mezőben húzófeszültségeket okoz. Az egyensúlyi külső hőmérsékletet elérve a lemez tengelyében húzó, a széleken nyomó feszültségek maradnak (3. ábra).



3. ábra: Hosszirányú és keresztirányú sajátfeszültségek eloszlása [6]

2.3 Gyártástechnológiai lehetőségek és megkötések

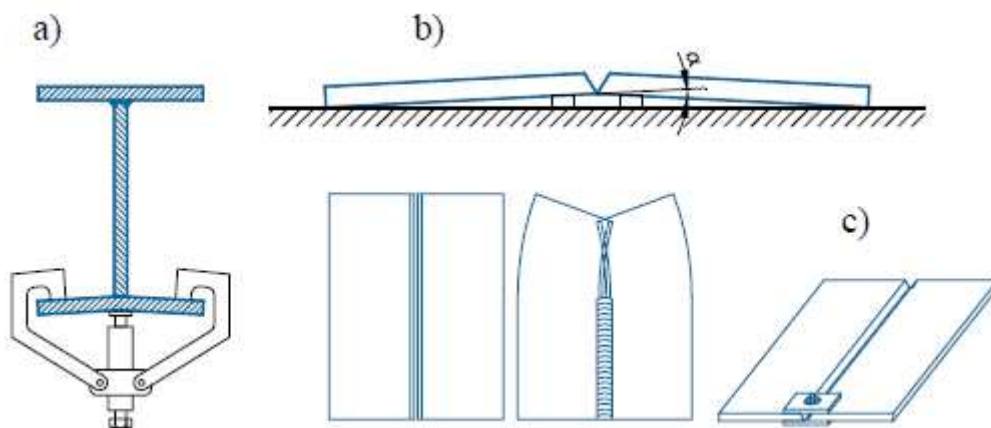
A sajátfeszültségek és alakváltozások minimalizálására több lehetőség is adódik. Tervezés során a hegesztett szerkezetek esetén törekedni kell arra, hogy a varratok a legkisebb igénybevételű régiókba kerüljenek. Komplex szerkezet esetén a szállíthatóságot is az elsődleges szempontok között kell említeni, emiatt a részegységekre bontás különös

jelentőséggel bír. A kedvező hegesztési helyzet biztosítása mellett az egyszerű készülékezésre is figyelni kell. Továbbá az egyengetés és hőkezelés utólagos elvégzését is egyszerűen el kell tudni végezni. [6]

Törekedni kell arra, hogy a hegesztett kötések száma a lehető legkisebb legyen, valamint a szükségesnél nagyobb varratkeresztmetszeteket el kell kerülni. Célszerű szimmetrikusan elhelyezett varratokat alkalmazni a szerkezeteknél. A varratok kereszteződését kerülni kell, hiszen a sajátfeszültségek koncentrálódása miatt igencsak előnytelen szerkezeti kialakításról van szó. Egy ilyen csomópont fáradás szempontjából kedvezőtlen lehet. [6]

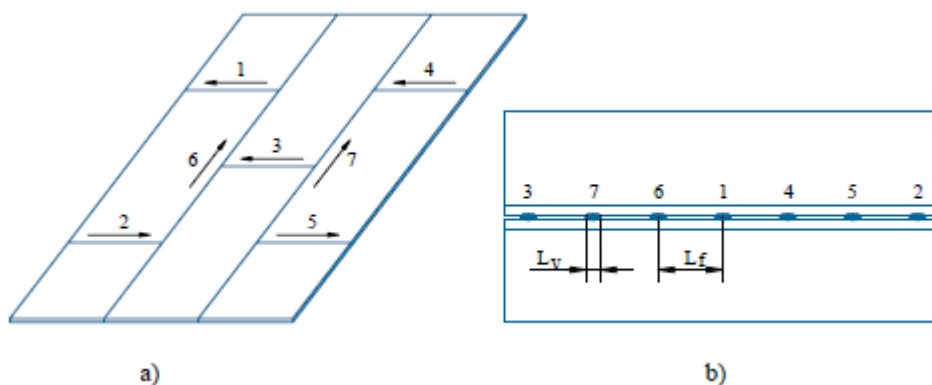
A deformációkat alapvetően befolyásoló tényezők: az alapanyag hőfizikai és mechanikai jellemzői, összetétel, az alapanyag vastagsága, a varrat alakja és mérete, a hegesztési eljárás fajlagos hőbevitel (hegesztési paraméterek), a kiindulási hőmérséklet (előmelegítés, stb.), a hegesztési sorrend és a megtámasztási viszonyok (gátolt, vagy kevésbé gátolt az alakváltozás). [4]

A deformációk csökkentése érdekében a gyártás során alkalmazott leggyakoribb példákat a 4. ábra foglalja össze egyszerűbb szerkezeteknél: a) feszítőkészülék alkalmazása szögelfordulás megelőzésére; b) szögelfordulás csökkentése elődöntéssel tompavarrattal kialakított lemez esetén; c) illesztési hézag záródásának megakadályozása síkbeli vetemedés során. [6]



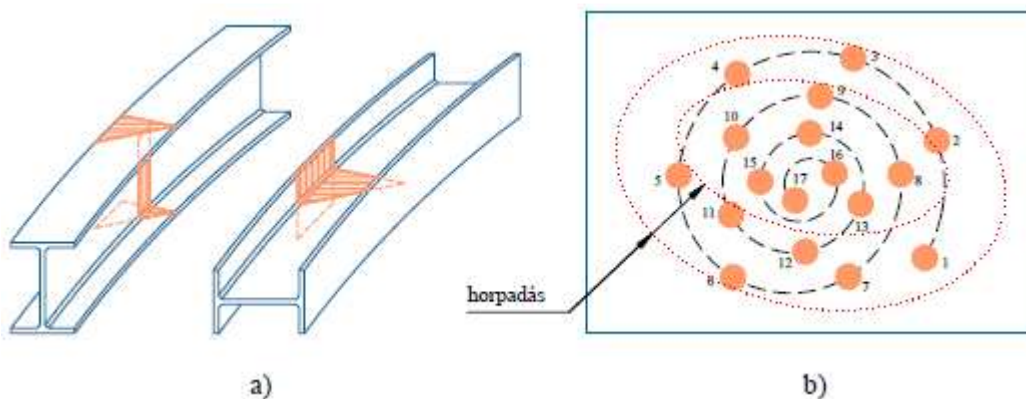
4. ábra: Gyártástechnológiai lehetőségek deformációk csökkentésére [6]

Komplex, nagy volumenű szerkezetek esetén említésre méltó a hegesztési sorrend helyes megválasztása. Ez a kérdés felmerülhet például több táblából hegesztett lemeznél (5. ábra a) részlete) vagy a fűzővarratok kialakítási sorrendjénél. A helyes sorrend megválasztásával jelentősen csökkenthetőek a sajátfeszültségek és alakváltozások. A 5. ábra b) részletén feltüntetett fűzővarrat-távolság és varrathossz aránya nagyjából 10-30 között változik optimális esetben. [6]



5. ábra: Hegesztési sorrend megválasztása [6]

A deformálódott hegesztett szerkezetek utókezelése alapvetően kétféle módon történhet: *egyengetéssel* vagy *hőkezeléssel*. Egyengetés során a maradó alakváltozással azonos nagyságú, de ellentétes értelmű képlékeny alakváltozást kell a szerkezettel eszközölni. Ezen belül megkülönböztethetünk hideg és meleg egyengetést. A kettő közötti különbség, hogy hideg egyengetés során statikus vagy dinamikus erőhatással találkozunk a szerkezettel, míg meleg egyengetés esetén egy gyors felmelegítésről (600-800 °C), majd gyors lehűtéséről van szó a munkadarab megfelelően megválasztott részein. Ez történhet pontokban, pontsorokban, sávokban vagy akár ékalakban is (6. ábra). Fontos megjegyezni, hogy hideg egyengetés után már nem szabad a munkadarabot hőkezelné. [6]



6. ábra: a) I-tartó egyengetése hőékekkel és hősávokkal; b) horpadás egyengetése hőpontokkal [6]

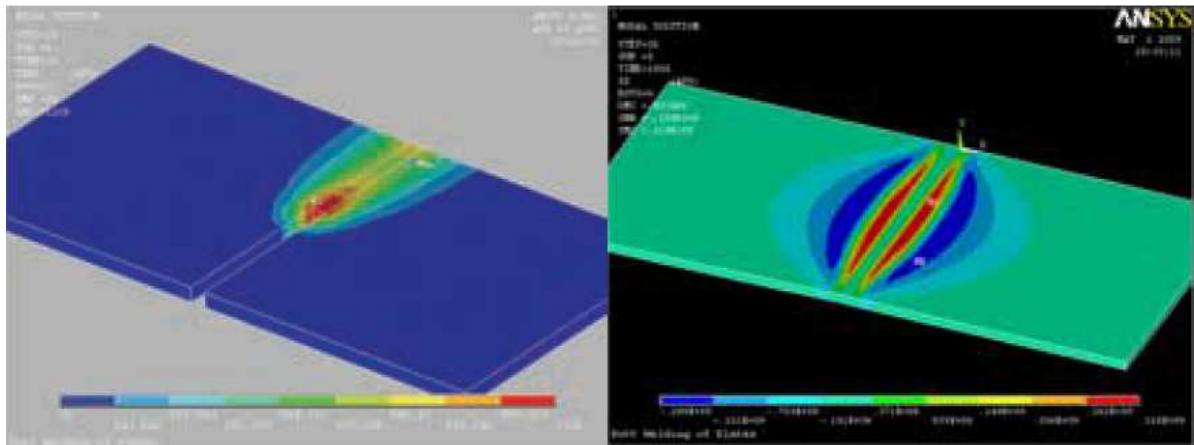
A hegesztési feszültségek csökkentésével szemben *hőkezeléssel* védekezhethetünk. Ide tartozik a megeresztés – amely magas hőmérsékletre (500-750 °C) történő hevítést jelent rövid idejű hőntartással – valamint a lágyítás és a normalizálás is. [6]

3 Eddigi felhasználási területek

A hegesztés modellezése még napjainkban is gyerekcipőben jár. Elsősorban gépészmérnöki területen találhatunk rá alkalmazási példákat, építőmérnöki gyakorlatban néhány példától eltekintve nem foglalkoztak a jelenség vizsgálatával. [1]

3.1 Tompavarratos kapcsolat

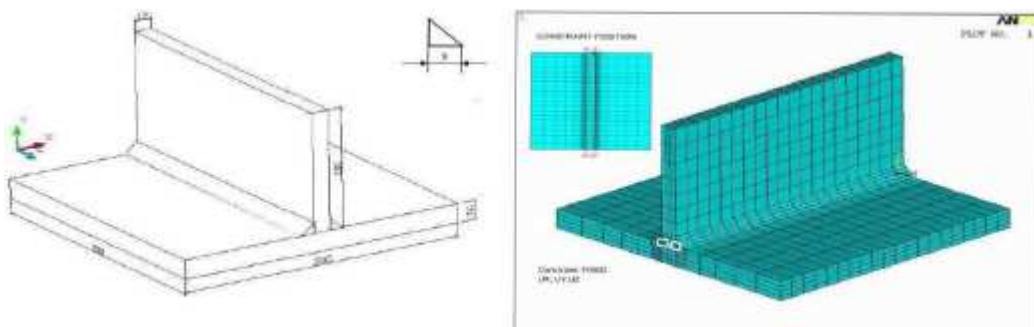
A legegyszerűbbnek mutató feladat lehet két lemez tompavarratos kialakításának hegesztésszimulációja. A nemzetközi szakirodalomban több példát is találunk ilyesfajta szerkezetek numerikus modellezésére. Erre jó példa lehet [1], [7] vagy [8] is.



7. ábra: Tompavarrattal kialakított hegesztett kapcsolat hőmérsékleti mezője (bal oldali kép) egy köztes időpillanatban és a sajátfeszültségek ábrája (jobb oldali kép) tengelyirányban [7]

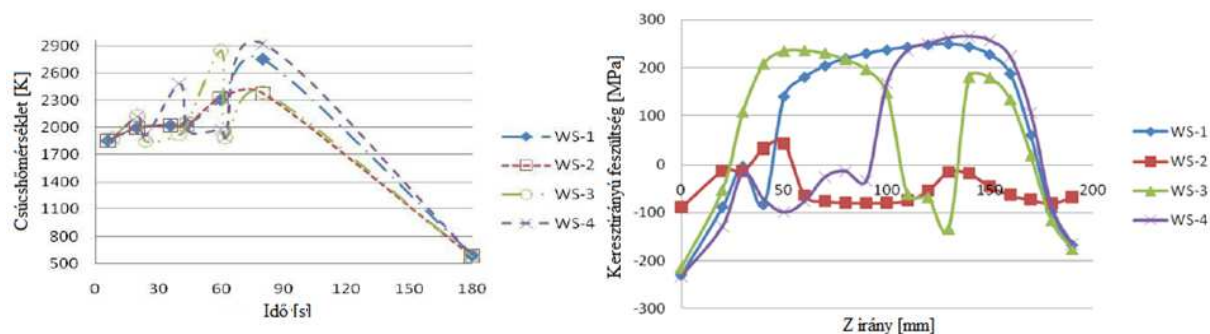
3.2 Hegesztett T-kapcsolat

Ennél magasabb szintű, komolyabb szerkezeti részlet lehet egy T-kapcsolat modellezése (8. ábra). [9] a hegesztési sorrend hőmérséklet-eloszlásra, sajátfeszültségekre és a T-kapcsolat sarokvarratainak eltorzulására tett hatását vizsgálja.



8. ábra: A modellezett T-kapcsolat geometriája és végelemez hálój [9]

Négy hegesztési sorrendet modelleztek háromdimenziós végeselemes modelleken. Ezek a következők: egy irányból történő hegesztés (WS-1); ellentétes irányú hegesztés (WS-2); középről indított egyoldali sarokvarrat (WS-3); illetve középről indított kétoldali sarokvarrat (WS-4). [9]



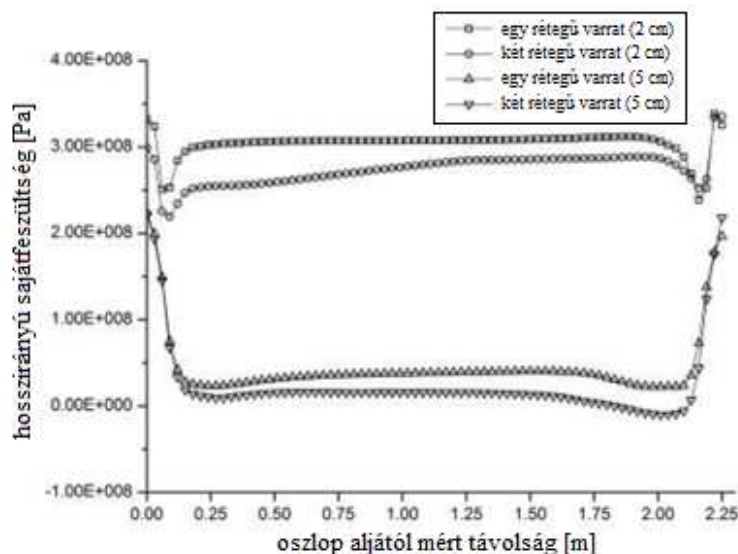
9. ábra: A hőmérsékletek-idő és a maradó keresztirányú feszültségek diagramjai az egyes hegesztési sorrendek esetén [9]

A legalacsonyabb sajátfeszültség és csúcshőmérséklet a WS-2 hegesztési sorrendhez tartozott. A deformációk összehasonlítása alapján viszont a WS-4 a leghatékonyabb, míg WS-2 a legkevésbé alkalmas hegesztési sorrend. WS-4-et minimális aszimmetria és kis függőleges elmozdulások jellemzik. WS-1 és WS-3 kizárhatóak voltak a lehetséges optimális hegesztési sorrendek közül, hiszen mind a sajátfeszültségek, mind a deformációk terén relatíve rosszul teljesítettek. Fontos megemlíteni, hogy szimultán varratkialakítással, valamint hosszirányú és keresztirányú zsugorodással nem foglalkoztak a cikk szerzői, ezeket mindössze további kutatási lehetőségként említették. [9]

3.3 Hegesztett szelvényű oszlop

Az [10] cikkben 200 mm x 200 mm külső keresztmetszeti méretekkel megadott hegesztett zártszelvényű oszlopok összeállítását szimulálták 14 mm-es lemezekből. A hegesztési folyamat során kialakuló sajátfeszültségeket három különböző nézőpont szerint értékelték: az oszlop magassága és a hegesztési sorrend mellett a töltőrétegek számát vizsgálták. Nyomott szerkezeti elemeknél kiemelt fontosságú a kezdeti geometriai imperfekciók és a sajátfeszültségek ismerete, mivel hatásuk a teherbírásra igen jelentős lehet. A hegesztési varratok rétegeinek számát úgy vették figyelembe, hogy az eredetileg egyetlen rétegből álló varratot két részre osztották szét. Az egyes rétegek vastagsága 7 mm. Amikor a töltőréteg hőmérséklete 100 °C alá süllyedt, akkor kezdték meg a takarósor felvitelét. Ezen vizsgálat kiemelendő a másik kettő mellett. Az oszlop magassága ebben az esetben 2.25 m volt. Az öv

peremétől 2 cm és 5 cm távolságra is ábrázolták a hosszirányú sajátfeszültség-eloszlást (10. ábra). [10]



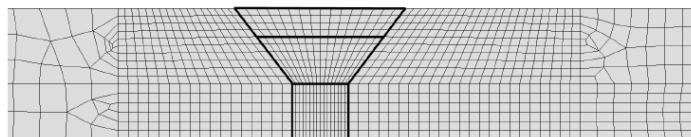
10. ábra: Hosszirányú sajátfeszültségek egy- és kétrétegű hegesztési varrat modelleknél [10]

3.4 Karimás csőkapcsolat

A kőolaj- és földgázipar fontos szerepet játszik napjaink gazdaságában. Egy igen összetett iparágról van szó, melynek háttérében jelentős pénzüsszegek állnak. Emiatt az alkalmazott termékek anyagaival, illetve a nyújtott szolgáltatásokkal szemben komoly elvárásokat támasztanak. A kapcsolatok kialakítása miatt a hegesztési folyamat kiemelten fontos ebben az iparágban. [11]

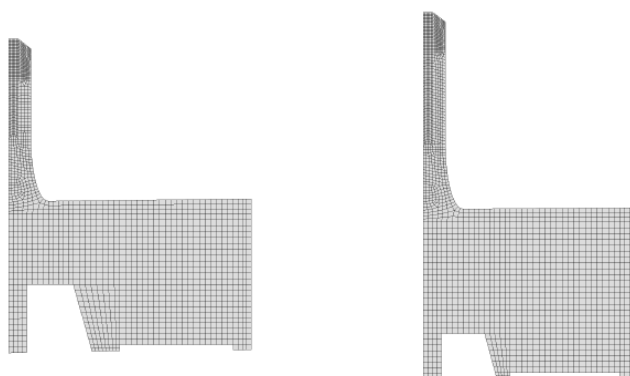
A karimás kapcsolatokat nemcsak a csövek egymáshoz, de más berendezésekhez való illesztéséhez is felhasználják. A csövekkel szemben magas elvárásokat fogalmaznak meg, mivel különböző anyagok nagy sebességű és nyomású szállítását végzik a csövekben. Ez szűk tűréshatárok betartását eredményezi. Amikor a karimákat felhegesztik a csövekre, a karimák deformálódhatnak és a velük szemben támasztott követelményeket már nem tudják kielégíteni. Emiatt gyakran meg kell ismételni a folyamatot, hogy a kapcsolat minőségét biztosítani tudják. Egy új csővezeték kiépítésénél ez mind további időbe, mind további költségekbe kerül. Két különböző geometriájú csőkarimát vizsgáltak meg a hegesztési folyamat során kialakuló sajátdeformációk miatt. [11]

Mivel egy tengelyszimmetrikus alkatrészről van szó, így csak a keresztmetszet felét modellezték. Nem készült három dimenziós modell, de a forrásként megadott [11] diplomamunka szerzője csak a geometriák és megtámasztási viszonyok hatását szeretne volna összehasonlítani az egyszerűsített modellekkel. Az analízis során alkalmazott modell egy részletét a 11. ábra mutatja a három részre osztott varrattal. [11]



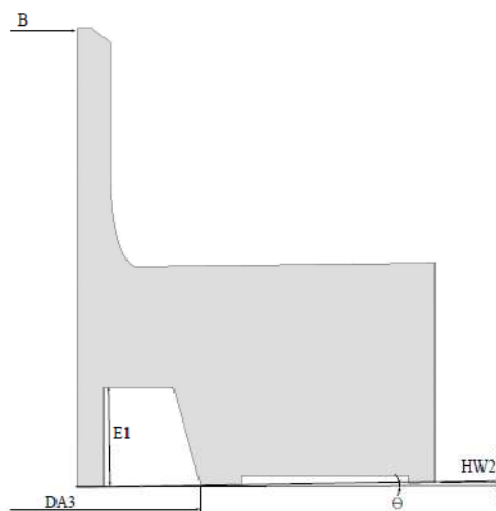
11. ábra: Hegesztéshez közeli tartomány hálófelosztása [11]

A VECTOR cég által gyártott CL150 és CRYO CL150 acélkarimát vizsgálták. A két modell között kicsiny az eltérés: a CRYO CL150 kicsit magasabb, valamint a tömítésnek kisebb hornyot alakítottak ki. Ezek a különbségek eltérő torzulásokat idéznek elő a hegesztés után. A hegesztett kapcsolatot TIG technológiával alakították ki. [11]



50. ábra: CL150 (bal oldali kép) és CRYO CL150 (jobb oldali kép) tengelyszimmetrikus geometriája és hálófelosztása [11]

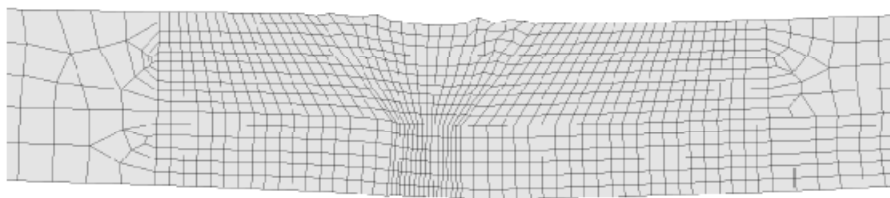
Kétféle megtámasztási viszonyt vizsgáltak mindegyik geometria esetében. Ezek hatását szeretnék volna összehasonlítani a deformációk tekintetében. Minimális számú megtámasztásra szükség van az elemek helyben tartásához, ezért első esetben az elemeket ponthegeztéssel rögzítették egymáshoz. A második esetben a karimát a kerülete mentén lévő furatokon átmenő csapokkal rögzítették egy állítható munkapadhoz, ezzel a cső kialakításának megfelelő magasságban tudták tartani. [11]



12. ábra: Lemérendő méretek [11]

A hegesztés előtt és után a következő méreteket jegyezték fel az 12. ábra szerint: B és $DA3$ átmérőket, $E1$ és $HW2$ távolságokat, valamint θ bezárt szöget. [11]

A pontos eredményeket és az elfordulásra vonatkozó analitikus levezetést [11] tartalmazza. A $\theta_{CL150}/\theta_{CRYO}$ elfordulásarányra a levezetés szerinti értékhez közeli eredményeket kaptak a végeleemes számítások során. Ez az érték 1.618-ra adódott az analitikus megoldást figyelembe véve, ez azonban feltételezi a teljes keresztmetszet merevségét. Ez nyilvánvalóan nem igaz a vékony nyaki rész környezetében, ebből adódtak kisebb eltérések. Az azonban egyértelmű, hogy a CRYO CL150 típusú karimás kapcsolat sokkal merevebben viselkedik, mint a CL150 jelzésű (13. ábra). Továbbá mindkét megtámasztási variáció esetén jobban teljesített a CRYO CL150 az átmérők és távolságok megváltozásának szempontjából is. [11]

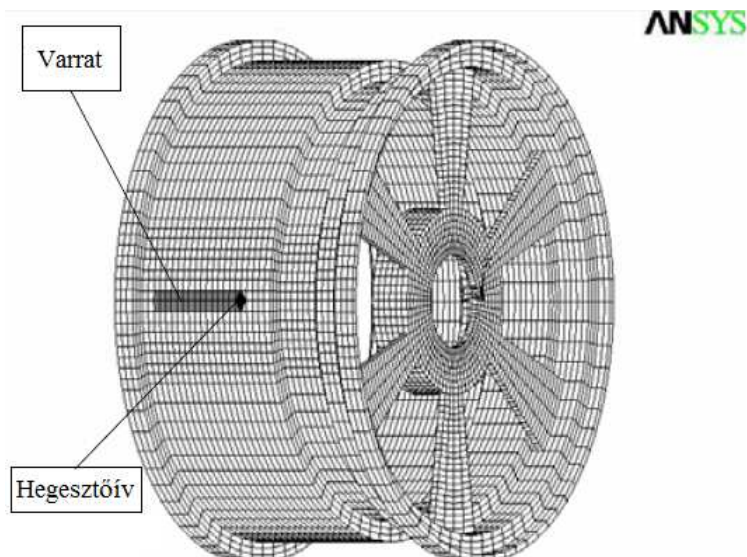


13. ábra: CL150 deformált hálóját a hegesztés környezetében a takarósor kialakítása után [11]

3.5 Kerékabroncs

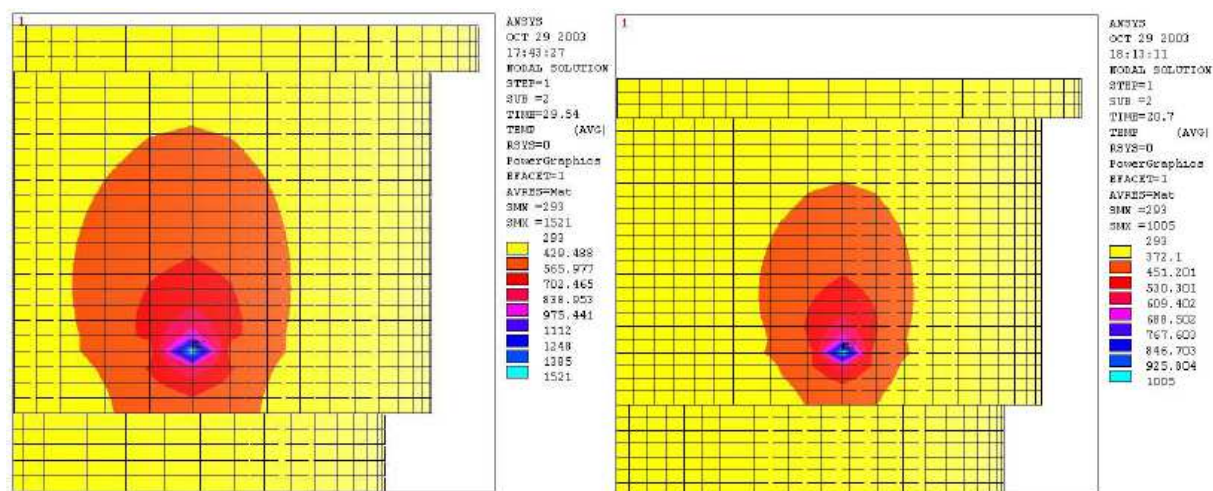
Az alumínium ötvözetek alkalmazása egyre szélesebb körben elterjedt, ezért a hegesztésükkel kapcsolatos problémák vizsgálata igencsak aktuálissá vált. A hegesztés során magas sajátfeszültségek jellemzik ezeket a szerkezeteket, a hegesztett kapcsolatok mechanikai tulajdonságai pedig jelentősen leromlanak. Ez elsősorban a bonyolult szerkezetek esetén jelent problémát, hiszen ezekben az esetekben gyakorlatilag lehetetlen végeleemes program alkalmazása nélkül meghatározni az optimális hőbevitelt, áramerősséget és hegesztési sebességet. [12]

Alumínium ötvözetből készült kerékabroncs hegesztésével foglalkozott [12]. A kerékabroncs végeleemes modelljét mutatja a 14. ábra. A számított eredményeket mérésekkel hasonlították össze. A mintadaraboknál TIG ívhegesztést alkalmaztak. 160 A és 230 A áramerősséget, valamint 8.5 m/h és 13 m/h hegesztési sebességet használtak. A hőmérsékletet három pontban mérték meg hőelemekkel a peremek közelében, ezt hasonlították össze a megfelelő csomópontok számított hőmérséklet-értékeivel. [12]



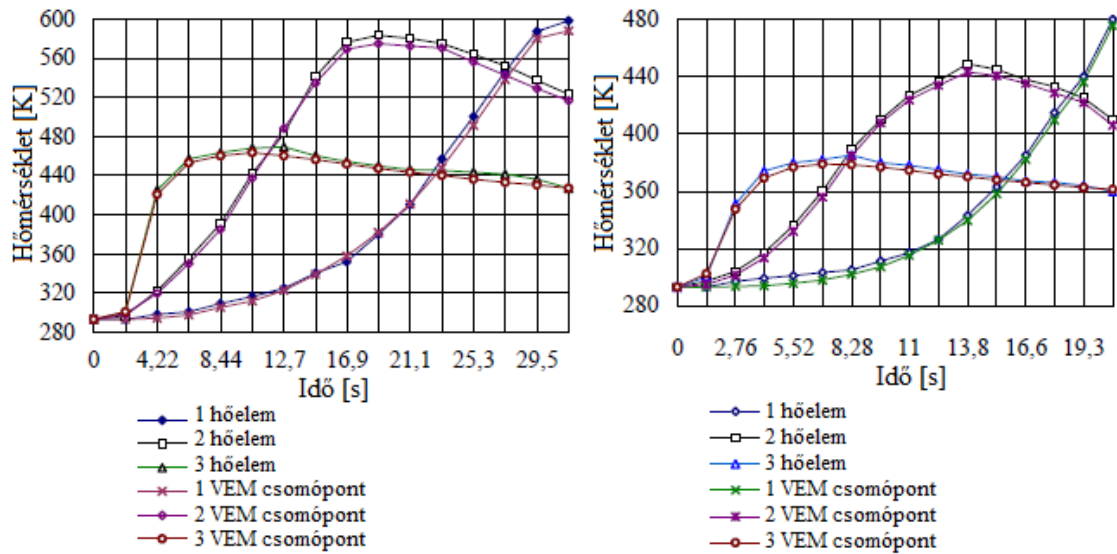
14. ábra: Kerékabroncs végelelemes modellje [12]

Nagy méretű hőbefolyásolt zóna jellemezte azt az esetet, amikor a javasolt hegesztési paramétereket ($I=230\text{ A}$ és $v=8.5\text{ m/s}$) alkalmazták (15. ábra). Hőbefolyásolt zónáról ott beszélhetünk ebben az esetben, ahol a hőmérséklet 573 K felett volt (összehasonlításként 863 K olvadási hőmérséklet tartozik a vizsgált ötvözethez). A paraméterek változtatásával jelentős csökkenést értek el a hőbefolyásolt zóna méretét tekintve, hiszen nagyjából kétharmadára tudták lecsökkenteni a paraméterek helyes megválasztásával (15. ábra). [12]



15. ábra: Hőmérséklet-eloszlás hegesztés közben: $I=230\text{ A}$ és $v=8.5\text{ m/s}$ (bal oldali kép) és $I=160\text{ A}$ és $v=13\text{ m/s}$ (jobb oldali kép) esetén [12]

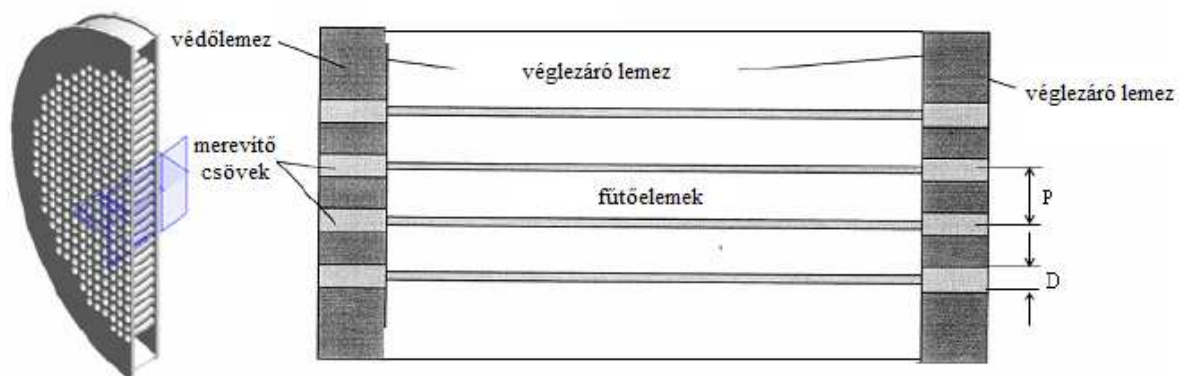
A mért és számított hőmérséklet értékek jó egyezőséget mutattak a hegesztési folyamatot leíró hőmérséklet-idő diagram alapján. Az eltérések nem haladták meg az 5%-ot (16. ábra). [12]



16. ábra: Hőmérséklet-idő diagram hegesztés közben: $I=230\text{ A}$ és $v=8.5\text{ m/s}$ (bal oldali kép) és $I=160\text{ A}$ és $v=13\text{ m/s}$ (jobb oldali kép) esetén [12]

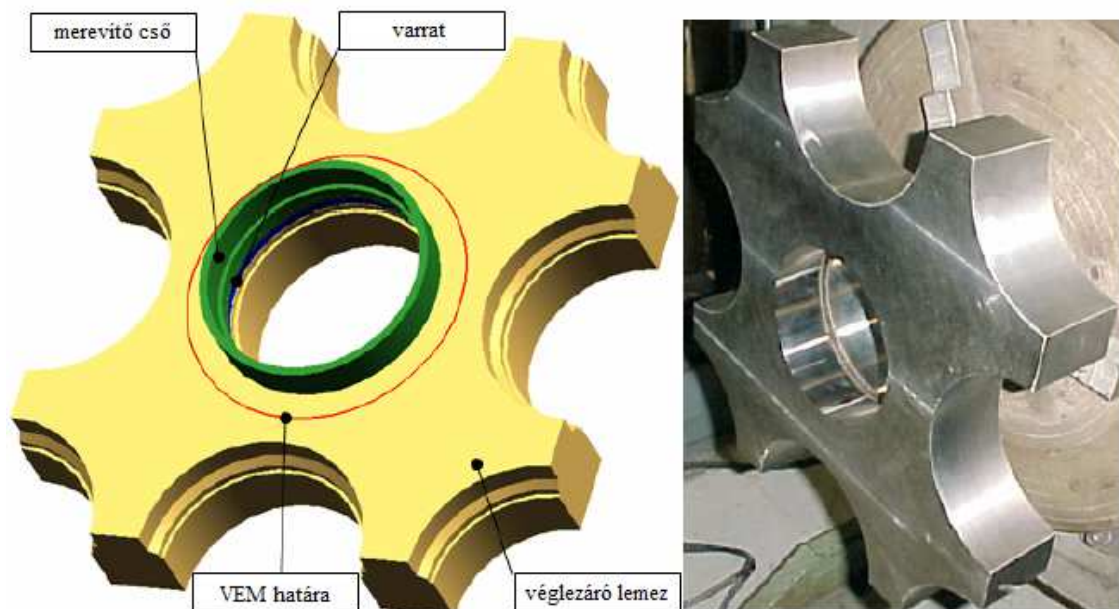
3.6 CANDU®-típusú reaktortartály

A CANDU®-típusú reaktorokat nyomott nehézvíz hűtessel építik, emellett nehézvíz moderátort alkalmaznak. A vízszintesen elhelyezkedő fűtőelemeket a reaktortartály tartalmazza. Két végét egy-egy védőlemez alkotja, amely két véglezáró lemezből áll. A két véglezáró lemezt egy négyzetrács rácspontjaiban ülő csövek kapcsolják össze, ezzel a védőlemeznek merevséget, a fűtőelemeknek megtámasztást biztosítva (17. ábra). Az alábbi ábrán feltüntetett P (csövek távolsága) és D (cső átmérője) méretek aránya fontos jellemzője a védőlemez geometriájának. Minél nagyobb a P/D arány, annál kisebbek a hegesztés során kialakuló deformációk. [13, 14]



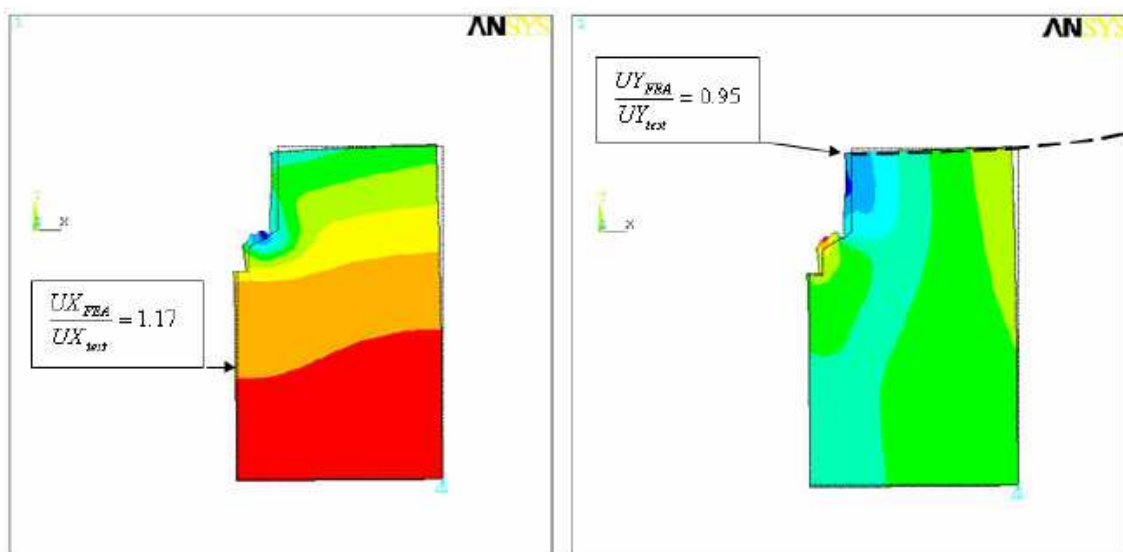
17. ábra: A védőlemez perspektivikus ábrája, valamint a tartály hosszmetsete [13]

A védőlemezről egy kis léptékű részmodellt készítettek (18. ábra). A teljes védőlemezre nem igaz, hogy tengelyszimmetrikus, viszont egyetlen merevítő cső véges környezetéről ez elmondható (a csöveket összekötő lemezdarab feléig). Egy ilyen részegységet vettek figyelembe a szimuláció során. A számításait egy ennek megfelelő mintadarabon kísérlettel validálták. [13]



18. ábra: A vizsgált tartomány és a kísérleti mintadarab [13]

A számított hőmérséklet és feszültségi értékeket [13] tartalmazza, így csak a gyártás szempontjából legfontosabb elmozdulásokat említem meg. Mind a sugárirányú, mind a tengelyirányú számított elmozdulások erős korrelációt mutattak a mért értékekkel (19. ábra). Tervezési követelmények szempontjából a tengelyirányú elmozdulások fontosabbak: egy nagyságrenddel nagyobbak, mint a sugárirányúak. [13]



19. ábra: Sugárirányú (bal oldali kép) és tengelyirányú (jobb oldali kép) elmozdulások [13]

4 Modellezési kérdések

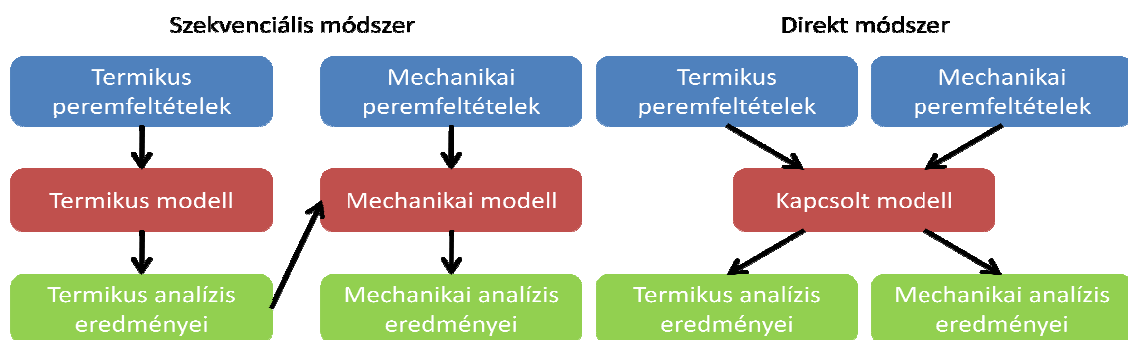
Egy hegesztés-technológia témájú szimuláció rengeteg kérdést felvet. El kell döntenünk, milyen mélységű és pontosságú számítást szeretnénk végrehajtani, emellett még rengeteg paraméter megválasztása várat magára: a hőforrás pontos felvételétől kezdve, az anyagtulajdonságokon át egészen a megfogási, megtámasztási viszonyokig. Igen körültekintően kell eljárni mindegyik esetben, hiszen alapvetően befolyásolják a viselkedést.

4.1 Hegesztésszimuláció szintjei

A kutatók az elmúlt évtizedekben a hegesztés során kialakuló deformációk becslésén és ellenőrzésén fáradoztak. Alapvetően négyféle módon történhet a deformációk meghatározása:

- Kísérlet alapú képletekkel
- Kapcsolt termikus és mechanikai analízissel (VEM)
- Különválasztott termikus és mechanikai analízissel (VEM)
- ISM módszerrel (VEM alapú)
-

A kísérlet alapú képletek csak egyszerű szerkezetek esetén alkalmazhatók. A termikus és mechanikai analízist alapvetően kis vagy egyszerű szerkezeteknél alkalmazzák. Itt megkülönböztethetünk különválasztott és kapcsolt analízist is. A kapcsolt analízisnek további két alváltozata van, melyek megoldási stratégiáját mutatja be a 20. ábra. A kapcsolt analízis előnye abban rejlik, hogy a képlékeny alakváltozások vagy a súrlódás (például dörzshegesztés esetén) során fejlődő hő figyelembe lehet venni. A szekvenciális módszer (egyirányú kapcsolás) esetében nehézséget okoz a deformált háló folyamatos felülírása és a terhek beolvasása a szerkezeti analízisből a termikus analízisbe. Emiatt amennyiben a kapcsolt analízis mellett döntenénk, szerencsésebb a direkt módszer (kétirányú kapcsolás) alkalmazása. Ebben az esetben viszont mindenképpen a 4.3.3 pontban bemutatott kapcsolt analízisre alkalmas végelemek közül kell választanunk.



20. ábra: Kapcsolt analízis típusai és a megoldás menete [29]

A *termikus és mechanikai analízisre* jó példa lehet egy tompavarrattal kialakított kapcsolat vagy egy nagy volumenű szerkezet varratközeli zónája, melynél a vizsgálatot csak az aktuális részleten végzik el egy háromdimenziós testmodellen. Nagyméretű szerkezetek esetén a hegesztés hatásait vizsgálni ezzel a módszerrel gyakorlatilag lehetetlen feladatnak tűnik a mai számítógépes háttérrel a számítási időigény és a memóriaigény miatt. Erre nyújt egy gazdaságos megoldást az *ISM módszer* (Inherent Strain Method – maradó alakváltozás módszere), mely az előzőekkel ellentétben nem tartalmaz termikus analízist, valamint a rugalmas-képlékeny számítás helyett csak rugalmas számítást igényel. A teljes szerkezetet részegységekre bontják – például tompavarrattal kialakított kapcsolat vagy T-kapcsolat – melyekre kidolgozott görbék és formulák alapján teherként kerülnek kezdeti alakváltozások. Ezt követi a rugalmas analízis héjelemekkel kialakított modellen. [19]

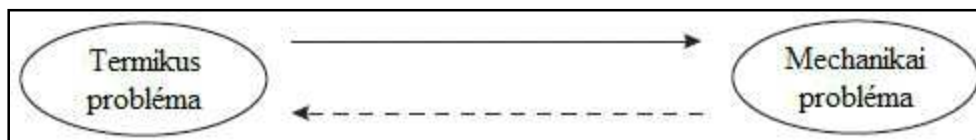
4.2 Termikus és mechanikai analízis

A termikus és mechanikus hatások összegzéséhez a következő kapcsolatokat kell megfontolni:

- Anyagtulajdonságok a hőmérsékleti mező függvényében
- Hőtágulás és hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságok [1]

A képlékeny deformációk során keletkező hőmennyiség elhanyagolható mértékű a hegesztő ív által keltett hőmennyiséghez képest. Emiatt a termikus analízist a mechanikai analízistől függetlenül lehet végrehajtani. [1]

Ez a megközelítés a folyadék/szilárd fázisátmenetet jellemző látens hőmennyiséget, valamint a hőkapacitás és hővezetés hőmérsékletfüggéseit is magában foglalja, de a szilárd állapotban létrejövő változásokat nem tartalmazza. Az alkalmazott összekapcsolási vázlatot a 21. ábra foglalja össze. [1]



21. ábra: Thermo-mechanikai kapcsolat [1]

Az 4.1 pontban említettek alapján lehetőség van a termikus és a mechanikai analízist egymástól teljes mértékben függetlenül vagy akár (időlépcsőnként szekvenciálisan/teljes egészében direkt módon) kapcsolatosan lefuttatni.

Az első esetben a tranziens termikus analízis eredményeit használjuk fel. Ekkor a szerkezet teljes hőmérsékleti mező 'történetét' megismerjük, majd az egyes időpillanatokhoz tartozó mezők mint hőmérsékleti terhek kerülnek a szerkezetre a mechanikai analízis során. Ezzel szemben a kapcsolt analízis esetén egy időlépésben a termikus analízist mechanikai analízis követi. A nemzetközi szakirodalomban olvasható példáknál legtöbbször az első verziót alkalmazzák.

4.3 Termikus analízis

4.3.1 Hőforrások felvétele

A hegesztési folyamat modellezése során egy komplex termo-mechanikus problémával szembesülünk. A termikus analízis legfontosabb peremfeltétele a hőforrás modell helyes felvétele. Többféle hőforrás modellt vizsgáltak ez idáig, de az egyes modellek korlátairól meglehetősen keveset tudunk. [15]

A mozgó hőforrás egy tipikus időben változó megjelenési forma, ahol a hőforrás végigmegy a vizsgált darabon adott idő alatt. Kényelmes bevezetni a ξ koordinátát, amelyet a hőforráshoz rögzítünk vagyis annak mozgását írja le. A hőforrás mozgó koordinátarendszere kapcsolatban van a z koordinátával, ami a munkadarabon fixen megjelenik:

$$\xi = z - v(t - \tau) \quad (1)$$

ahol v a hegesztési sebesség és τ a hátramaradó idő, ami ahhoz szükséges, hogy a hőforrás helyét definiáljuk $t = 0$ -hoz képest. [1]

A hőforrásnál lévő hőmennyiség a következőképpen definiálható:

$$Q = \eta UI \quad (2)$$

ahol η a hőforrás hatásfoka, U a feszültség, I pedig az áramerősség. A hatásfokra vonatkozó értékek technológiai, geometriai, pozíciófüggőség stb. miatt nagy szórással rendelkeznek. Több kutató kísérleteiből [16] által összegyűjtve, lágyacélok esetén:

- Fedett ívű hegesztés: 90-99%
- Bevont elektródás ívhegesztés: 75-85%
- Védőgázos ívhegesztés: 66-70%
- Wolfram elektródás ívhegesztés: 22-48%

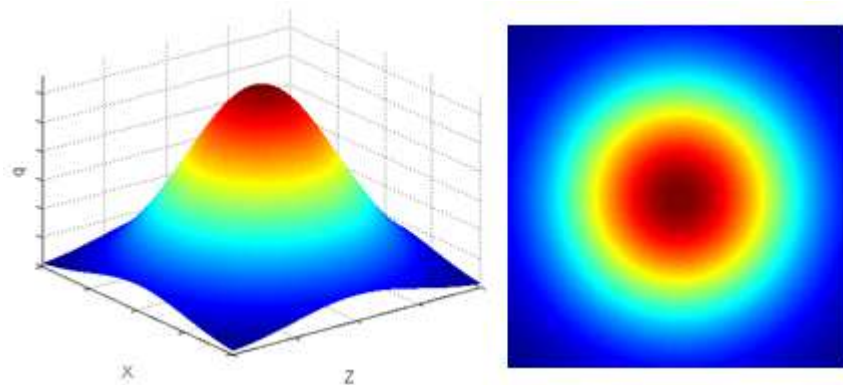
2D Gauss-eloszlású hőforrás

[15] a hőforrást kétdimenziós Gauss-eloszlásúnak (22. ábra) feltételezte. Ennek jelentősége abban rejlik, hogy a hő felületen oszlik meg, emiatt vastag lemezek hegesztés-modellezésére alapvetően nem alkalmas. A felületi hőáram (3) szerint alakul az r sugárirányú koordináta függvényében:

$$q(r) = \frac{Q}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

ahol $q(r)$ a felületi hőáram r sugárirányú koordinátánál, Q a hőforrásnál lévő hőmennyiség és σ a hőforrás sugárirányú távolsága a középponttól mérve. [15]

Az r sugárirányú koordináta továbbá felírható az $r(\xi, x) = \sqrt{\xi^2 + x^2}$ alakban a mozgó koordinátarendszer Descartes-féle koordinátaival.



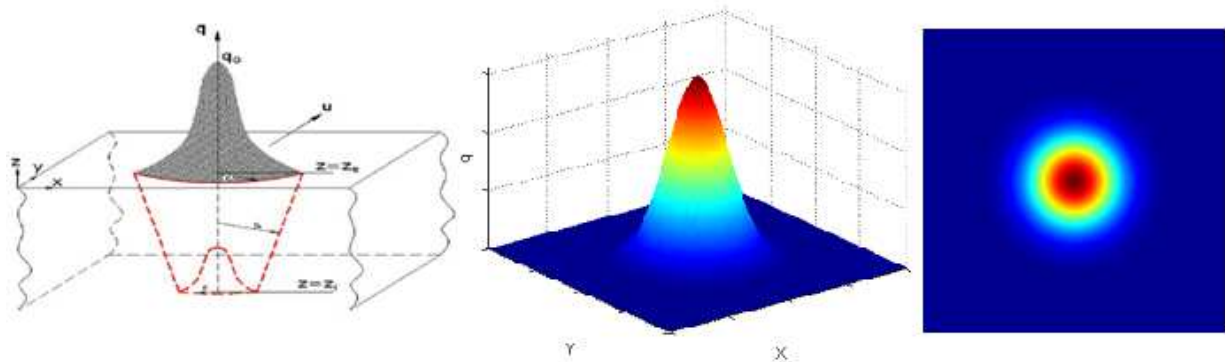
22. ábra: 2D Gauss-eloszlású hőforrás és felülnézete

3D Gauss-eloszlású kúp alakú hőforrás

Mély beolvadású varratok esetén, ahol a fúziós zóna alakja eltér az ellipszoidtól, a Goldak-féle modell helyett mást kell találni. Ez elsősorban elektronnyaláb jellegű hőforrásnál fordul elő, ekkor egy kúp alakú, háromdimenziós hőforrást célszerű alkalmazni. Sugárirányban Gauss-eloszlás, függőleges értelemben lineáris eloszlás jellemzi. A munkadarab felső síkján veszi fel a maximum értékét, a munkadarab alsó síkján a minimális értékét a függvény. A hőforrás tengelyében a térfogategységre eső hőmennyiség konstansnak veendő ezen modell alapján. A hőforrást az alábbi egyenlet írja le:

$$q(r, z) = q_0 e^{-3r^2/r_0(z)^2} \quad (4)$$

ahol q_0 az energiasűrűség maximális értékét, $r_0(z)$ a hőforrás z magassághoz tartozó átmérőjét, míg r a sugárirányú koordinátát jelöli. [18]



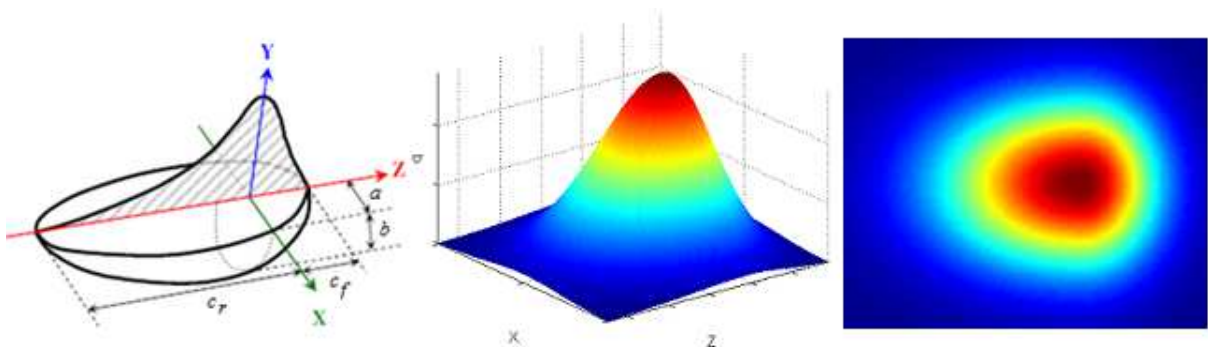
23. ábra: 3D Gauss-eloszlású kúp alakú hőforrás paraméterei [18]; az energiasűrűség eloszlása egy adott vízszintes metszetre nézve (Z fix koordináta) és a hőforrás felülnézete

A Gauss-féle kúp alakú hőforrás (23. ábra) magassága $H = z_e - z_i$, ahol z_e a felső, z_i az alsó sík z koordinátáját jelenti. Ehhez hasonló indexeléssel adhatjuk meg a hőforráshoz tartozó sugarakat a két síkban: jelölje r_e a felső, r_i az alsó síkhoz tartozó sugarat. Ezeket felhasználva, $r_0(z)$ felírható egyszerűbb formában:

$$r_0(z) = r_e - (r_e - r_i)(z_e - z)/H \quad (5)$$

Goldak-féle dupla ellipszoid hőforrás

A dupla-ellipszoid geometria egyik sajátossága, hogy könnyen megváltoztatható a kis behatolási mélységű ívhegesztés és a mélyebb behatolású lézersugaras hegesztési technológiákhoz is. A hőáram Gauss-eloszlású a hossz tengely mentén. A forrás első fele egy körnegyede egy ellipszoid forrásnak, míg a hátsó fele egy másik ellipszoid forrás körnegyede. Négy paraméter definiál egy ellipszoidot, melyek fizikailag a megolvadt zóna méreteit tükrözik. Az olvadt zóna keresztmetszetét kísérletekből megismerve, a hőforrás paraméterei meghatározhatók. Első közelítésként Goldak azt feltételezte, hogy ésszerű lenne felvenni a forrás előtti távolságot a hegesztési varrat méretének felére, míg a forrás mögötti távolságot a hegesztési varrat kétszeresére. [1]



24. ábra: Goldak-féle dupla ellipszoid hőforrás paraméterei [17]; az energiasűrűség eloszlása egy adott vízszintes metszetre nézve (Y fix koordináta) és a hőforrás felülnézete

Az ív hőhatásának szimulálására az egyenértékű hőbevitelt konstans térfogategységre jutó belső hőként feltételezi. Az elülső és hátulsó ellipszoid súlyozási hányadát f_f és f_r jelöli, amelyekre igaznak kell lennie az $f_r = \frac{2}{1+c_f/c_r}$ és az $f_f = \frac{2}{1+c_r/c_f}$ egyenleteknek. Az ellipszoidon belüli energiasűrűséget jelölje q W/m³-ben. Ezen kívül további paraméter a , b és c , amelyek az ellipszoid féltengelyeit jelölik az x , y , ξ tengellyel párhuzamosan (24. ábra).

Ezek alapján az energiasűrűség az elülső körnegyedben a következőképpen adható meg:

$$q(x, y, \xi) = \left(\frac{6\sqrt{3} f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \right) e^{\left(-3\frac{x^2}{a^2}\right)} e^{\left(-3\frac{y^2}{b^2}\right)} e^{\left(-3\frac{\xi^2}{c_f^2}\right)} \quad (6)$$

a hátulsó körnegyedben pedig:

$$q(x, y, \xi) = \left(\frac{6\sqrt{3} f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \right) e^{\left(-3\frac{x^2}{a^2}\right)} e^{\left(-3\frac{y^2}{b^2}\right)} e^{\left(-3\frac{\xi^2}{c_r^2}\right)} \quad (7)$$

A fenti egyenletekben Q a hőforrásnál lévő hőmennyiség. Az a , b , c_f és c_r paraméterek függetlenek és különböző értékeket vehetnek fel az elülső és a hátsó körnegyedek esetén, hogy az ívet pontosan lehessen modellezni. Egyik jelentős sajátossága ezeknek a modelleknek, hogy a hőforrás elindítását és megállítását is figyelembe lehet venni. A hő térbeli eloszlása a (6) és (7) jelű egyenletekből számítható a legutolsó hőforrás esetében.

4.3.2 Anyagjellemzők

A hőterjedési és a feszültség analízis részeiben különböző anyagjellemzők társulnak a modellhez. A jellemzők adatai az Eurocode 3 szabvány [20] (EC3) vonatkozó részeiben megtalálhatók. A termikus analízishez a következő anyagjellemzők definiálására van szükség:

- Hővezetés $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
- Sűrűség $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- Fajhő $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
- Entalpia $\left[\frac{J}{m^3}\right]$
- Konvekció $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

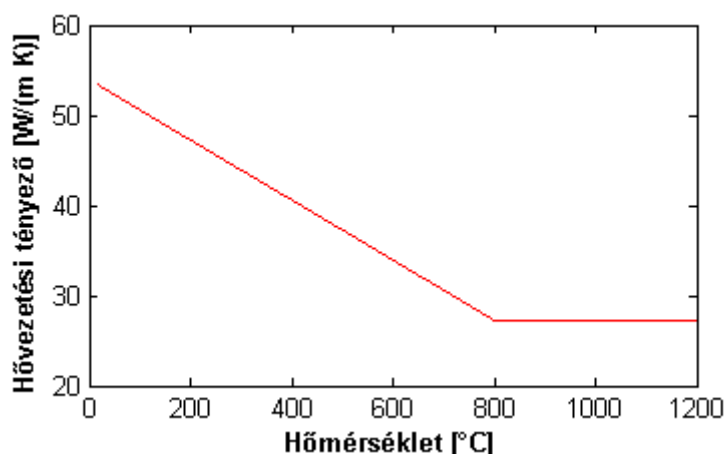
A hővezetés és a fajhő tulajdonságai a hőmérséklet függvényében kerülnek meghatározásra. Fontos, hogy jelenleg csak tűztervezésre vonatkozó ajánlás szerepel a

szabványban, ami 1200°C -ig terjed ki. A feladatban azonban magasabb hőmérséklet értékeken kell számítani az anyagtulajdonságokat. A hővezetés és a fajhő értékei a felső hőmérsékleti tartományban vízszintesek, így ezek egyszerűen kiterjeszthetők jelen feladatban. Jelenleg a szabvány nem tartalmaz a sűrűség hőmérséklet-függőségére ajánlást, így az konstans értékkel épül be a modellbe.

Hővezetés

A szerkezeti acél hővezetési tényezőjére az Eurocode megfelelő része [20] a következő ajánlást teszi:

$$\lambda_a(T) = \begin{cases} 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \cdot T \left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right], & 20^{\circ}\text{C} \leq T < 800^{\circ}\text{C} \\ 27,3 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right], & 800^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (8)$$



25. ábra: Hővezetés a hőmérséklet függvényében [20]

Sűrűség

A sűrűség az Eurocode megfelelő része [20] alapján hőmérséklettől függetlennek vehető, vagyis végig konstans értékkel szerepel a modellben.

$$\rho_a = 7850 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (9)$$

Az acél sűrűsége a hőmérséklet növekedésével folyamatosan csökken a növekvő térfogat tömegmegmaradásának köszönhetően. Egyes tanulmányok ezt a nem túl jelentős hatást is figyelembe veszik. [4]

Fajhő

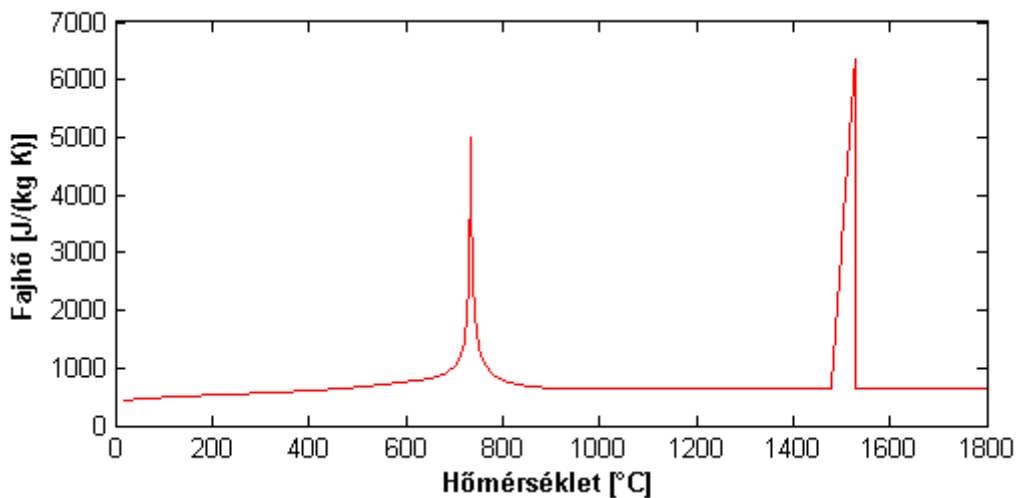
Az acél $c_a(T)$ fajhőjére a következő ajánlást adja az Eurocode megfelelő része [20]:

$$\begin{cases} 425 + 0,773 \cdot T - 0,00169 \cdot T^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right], & 20^\circ C \leq T < 600^\circ C \\ 666 + \frac{13002}{738-T} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right], & 600^\circ C \leq T < 735^\circ C \\ 545 + \frac{17820}{T-731} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right], & 735^\circ C \leq T < 900^\circ C \\ 650 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right], & 900^\circ C \leq T \leq 1200^\circ C \end{cases} \quad (10)$$

A fajhő definiálása egy magas csúcsot tartalmaz 735 °C-nál, ami az acél átalakulásának következménye α -vasból γ -vasba [4] és vissza. Ez azonban nem tartalmazza az olvadáshoz tartozó látens hő miatt kialakuló változásokat. Emiatt célszerű lehet bevezetni egy effektív fajhő értéket, amely a T_s és T_l hőmérsékletek között figyelembe veszi ezt a hatást (11).

$$c_{eff,a}(T) = \begin{cases} c_s, & T < T_s \\ c_s + \frac{L}{T_l - T_s} f_l, & T_s \leq T \leq T_l \\ c_l, & T > T_l \end{cases} \quad (11)$$

T_s a még szilárd halmazállapotú alapanyaghoz tartozó legmagasabb hőmérséklet, melynek értékét 1480 °C-ban állapítottam meg [11] alapján. T_l a már folyadék halmazállapothoz tartozó legalacsonyabb hőmérséklet, melyet 1520 °C-nak feltételeztem szintén [11] alapján. Az L látens hőt [1] alapján 291660 J/kg-ra vettem. (5/Eq11) esetén f_l a lokális folyadék frakciót jelöli, amely értéke 0 és 1 között változik, hiszen $f_l = \frac{T - T_s}{T_l - T_s}$. Az effektív fajhőt a 26. ábra mutatja.



26. ábra: Effektív fajhő a hőmérséklet függvényében [20] alapján

A 735 °C-hoz tartozó csúcs, illetve a T_s és T_l hőmérsékletek közötti szakaszon tapasztalható gyors effektív fajhő változás miatt a numerikus számítások során konvergencia-problémákba ütközhetünk. Emiatt egy kényelmes lépés lehet az entalpia alkalmazása.

Entalpia

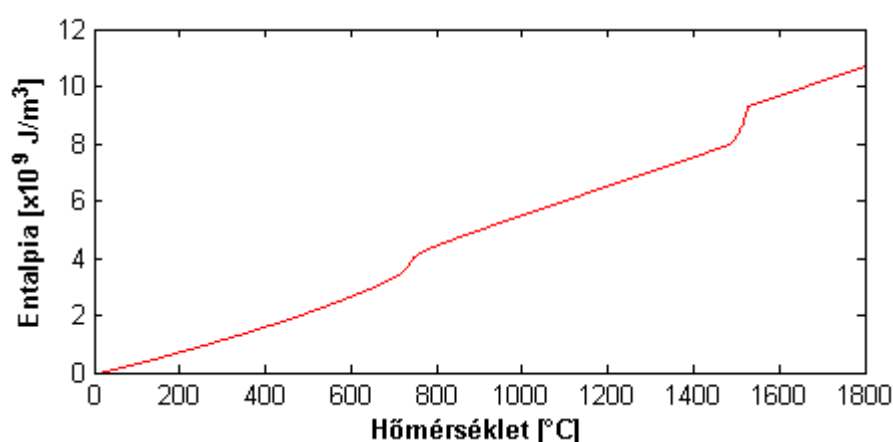
Az entalpiát általánosságban az (12) egyenlettel írhatjuk le. Ebben az esetben mind a sűrűség, mind a fajhő hőmérsékletfüggő természetét figyelembe tudjuk venni. A $\rho \cdot c$ érték a fajlagos hőkapacitásnak felel meg.

$$H(T) = \int_0^T \rho(T)c(T) dT \quad (12)$$

Mivel ebben a speciális helyzetben a sűrűséget konstans értéknek feltételezhetjük az eddig leírtak alapján, ezért az egyenlet a következő formát ölti az előzőekben ismertett jelölésrendszerrel:

$$H(T) = \rho_a \int_0^T c_{eff,a}(T) dT \quad (13)$$

Az entalpia-hőmérséklet görbét a 27. ábra ábrázolja.



27. ábra: Entalpia a hőmérséklet függvényében

Konvekció

Az elemekbe bevitt hőenergia a levegővel érintkező felületeken keresztül távozik. A konvekció kétféle képpen zajlik: hőátadással és sugárzással. Ehhez a konvekció definiálása többféleképpen lehetséges. Leggyakrabban ismertett összefüggés a konvekciós együtthatóra [21]:

$$h_c(T) = h + h_r(T) \quad (14)$$

ahol h = hőátadási konvekciós együttható

h_r = sugárzási konvekciós együttható

A hőátadási konvekciós együttható értékére több nagyon különböző ajánlást is találhatunk a szakirodalomban. $8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ és $45 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ között sokféle értéket olvashatunk. Ennek a tényezőnek a felvétele hatalmas befolyással van a mintadarab lehűlési sebességére. Feladatunknál $25 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ értéket vettünk fel. [1, 9, 21, 22]

A sugárzási együttható számítására leginkább a *Totten*-féle összefüggést [21] használják:

$$h_r(T) = \varepsilon \cdot F_{ij} \cdot \sigma \cdot (T + T_{amb}) \cdot (T^2 + T_{amb}^2) \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (15)$$

ahol ε : emissziós tényező, hengerelt acéloknál 0.51 [21], fekete testre 1

F_{ij} : besugárzási tényező (vagy térszögarány), általános esetben értéke 1

σ : Stefan-Boltzmann állandó, $5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

T_{amb} : környezet abszolút hőmérséklete [K]

T : munkadarab aktuális abszolút hőmérséklet [K]

A sugárzó képesség definiálása egyáltalán nem egyértelműsített feladat. Az EC3 vonatkozó részeiben hatás oldalon $\varepsilon_m = 0.8$ -et, ellenállás oldalon $\varepsilon_{res} = 0.64$ -ot ír elő.

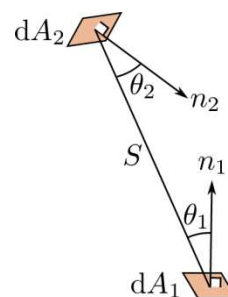
Az F_{ij} besugárzási tényező értéke felület és környezet közötti sugárzás (*nyílt rendszer*) esetén 1, felületek közötti sugárzás (*zárt rendszer*) esetén az i -edik felületet elhagyó és a j -edik felületre beérkező sugárzás aránya. Ebből adódik, hogy az i -edik felületre nézve $\sum_{j=1}^k F_{ij} = 1$, hiszen a teljes hőt elnyeli a zárt rendszerben lévő többi felület. F_{ij} kiszámítása a következő módon történik:

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi A_i} \iint \frac{\cos \varphi_i \cos \varphi_j}{S^2} dA_i dA_j \quad (16)$$

ahol: A_i, A_j : a két vizsgált felület

S : A_i és A_j közötti érintősugár

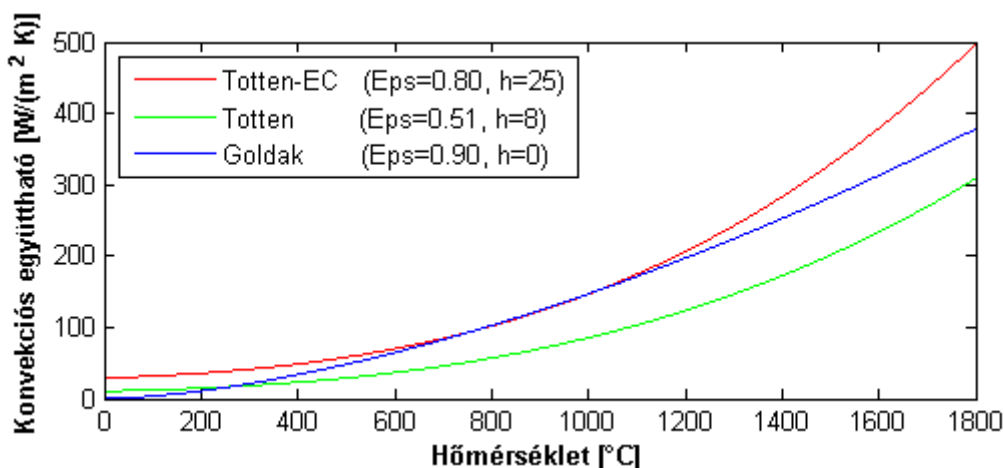
φ_i, φ_j : A_i és A_j felületek normálisa és a felületek közötti sugár által bezárt szög (28. ábra)



28. ábra: Két infinitezimálisan kicsiny felület egy önkényesen felvett konfiguráció esetén [28]

Goldak [26] a sugárzási és hőátadási együttható együttes értékére dolgozott ki egy hőmérsékletfüggő egyenletet (17), melyet egyszerűbb esetekben alkalmaznak elsősorban. Az emissziós tényező értékére $\varepsilon = 0.9$ -et ajánlott [26, 27] melegen hengerelt acélok esetén.

$$h_c(T) = 2.41 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon \cdot T^{1.61} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (17)$$



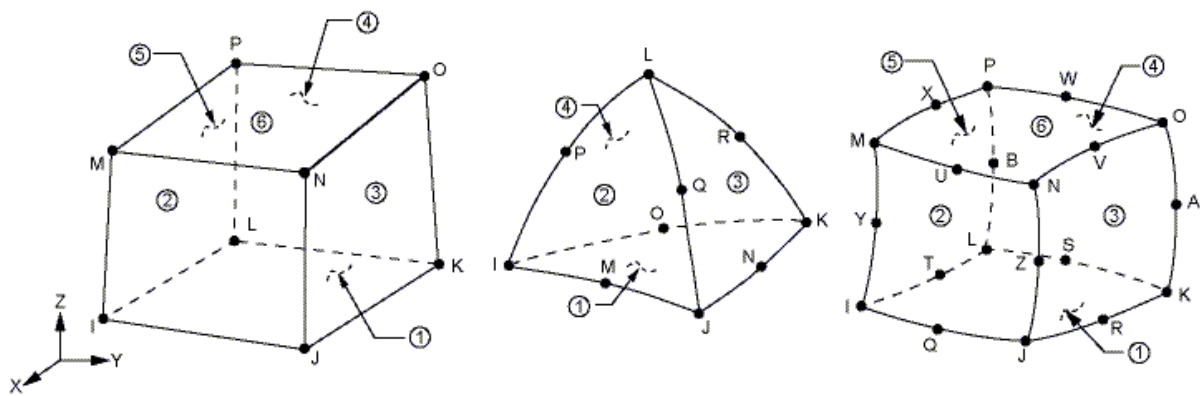
29. ábra: A konvekciós együttható alakulása három különböző esetben

A 29. ábra foglalja össze a fent említetteket. A Goldak-féle görbénél $\varepsilon = 0.90$, míg a másik két esetben 0.80 és 0.51 érték alkalmazandó. Utóbbi két esetben az ismertett Totten-féle sugárzási konvekciós együtthatóhoz $25 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ és $8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ értékű hőátadási konvekciós együtthatót társítottam.

A programban célszerű különböztetni a jelenséget hőátadásra és sugárzásra. A hőátadást csomóponti vagy felületi teherként viszonylag egyszerűen megadhatjuk. Ekkor a hőátadási konvekciós együttható mellett a felület hőmérsékletét kell megadni. Mivel a hőátadási együttható hőmérséklettől függetlennek vehető, így nem lényeges a felület hőmérséklete vagy éppenséggel a hőmérsékleti mező változása. A sugárzás figyelembevételére több lehetőséget is kínálnak. Egyik esetben a hőátadáshoz hasonlóan csomóponti vagy felületi teherként adjuk meg a sugárzást. Ehhez az ε emissziós tényező mellett a σ Stefan-Boltzmann állandó értékét kell megadnunk, valamint a környezet hőmérsékletét (vagy egy távoli csomópont hőmérsékletét). Ehhez hasonló analógiával rendelkezik a SURF152 jelű elem, melyről a következő pont ír részletesebben.

4.3.3 Lehetséges elemtípusok

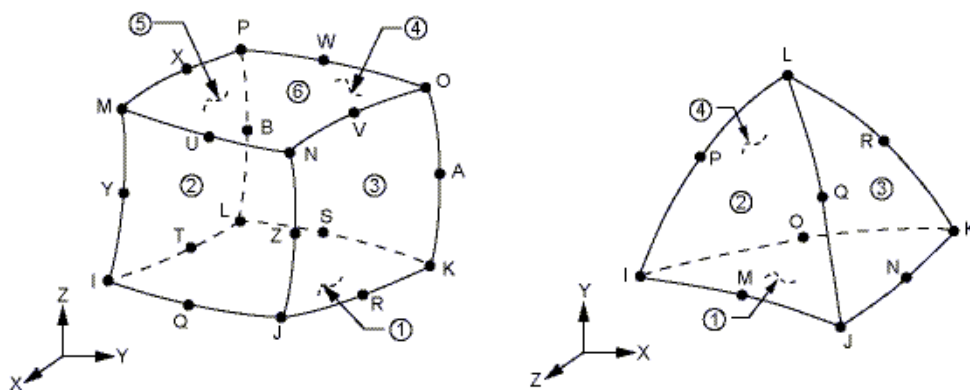
A termikus analízisre alkalmas elemek a SOLID70, SOLID278 (8 csomópontú téglalelemek), SOLID87 (10 csomópontú tetraéder elem), SOLID90 és SOLID279 (20 csomópontú téglalelemek). A SOLID278 és a SOLID279 nem került fel az ábrára (30. ábra), mivel alakjuk megegyezik a SOLID70-es és SOLID90-es elemekével. Beállításokat tekintve azonban az előző kettő továbbfejlesztéséről van szó.



30. ábra: Termikus analízisre alkalmas végelemek csomóponti elrendezései: SOLID70, SOLID87 és SOLID90 [23]

Csomópontok duplikálásával a legkülönbözőbb degenerált alakú elemek (tetraéder, piramis, háromszög alapú prizma) létrehozhatóak. Az elemek a folyamat során kialakuló hőmérsékleti mező alapján egy kiválasztott referenciaelemhez viszonyított eltéréseik alapján értékelhetők.

Itt említeném meg a 4.1 pontban taglalt kapcsolt analízisre alkalmas (*termikus és mechanikai analízis*) elemtípusokat a SOLID226 (20 csomópontú téglalap elem) és a SOLID227 (10 csomópontú tetraéder elem) elemeket. A csomóponti elrendezéseket a 31. ábra mutatja.

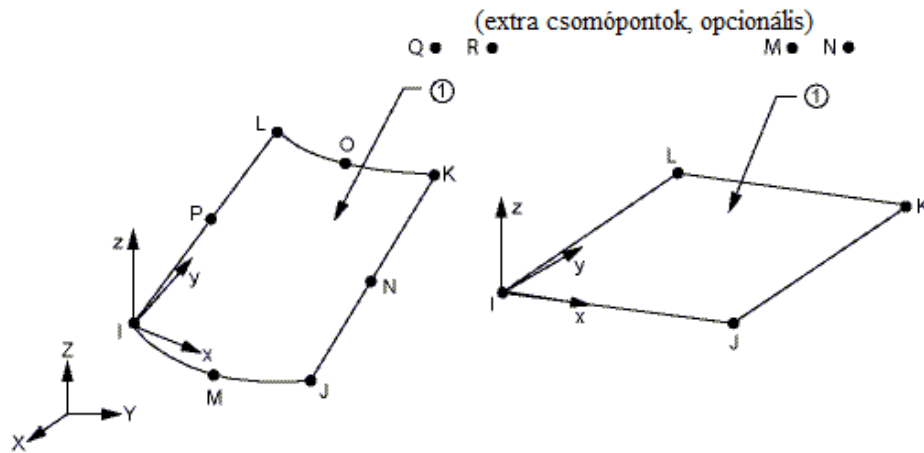


31. ábra: Kapcsolt analízisre alkalmas végelemek: SOLID226 és SOLID227 [23]

Az előző pontban megemlített SURF152 elemtípus háromdimenziós modellek esetén termikus hatások figyelembe vételére alkalmas. Bármilyen test szabad felületét be lehet borítani ilyen elemekkel, így definiálva például a sugárzó felületet. A geometriát, a csomópontok elrendezését és az elem lokális koordináta-rendszerét a 32. ábra mutatja be.

Ezen felül lehetőség van háromszög alakú elem definiálására is, ehhez az L és K csomópontok duplikálására van szükség. Hőáramot vagy konvekciót felületi teherként adhatunk meg. Mind a sugárzás, mind a hőátadás modellezhető ezzel az elemtípussal,

azonban ebben az esetben távoli extra csomópontok létrehozása szükséges: sugárzás esetén a környezet, hőátadás esetén pedig a felületi hőmérséklet definiálható velük. Sugárzás modellezésénél az ε emissziós tényező mellett a σ Stefan-Boltzmann állandót, az F_{ij} besugárzási tényezőt, valamint a környezet hőmérsékletét kell megadnunk (az extra csomópontokra definiálva).



32. ábra: SURF152 elem lehetséges csomóponti elrendezései [23]

4.4 Mechanikai analízis

4.4.1 Anyagjellemzők

A mechanikai analízis a következő anyagjellemzők definiálását teszi szükségessé:

- Termikus alakváltozás $[-]$
- Poisson-tényező $[-]$
- Rugalmassági modulus $[\frac{N}{mm^2}]$
- Feszültség és alakváltozás kapcsolata $[\frac{N}{mm^2}] - [-]$

Az EC3 csak 2 és 50 K/perc közötti hőmérsékletváltozás esetén ad ajánlást az acél mechanikai tulajdonságainak változására, amit a hegesztés meghalad, azonban számos kutatás során alkalmazták ezen értékeket kielégítő eredménnyel.

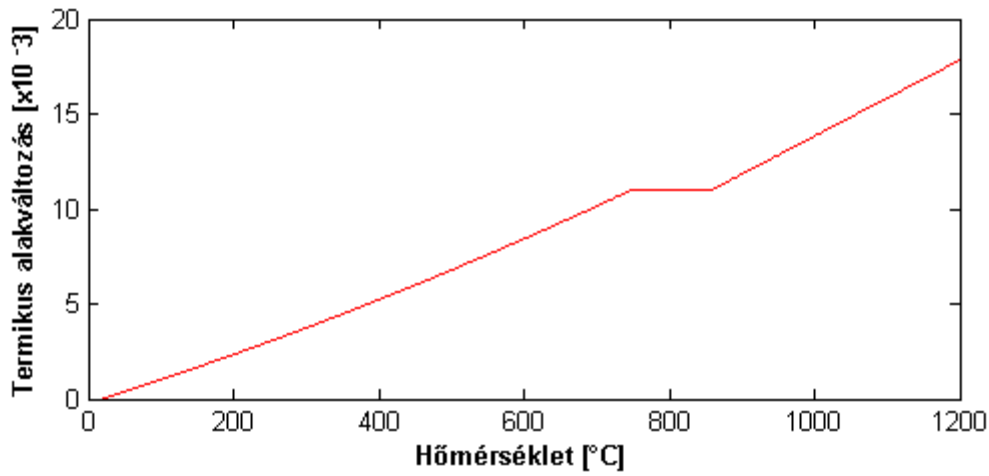
Termikus alakváltozás

A lineáris hőtágulási együttható helyett a termikus alakváltozást kell definiálnunk, mely az adott hőmérsékletre jellemző érték. A hőtágulási együttható is függ a hőmérséklettől, maga a termikus alakváltozás leírható az $\varepsilon_{ther}(T) = \frac{\Delta l}{l}(T) = \alpha(T) \cdot (T - T_{ref})$ egyenlettel, ahol α a

hőtágulási együtthatót, T_{ref} pedig az adott anyag referencia hőmérsékletét jelöli. A referencia hőmérséklet az a hőmérséklet, ahol az anyag éppen termikus alakváltozás-mentes.

Az Eurocode megfelelő része [20] alapján (18) írja le a jelenséget. Ebből is látszik, hogy szobahőmérsékletnek, azaz 20 °C -nak veendő általános esetben a referencia hőmérséklet, hiszen ebben az esetben a $\frac{\Delta l}{l}$ értéke zérust ad.

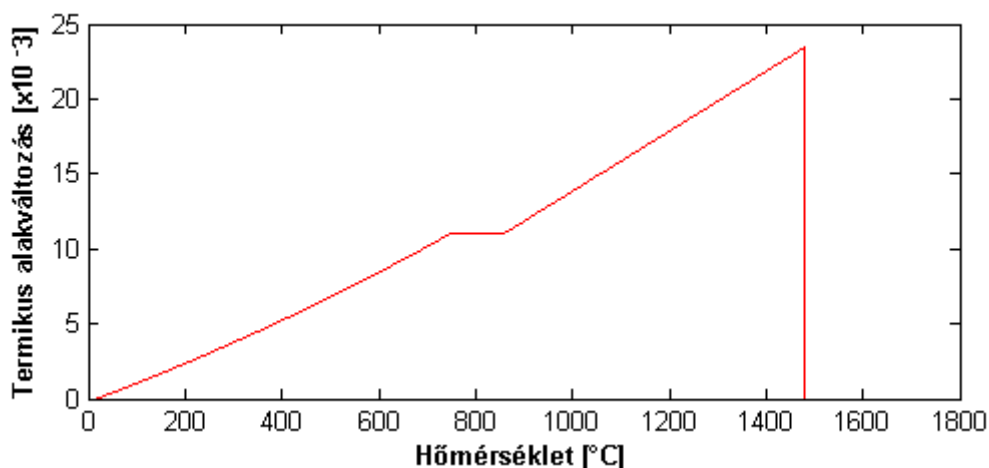
$$\frac{\Delta l}{l}(T) = \begin{cases} 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,4 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 2,416 \cdot 10^{-4}, & 20\text{ °C} \leq T \leq 750\text{ °C} \\ 1,1 \cdot 10^{-2}, & 750\text{ °C} < T \leq 860\text{ °C} \\ 2 \cdot 10^{-5} \cdot T - 6,2 \cdot 10^{-3}, & 860\text{ °C} < T \leq 1200\text{ °C} \end{cases} \quad (18)$$



33. ábra: Termikus alakváltozás a hőmérséklet függvényében [20]

A hegesztés numerikus szimulációja során azonban szembesülnünk kell azzal is, hogy a megolvadt anyagnak zérus a termikus alakváltozása. Emiatt az (18) egyenlet kiterjeszthető T_s -ig, majd T_l -ig egyenletesen lecsökken nullára az alakváltozás értéke (19) szerint. T_l felett az anyag teljes mértékben megolvadt, az anyag már nem teherbíró, emiatt ezt a hőmérsékletet az [1] szakirodalom ZST (zero strength temperature)-nek nevezi. Tehát folyadék halmazállapotban a termikus nyúlás zérus értéket kell, hogy felvegyen. Ezt a javított termikus alakváltozás-hőmérséklet görbét ábrázolja a 34. ábra.

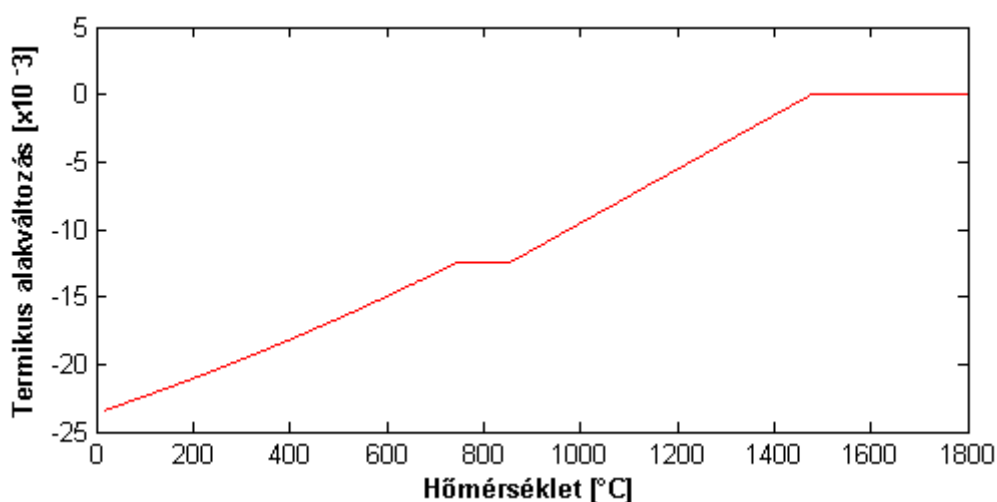
$$\frac{\Delta l}{l}(T) = \begin{cases} 2 \cdot 10^{-5} \cdot T - 6,2 \cdot 10^{-3}, & 860\text{ °C} < T \leq T_s \\ \frac{\Delta l}{l}(T_s) - \frac{\frac{\Delta l}{l}(T_s)}{T_l - T_s} \cdot T, & T_s \leq T \leq T_l \\ 0, & T_l \leq T \leq \infty \end{cases} \quad (19)$$



34. ábra: Termikus alakváltozás a hőmérséklet függvényében, figyelembe véve a ZST hőmérsékletet

Célszerű T_l -nek venni a hozanyag és a megolvadt anyag referencia hőmérsékletét. Ezekhez az esetekhez új termikus alakváltozás görbét (20) kell létrehozni, melynek a (19) egyenlet adja az alapját.

$$\frac{\Delta l}{l}(T) = \begin{cases} -(2 \cdot 10^{-5} \cdot T_s - 6,2 \cdot 10^{-3}), & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C} \\ \frac{\Delta l}{l}(0) + 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,4 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 2,416 \cdot 10^{-4}, & 20^\circ\text{C} < T \leq 750^\circ\text{C} \\ \frac{\Delta l}{l}(750^\circ\text{C}), & 750^\circ\text{C} < T \leq 860^\circ\text{C} \\ \frac{\Delta l}{l}(860^\circ\text{C}) + 2 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 860^\circ\text{C}) - 6,2 \cdot 10^{-3}, & 860^\circ\text{C} < T \leq T_s \\ 0, & T_s < T \end{cases} \quad (20)$$



35. ábra: Olvadt anyaghoz tartozó termikus alakváltozás görbe

Poisson-tényező

Az EC nem tartalmaz ajánlást e tényező hőmérséklettől való függésére, így a feladat során a szerkezeti acélra vonatkozó, általános esetben érvényes értéket vettük figyelembe.

$$\nu = 0,3 \quad (20)$$

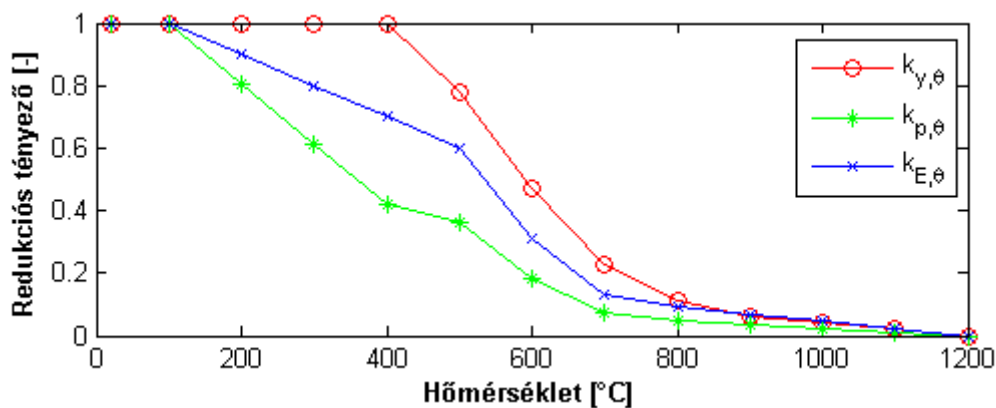
Rugalmassági modulus, feszültség és alakváltozás kapcsolata

A rugalmassági modulus a redukciós tényezők segítségével adható meg, ahol az alapérték 210 GPa $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -on. A szabvány a hőmérséklettől való függést a redukciós tényezők segítségével veszi figyelembe (36. ábra).

- effektív folyási szilárdság $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$ (21)

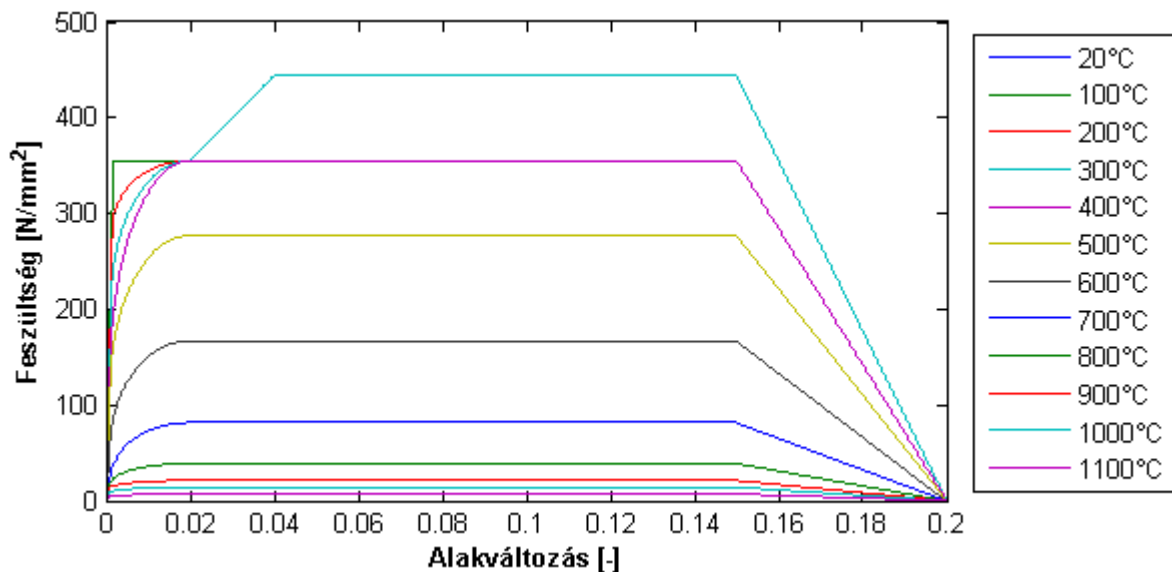
- arányossági határ $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$ (22)

- rugalmassági modulus $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$ (23)



36. ábra: Redukciós tényezők [20]

Acél esetén a feszültség és alakváltozás EC szerinti összefüggései meglehetősen terjedelmesek, így azokat nem közlöm. A segédparaméterek számítása és az egyenletek megtalálhatóak az *EN 1993-1-2:2005* ide tartozó fejezetében. A felkeményedés hatására is tartalmaz ajánlást az említett szabvány $400 \text{ }^\circ\text{C}$ -ig az 'A melléklet'-ben, ha a stabilitásvesztési lehetőségeket mérlegelve létrejöhet a felkeményedés.



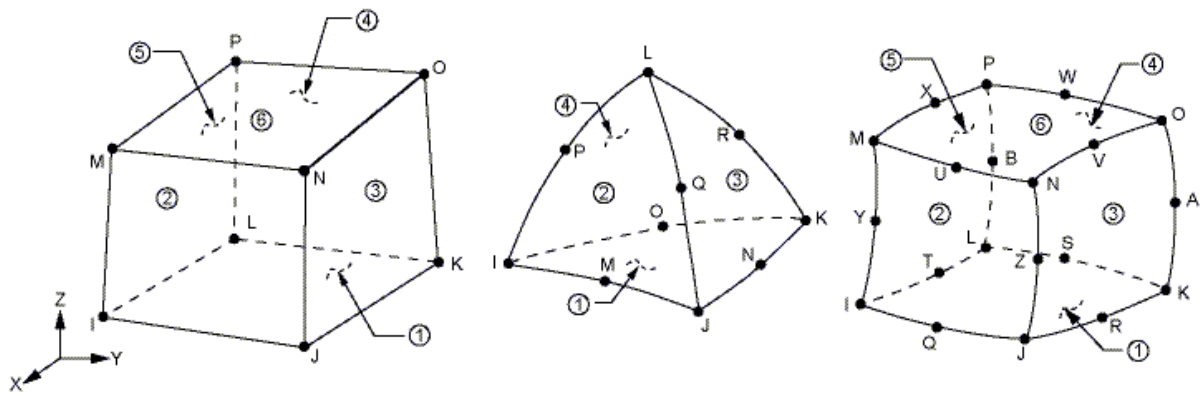
37. ábra: Feszültség-alakváltozás diagramok különböző hőmérsékletekre S355 jelű acélra

Az egyes hőmérsékletekhez tartozó, felkeményedést is figyelembevevő σ - ε diagramokat a 37. ábra foglalja össze. A 36. ábra 1200 °C-hoz tartozó értékeiből látszik, hogy ezen a hőmérsékleten már zérusnak veendő az anyag szilárdsága és merevsége. Numerikusan ezt nem tudjuk számszerűen garantálni, emiatt 1200 °C esetén az 1100 °C-hoz tartozó $k_{y,\theta}$, $k_{p,\theta}$ és $k_{E,\theta}$ redukciós tényezők felét, magasabb hőmérséklet esetén a huszadát vettem fel.

Az acél anyag viselkedését sokszor a kinematikai felkeményedő anyagmodellel írják le. A program elsősorban ciklikus terhelés esetén javasolja az említett modellt [23]. Hegesztés modellezésére azonban széleskörűen elfogadott az izotróp felkeményedő anyagmodell alkalmazása [1, 30, 31, 32], így a végeselemes programban multilineáris izotróp felkeményedő anyagmodellel dolgoztam. Nem ciklikus terhelés esetén, nagy nyúlások mellett ajánlott alkalmazni, olyan esetekben, ahol a kinematikai felkeményedés akár fel is nagyíthatná a Bauschinger-effektust [23].

4.4.2 Lehetséges elemtípusok

A feladat jellegéből adódóan a szóba jöhető elemtípusok a SOLID65 (vasbeton 8 csomópontú téglalap elem), SOLID185 (8 csomópontú téglalap elem), SOLID186 (20 csomópontú téglalap elem), SOLID187 (10 csomópontú tetraéder elem) és SOLID285 (4 csomópontú tetraéder elem). A SOLID65 és a SOLID285 nem került fel az ábrára (38. ábra). Csomópontok duplikálásával ezen végeselemeknél is lehetőség van a legkülönbözőbb degenerált alakú elemek (tetraéder, piramis, háromszög alapú prizma) létrehozására. Az elemek a folyamat során kialakuló elmozdulás és feszültség mezők alapján egy kiválasztott referenciaelemhez viszonyított eltéréseik alapján értékelhetők.



38. ábra: Mechanikai analízisre alkalmas végelemek csomóponti elrendezései: SOLID185, SOLID187 és SOLID186 [23]

4.5 Speciális ANSYS parancsok

A termikus analízishez a szokásosnak mondható parancsok mellett a következőket kell használni:

- NROPT: a megoldás Newton-Raphson módszerrel történik
 - o FULL: teljes Newton-Raphson módszer alkalmazása
- LNSRCH: a Newton-Raphson formulán belüli line-search opciót állítja be
- BFE: a kiválasztott elemekre a megadott típusú terhet definiálja
 - o HGEN: fajlagos hőteher generálása
- SF, SFE: a kiválasztott csomópontokra vagy elemekre a megadott típusú terhet definiálja
 - o CONV: hőátadás megadása teherként az elemekre vagy a csomópontok által kifestített felületekre
 - o RDSF: sugárzás megadása teherként az elemekre vagy a csomópontok által kifestített felületekre
- BFEDELE: a BFE parancs által definiált terhet törli
- SFDELE, SFEDELE: az SF vagy SFE parancs által definiált terhet törli
- EKILL: deaktiválja a kiválasztott végelemeket, ezzel együtt lenullázza az elem megnyúlását, így követhető a hegfürdő előrehaladása
- EALIVE: aktiválja a kiválasztott végelemeket, így modellezhető a varrat megszilárdulása

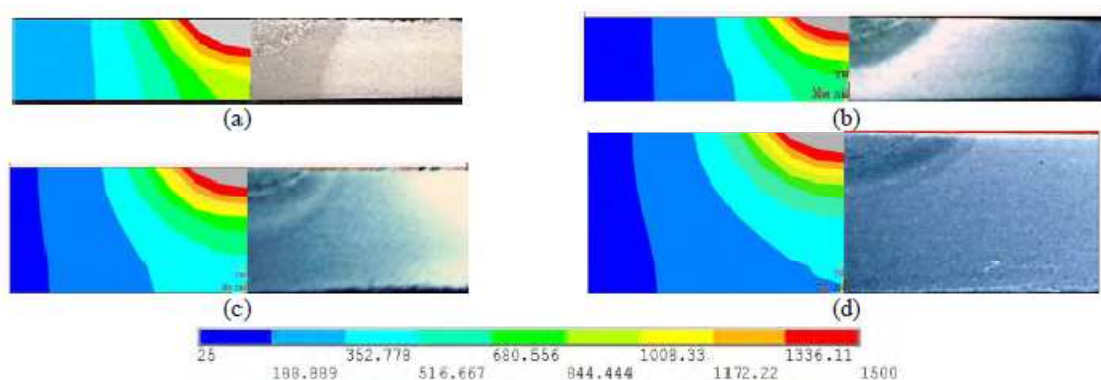
- LDREAD: egy adott eredményfájlból – ebben az esetben a termikus analízishez tartozik – beolvassa az értékeket, és a kiválasztott elemeken teherként működteti azokat

4.6 Verifikáció lehetőségei

A hegesztési folyamat modellezése során egy komplex termo-mechanikus problémával szembesülünk, így a hegesztéstechnológiai szimulációk verifikációja sokféle aspektusból megközelíthető. Ezen lehetőségek közül a legáltalánosabbakat és legelfogadottabbakat részletezi a következő néhány bekezdés.

4.6.1 Beolvadás és varratalak vizsgálata

A numerikus számítások verifikálása ebben az esetben a hőbefolyásolt zóna alakja és mérete alapján történik veszik alapul. Ezt hasonlítják össze valós kísérleti eredményekkel: A beolvadási vonalat, vagyis a varrat szélességét és a beolvadási mélységet például [15] az 1500 °C-os izotermával definiálta (39. ábra). Az említett cikkben különböző vastagságú lemezeken TIG ívhegesztéssel alakítottak ki egy varratot.



39. ábra: A numerikus és kísérleti eredmények összehasonlítása: (a) 3 mm-es, (b) 4 mm-es, (c) 5 mm-es és (d) 6 mm vastag lemez esetén. [15]

4.6.2 Hegesztés modellezésére kifejlesztett program

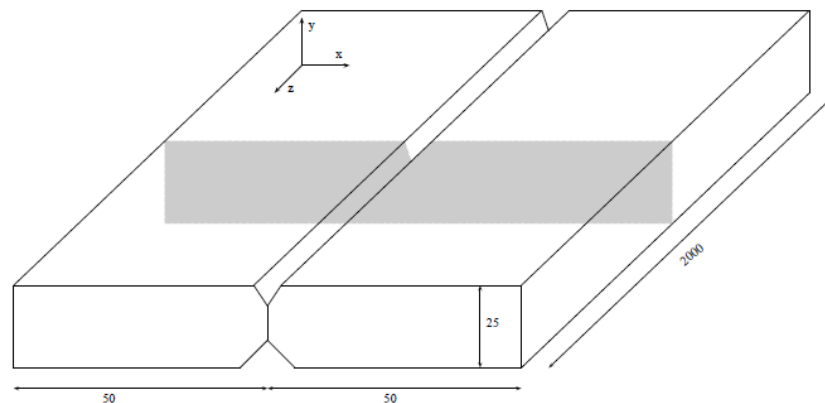
A verifikációhoz alkalmazhatunk kifejezetten hegesztés szimulációjára kifejlesztett programot is. Erre jó példa lehet például a SYSWELD vagy MARC MENTAT végelelemes program. Nem annyira ismert programokról van szó, kutatási-fejlesztési projekteknél sokkal inkább elterjedt az ANSYS program alkalmazása. Egy sokkal kevésbé specializált végelelemes programról van szó, ennek ellenére a nemzetközi szakirodalomban található cikkekben a legtöbb hegesztés-szimulációt ezzel a programmal végezték.

4.6.3 Verifikált kutatások

A szakirodalomban sok cikket találunk a hegesztésszimuláció témakörében. Amennyiben a szerzők modelljeiket verifikálták, akkor az általuk megadott paraméterek, jellemzők alapján felépíthetők a modellek, és első lépésben verifikálhatóak az eredményeink. Ez természetesen azt vonja maga után, hogy csak egy bizonyos esetet tudunk vizsgálni, de ez is hasznos lehet, mielőtt valós kísérletekre kerülne sor. Mindenképpen hasznos abból a szempontból, hogy információt kapunk arról, vajon magát a hegesztés jelenségét pontosan modelleztük-e.

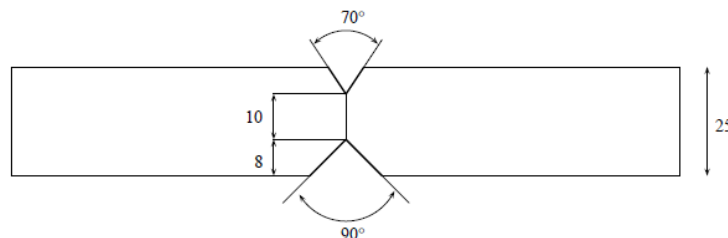
4.6.4 Andersson-modell

Andersson [25] 1978-ban készített szimulációt és kísérletet SAW technológiával hegesztett lemezekhez. Szimulációjának eredményei jól korreláltak a kísérleti eredményeihez. Az egymáshoz hegesztett lemezeket perspektiviku képét a 40. ábra mutatja be.



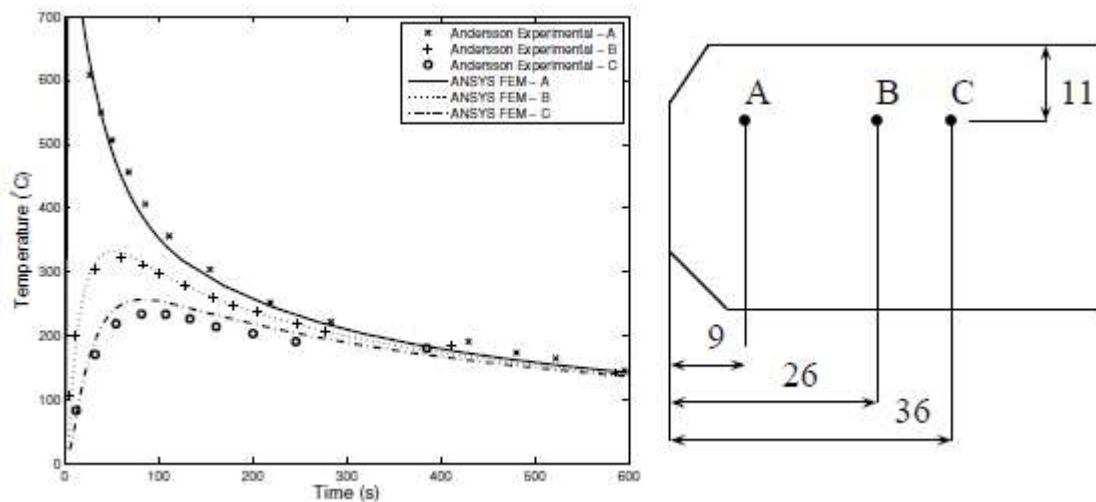
40. ábra: Andersson által vizsgált probléma geometriája [11]

A keresztmetszetet a 41. ábra mutatja az élképzéssel együtt. A lemezeket csak a felső oldalon hegesztették össze, habár a varrat helyét az alsó síkon is kiképezték. A varratot három lépésben alakították ki. Andersson a termikus és a mechanikai analízist teljes egészében szétválasztotta.



41. ábra: A vizsgált keresztmetszet az élképzésekkel együtt [11]

A termikus analízis verifikálásához három ipari hőmérőt alkalmazott Andersson a 42. ábra jobb oldalán feltüntetett A, B és C pontokban. A bal oldalon [11] eredményei láthatóak Andersson kísérleti eredményeivel összehasonlítva.

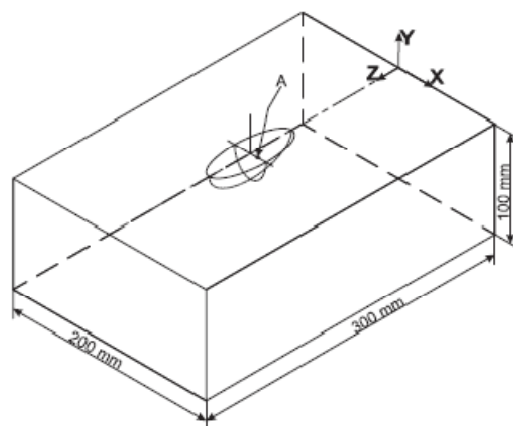


42. ábra: A lehűlési görbék és a hozzájuk tartozó vizsgált pontok [11]

A felső és alsó felülethez tartozó σ_x és σ_z ábrákat [11] tartalmazza. *Andersson* ezekhez nyúlásmérő bélyegeket alkalmazott, valamint a furatokat *Gunnert*-technikával alakította ki. [11]

4.6.5 Christensen-kísérlet

A kidolgozott mozgó hőforrás modelljének verifikálásához egy vastag lemez 3D-s végeleemes modelljét készítette el [1]. A szimmetria miatt a meghegesztett lemez felére generáltak csak hálót. A 43. ábra mutatja az alkalmazott geometriát a 3D végeleemes analízishez.



43. ábra: A 3D VEM modell verifikációja során alkalmazott geometria [1]

A modell ugyanazt a hőforrás-eloszlást és anyagtulajdonságokat alkalmazza, mint korábban *Goldak*. Ezeket a paramétereket foglalja össze az 1. táblázat, a 2. táblázat és a 3. táblázat.

Ív paraméterei	Jelölés	Érték	Mértékegység
Áramerősség	I	1170	A
Feszültség	U	32.9	V
Hatásfok	η	0.95	-
Teljes hőmennyiség	Q	36568.35	W
Sebesség	v	5	mm/s

1. táblázat: Ív paraméterek [1]

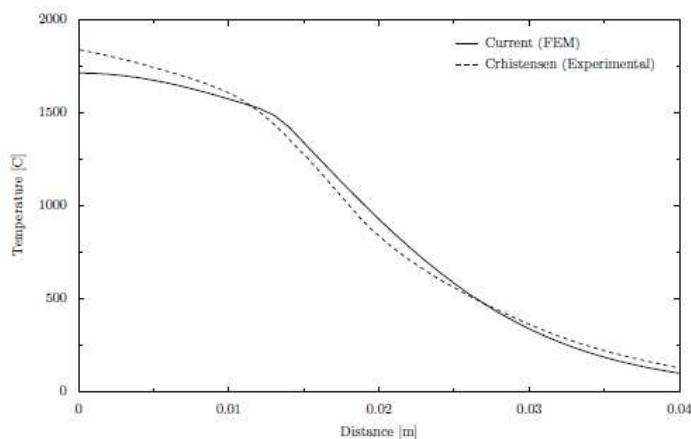
Paraméter	Érték	Mértékegység
a	20	mm
b	20	mm
c_f	15	mm
c_r	30	mm
f_f	0.6	-
f_r	1.4	-

2. táblázat: Goldak-féle paraméterek [1]

Paraméter	Jelölés	Érték	Mértékegység
Sűrűség	ρ	7200	kg/m^3
Fajhő (szilárd)	c_s	680	$J/(kg \cdot K)$
Fajhő (folyadék)	c_l	680	$J/(kg \cdot K)$
Látens hő	$\mathcal{L}$	291660	J/kg
Hővezetés (szilárd)	κ_s	34	$W/(m \cdot K)$
Hővezetés (folyadék)	κ_l	$2\kappa_s$	$W/(m \cdot K)$
Szilárd halmazállapothoz tartozó hőm.	T_{sol}	1774	K
Folyadék halmazállapothoz tartozó hőm.	T_{liq}	1763	K
Kezdeti hőmérséklet	T_0	283	K

3. táblázat: Anyagtulajdonságok a hőtani probléma leírásához [1]

A 44. ábra a felszín hőmérséklet-eloszlását mutatja az x tengely mentén 11.5 másodperccel az ív továbbhaladása után. A numerikus eredményeket összehasonlították a Christensen-féle kísérleti eredményekkel.



44. ábra: A modell és a Christensen-féle kísérleti eredmények összehasonlítása [1]

4.6.6 Nyúlásmérő bélyegek

A maradó alakváltozások és sajátfeszültségek meghatározásához az egyik legegyszerűbb módszer a nyúlásmérő bélyegek alkalmazása (45. ábra). Lényege, hogy a sajátfeszültség-

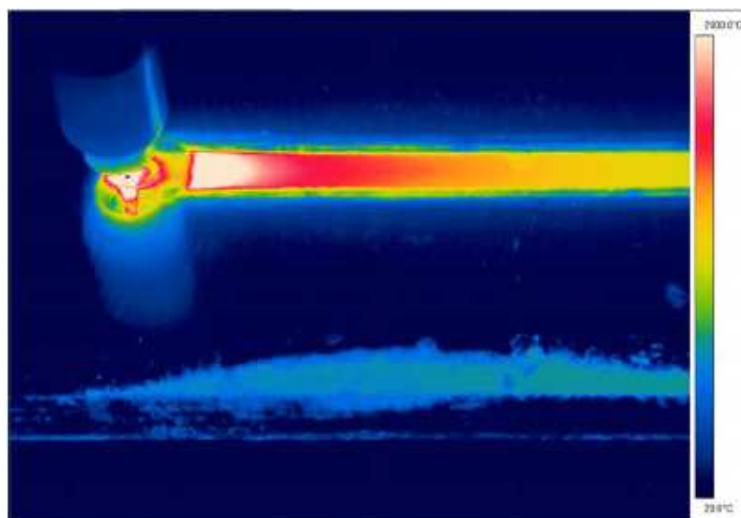
rendszerrel terhelt lemezre ráhelyezik a bélyeget, mely ekkor nyúlásmentes állapotban van. A nyúlásmérő bélyeg közelében furatot készítenek, ekkor a bélyeg megnyúlik (ε): egyrészt a geometria megváltozása miatt (ε^f), másrészt a lemezben működő sajátfeszültségek miatt (ε^0). A mért megnyúlás ezek alapján a következő egyenlettel írható le: $\varepsilon = \varepsilon^f - \varepsilon^0$. Ebből a sajátfeszültségek számíthatók.



45. ábra: Egy I-szelvény övéén elhelyezett nyúlásmérő bélyegek és a furatok [5]

4.6.7 Hőkamerás felvételek

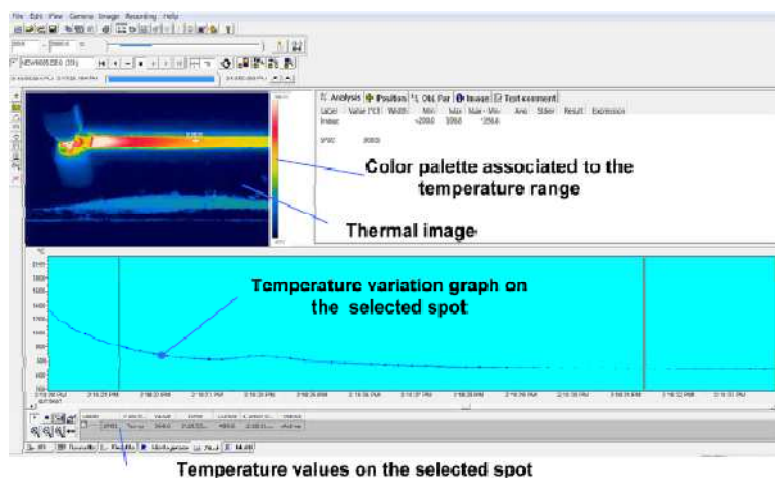
[24] forrásra hivatkozva mutatom be a hőkamerás felvételek alkalmazhatóságát. A 46. ábra a hőterjedést mutatja a vizsgált mintadarab teljes felületén. A hő láthatóan a hegesztés közvetlen közelében koncentrálódik. A pisztolytest körül kivehetőek az ellipszoid alakú hőforrás körvonalai, valamint az is, hogy a hőforrás előtt az izotermák sokkal sűrűbben, koncentráltabban, mögötte pedig sokkal inkább szétterjedten helyezkednek el. [24] A hőkamerás felvételek nagy előnye, hogy egyetlen felvétellel információkat kaphatunk a vizsgált területről, így nincs szükség ipari hőmérők alkalmazására. Az ipari hőmérőket kalibrálni kell minden egyes mérésnél, hiszen több hőmérő alkalmazása esetén az általuk kibocsájtott jelek befolyásolhatják a mérési eredményeket. [24]



46. ábra: A hőmérsékleti mező megjelenítése a hegesztett kapcsolat környezetében [24]

Ahhoz, hogy magát a termikus folyamatot egyetlen paraméter szerint vizsgálhassák, szokás a $t_{8/5}$ hűlési időt megadni, ami a 800°C-ról 500°C-ra történő hűléshez tartozó időt reprezentálja. Ez az adat a végeleemes számítások kalibrálásánál is hasznos lehet. [24]

A 47. ábra a hőmérséklet változását mutatja a mintadarab egy kiválasztott pontjában. Egy ilyen hőmérséklet-idő görbéből könnyedén meghatározható az előbb említett $t_{8/5}$ érték, valamint akár a teljes lehűlési görbe ellenőrizhető. A $t_{8/5}$ érték meghatározása mellett az izotermák elhelyezkedését és lefutását is kontrollálhatjuk. Amennyiben a vizsgált anyag olvadási hőmérsékletét ismerjük, meghatározhatjuk a varrat beolvadási paramétereit. [24]



47. ábra: A hőkamerás felvétel és a kiválasztott pont hőmérséklet-idő görbéje [24]

5 Tompavarrattal kialakított kapcsolat szimulációja

Mielőtt bármilyen komolyabb szerkezeti kialakítást tanulmányoznánk, először egy viszonylag egyszerűbb geometriájú kapcsolat hegesztésének numerikus módszerrel történő vizsgálatát hajtottam végre. A szimulációkhoz az ANSYS [23] végeleemes programot használtam.

5.1 Alkalmazott elemtípusok

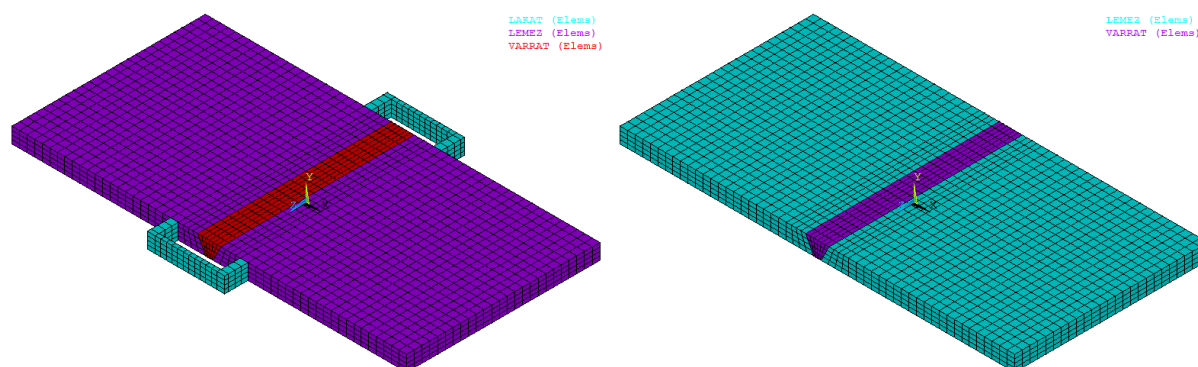
A termikus analízishez *SOLID70* elemtípust alkalmaztam. Ez egy 8 csomópontú téglalelem, minden csomópontjában egy hőmérsékleti szabadságfokkal. [lsd. 4.3.3]

A mechanikai analízishez *SOLID185* típusú elemet használtam. Ez szintén 8 csomópontú téglalelem, minden csomópontjában 3 elmozdulási szabadságfokkal. [lsd. 4.4.2]

5.2 Geometria és megtámasztási viszonyok

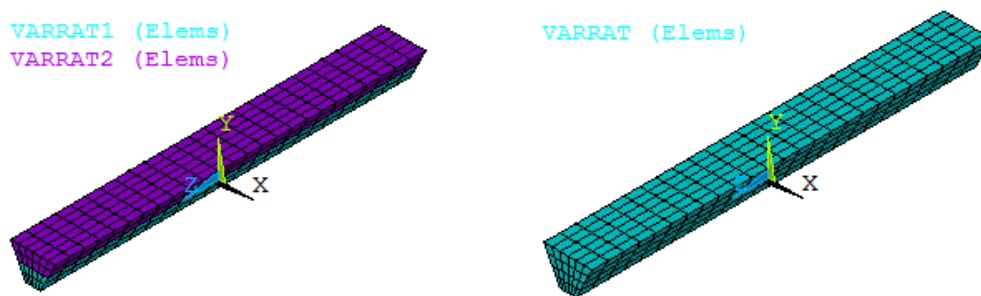
Vizsgálatunk tárgya két 50 mm x 50 mm-es, 4 mm vastag lemez tompavarrattal történő hegesztése. Lemunkált éleket alkalmaztam: a lemezek felső élét 2 mm-rel kisebbre alakították

ki, az alsó élek közt pedig ugyancsak 2 mm nagyságú rés van. A hálófelosztás egyenletes, csak a varratban és a varrat környezetében sűrűbb (48. ábra).



48. ábra: Lakattal és lakat nélkül kialakított végelelemes modell hálófelosztása

Egysoros és kétsoros varratkialakítást (49. ábra) is modelleztem, valamint különböző megtámasztási viszonyokat is figyelembe vettem.



49. ábra: Egysoros és kétsoros varratkialakítás

Négy különböző megtámasztási viszonyt vizsgáltam: az összelakatolt lemezek esetén lemezenként két-két pontban van megtámasztva a szerkezet. A lakatnak itt az a szerepe, hogy a két lemezt összefogja és merevtestszerű mozgás ne alakulhasson ki. A lakat nélkül kialakított verzió esetén további három megtámasztási viszonyt analizáltam: a) a szélső él mentén függőleges értelemben minden csomópont meg van támasztva; b) a négy sarok befogott; c) a szélső élek befogottak.

5.3 Anyagjellemzők és hegesztési paraméterek

Az anyagjellemzőket a hőmérséklet függvényében 4.3.2 és 4.4.1 szerint adtam meg. A lemezek S355 acélból készültek, MAG hegesztéssel összeillesztve. A hőforrás 1,5 mm/s sebességgel haladt végig a lemezen 33 másodperc alatt. Egy varratsor hegesztési és hűlési folyamat legvégét $t=600$ s jelzi.

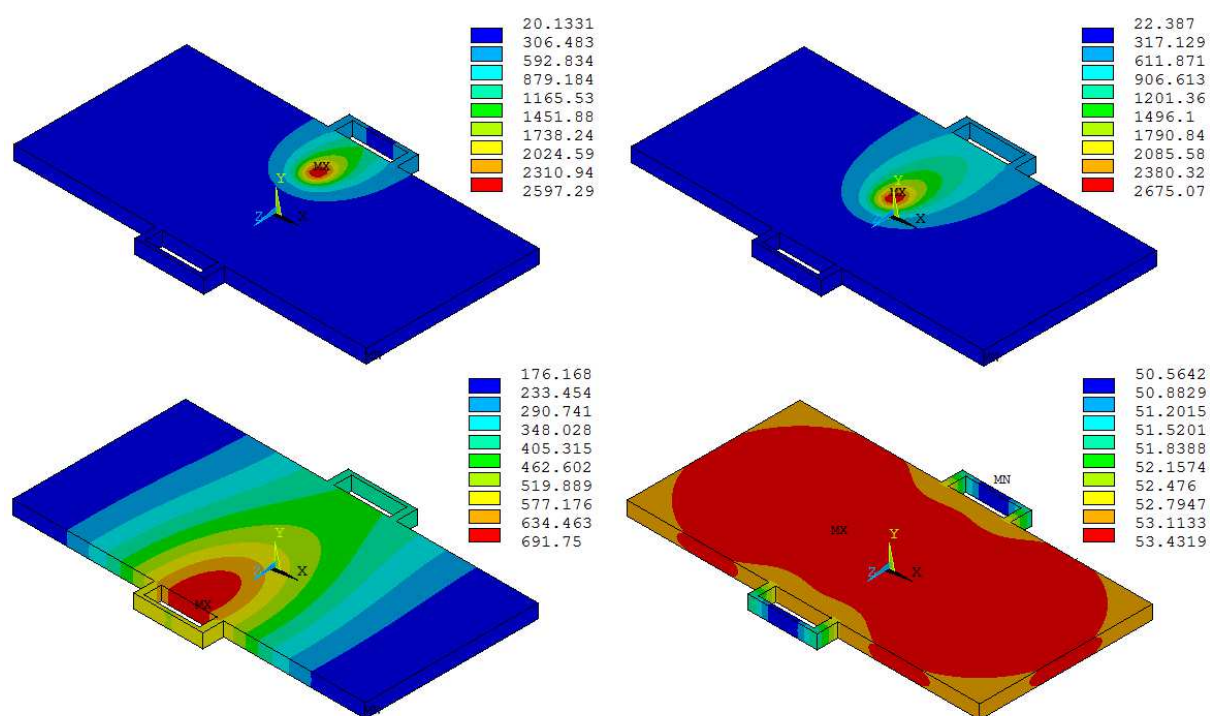
Egyetlen varratsor esetén 60 A áramerősséget és 30 V feszültséget alkalmaztam. A hegesztés hatásfokát 0.87 -ra vettem fel. A hőforrás paraméterei *Goldak*-féle jelöléssel (lsd. 4.3.1) a következők: $a = 5\text{ mm}$, $b = 5\text{ mm}$, $c_f = 5\text{ mm}$, $c_r = 5\text{ mm}$, $f_f = f_r = 1$.

Két varratsor kialakításakor az előzőhöz hasonlóan a hatásfok 0.87 volt. Az első varratsornál 30 A áramerősséget és 30 V feszültséget, a második varratsornál 35 A áramerősséget és 30 V feszültséget működtettem. A hőforrás paraméterei pedig az alábbiak voltak (1 és 2 alsó indexszel jelölve a varratsor számát): $a_1 = 3\text{ mm}$, $a_2 = 5\text{ mm}$, $b_1 = b_2 = 2.5\text{ mm}$, $c_{f1} = c_{f2} = c_{r1} = c_{r2} = 5\text{ mm}$, $f_{f1} = f_{f2} = f_{r1} = f_{r2} = 1$.

5.4 Termikus analízis eredményei

5.4.1 Hőmérsékleti mezők

A termikus analízis a mechanikai analízis alapját képezi. A tranziens termikus analízis kezdetén a lemezt a $T = 20^\circ\text{C}$ -os külső hőmérsékletűnek vettem. Csak az egy varratsorral kialakított, összelakatosított lemez esetén kialakuló hőmérsékleti mezőket mutatom be (50. ábra), a két varratsoros kialakítás nem tér el ettől jelentősen. Természetesen a hőforrás paraméterei eltérőek, de ez a jelenség lefutásán nem változtat.



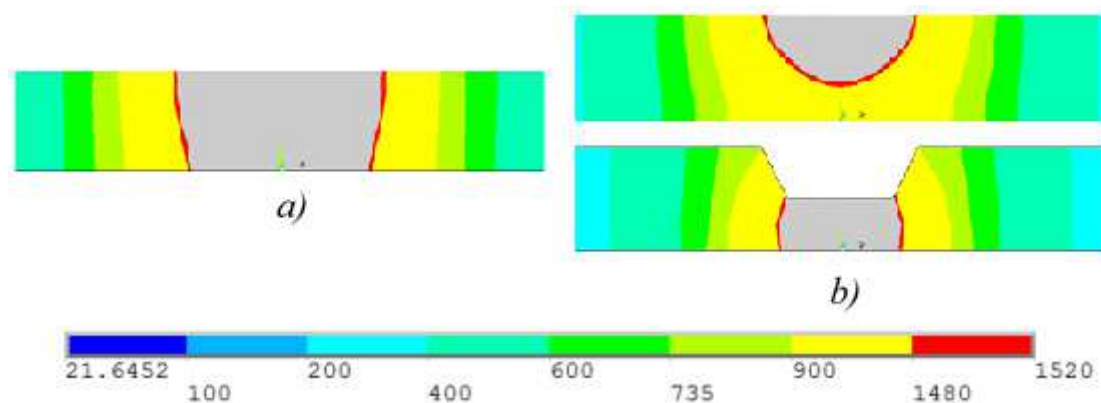
50. ábra: Hőmérsékleti mező a 12. (bal fent), 20. (jobb fent), 61. (bal lent). és 600. (jobb lent) másodpercben

A lakat meglelte csak minimálisan befolyásolja a termikus jelenséget, hiszen a modellben egy valós méretű lakatnál sokkal kisebb lakat szerepel. Az 50. ábra elsősorban a hegesztési és

lehűlési folyamat időbeli változásait prezentálja. A 12. és 20. másodpercben a hőforrás előrehaladását, a 61. és 600. másodpercben a lemez hűlését láthatjuk. A végső állapotban a lemez hőmérséklete 56°C volt. A hőforrás középpontjának közvetlen közelében a hőmérsékleti csúcs nagyan függ az elemmérettől és az alkalmazott elemtípustól is, hiszen egyáltalán nem mindegy például, hogy a végelem hány integrálási pontot alkalmaz. Az időegységre eső bevitt hőmennyiség azonban állandó, így a távolabbi izotermák helyzete alapvetően nem függ az elemfelosztástól.

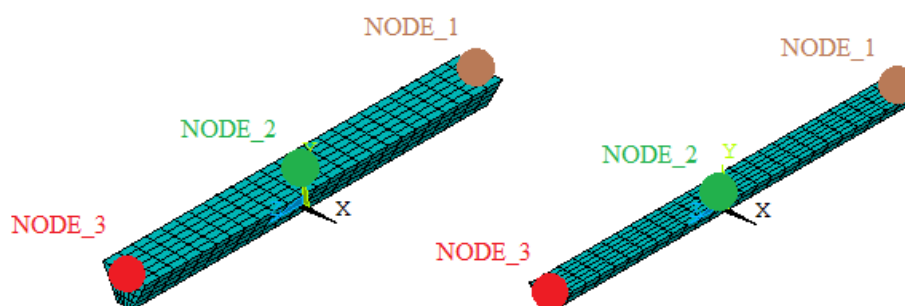
5.4.2 Beolvadási és hőbefolyásolt zóna alakja

A megadott hegesztési paraméterek és a varratsorok számának függvényében az alábbi beolvadási és hőbefolyásolt zóna alakokat kaptam (51. ábra). A 600°C és 735°C közötti zóna az ausztenitképződés elejét, a 735°C és 900°C közötti zóna az ausztenitképződés végét jelöli. A 900°C -os és 1480°C -os izotermák egy átmeneti hőmérsékleti zónát jelölnek. Az 1480°C -os izoterma a még szilárd halmazállapothoz tartozó T_s -t, az 1520°C -os izoterma pedig a folyadék halmazállapothoz tartozó T_l -t reprezentálja. Az 1520°C feletti hőmérsékleti tartomány a teljesen megolvadt varrat- és alapanyagra vonatkozik.



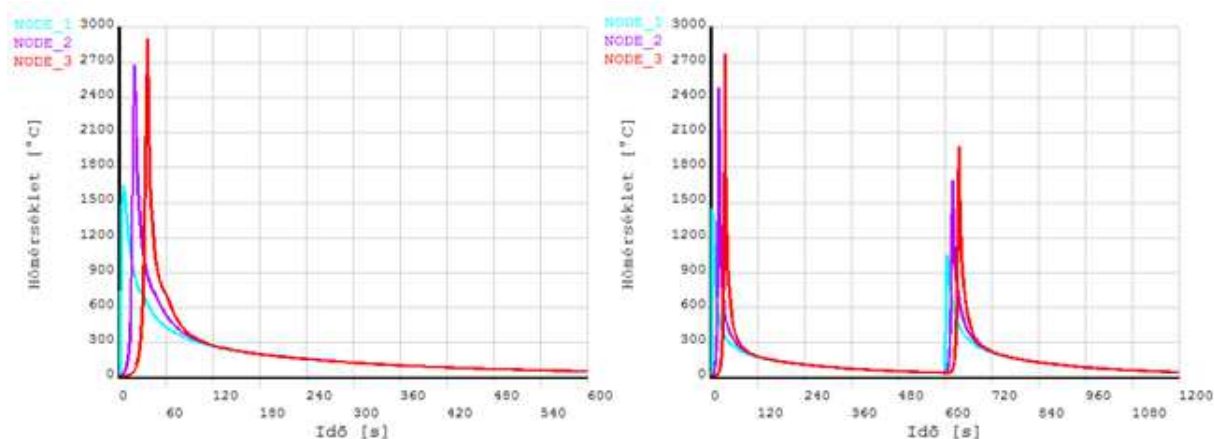
51. ábra: Beolvadási és hőbefolyásolt zóna alakja: a) egysoros varrat esetén; b) kétsoros varrat esetén

5.4.3 Lehűlési görbék



52. ábra: Kijelölt csomópontok egysoros, illetve kétsoros varrat esetén

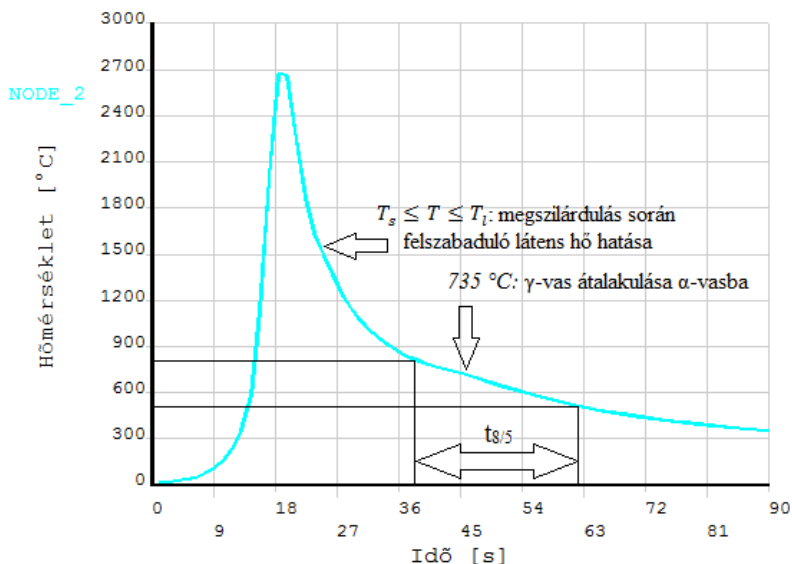
A lehülési görbékhez (53. ábra) három csomópontot vizsgáltam (52. ábra), melyek egysoros varrat esetén a varrat felső síkján, kétsoros varrat esetén az első varratsor felső síkján helyezkednek el a modell szimetriatengelyén. A z irányú koordinátájuk sorrendben: $-L/2$ (NODE_1), 0 (NODE_2), $+L/2$ (NODE_3).



53. ábra: Lehülési görbék a megjelölt pontokhoz egy-, illetve kétsoros varratkialakítás esetén

A lehülési görbékben látni lehet, hogy a hőforrás a csúcshőmérsékleteket nézve az alkalmazott kis hegesztési sebesség miatt nem stabil, hiszen időben folyamatosan növekvő tendenciát mutat a maximális hőmérséklet. Ez a NODE_3-hoz tartozó görbéből derül ki. A NODE_1 lehülési görbéje viszont arról árulkodik, hogy időre van szükség, mire a hőforrás eléri az 'üzemi hőmérsékletet'.

Az 54. ábra csak a NODE_2-höz tartozó lehülési görbét részletezi, felnagyítva azt az Idő tengely mentén. Észrevehető, hogy a görbe meredeksége a $T_s \leq T \leq T_l$ intervallumban, valamint a 735°C -os hőmérsékletnél enyhén megváltozik. Ez egyrészt a megszilárdulás során felszabaduló hőnek,

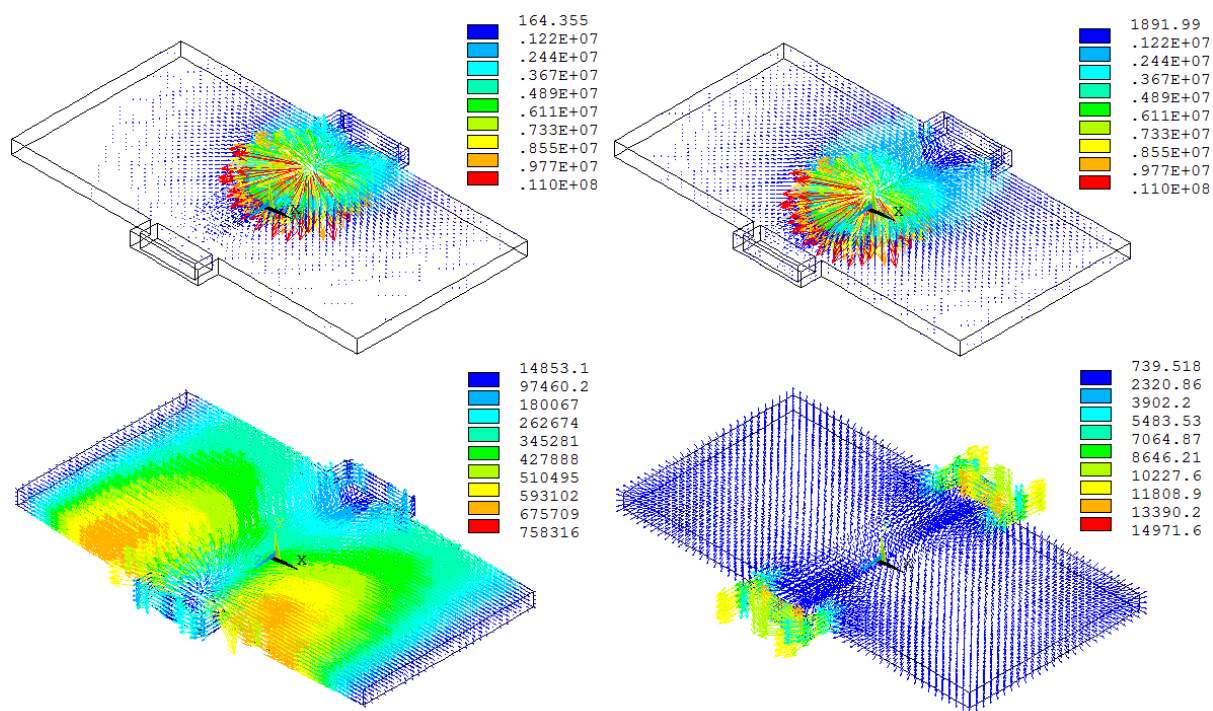


54. ábra: NODE_2 lehülési görbéje és a $t_{8/5}$ meghatározása

valamint a γ -vas α -vasba történő átalakulásának (ausztenitesedési fázis) a következménye. A görbe alapján a 4.6.7 pontban említett $t_{8/5}$ érték 24 s-ra adódott.

5.4.4 Hőáramok

Az előzőekben bemutatott hőmérsékleti ábrákhoz (50. ábra) tartozó hőáram vektorábrákat foglalja össze az 55. ábra. A hőforrásnál koncentráltan keletkező és szétáramló hőt jól mutatja a két felső ábrarészlet. A bal alsó sarokban lévő részleten már megkezdődött a hő szétterjedése és a hőmérsékletek kiegyenlítődése a lehűlési fázis kezdeti szakaszán. A jobb alsó ábrarészletnél viszont már gyakorlatilag kiegyenlítődtek a hőáramok. Hegesztés közben a hőáram értékek a hőforrás környezetében az elvártaknak megfelelően állandóak.



55. ábra: Hőáram vektorábrák a 12. (bal fent), 20. (jobb fent), 61. (bal lent). és 600. (jobb lent) másodpercben

5.5 Mechanikai analízis eredményei

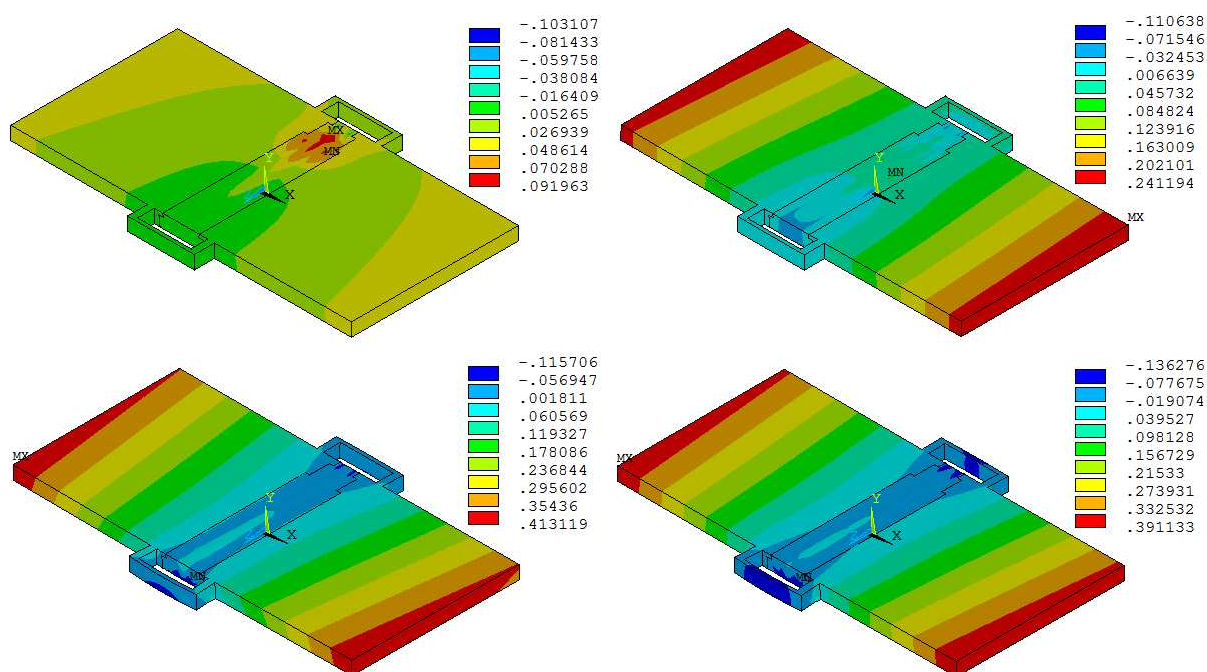
A mechanikai vizsgálat a termikus analízist követően végezhető el nem kapcsolt analízis esetén. Az egyes időpillanatokhoz kapott hőmérsékleti mezőket alkalmazzuk hőmérsékleti teherként a mechanikai analízis során. Az elmozdulások és feszültségek alakulása két fő részre bontható: amíg a hőforrás jelen van, és a hőmérsékletváltozás gyorsasága nagy, illetve amikor megszűnik, vagyis a levegővel történő hőcsere lesz domináns. Ennek megfelelően az első szakaszban kisebb, a másodikban nagyobb időlépésekkel futtattam az analízist.

Az 5.2 pontban bemutatott megtámasztási viszonyoknak ettől a ponttól van jelentősége. A termikus analízist nem befolyásolta jelentősen a geometria kis mértékű megváltozása (lemezek összelakatozása), de a mechanikai analízisnél ennek fontos szerepe van.

Az elkövetkezendő pontokban bemutatom a legfőbb eredményeket. Először az összelakatosított, egysoros varrattal kialakított kapcsolatot részletezem (néhány közbelső időpontot is kiragadva), majd a többi esetre csak a maradó sajátfeszültségeket és alakváltozásokat adom meg.

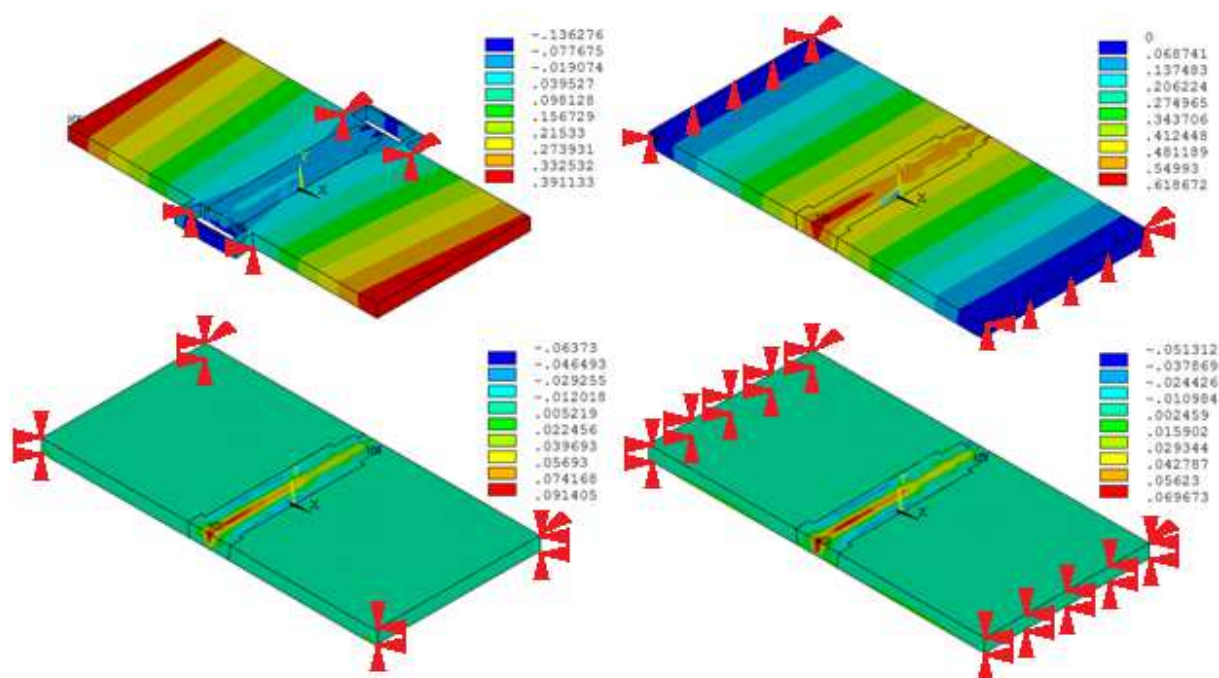
5.5.1 Elmozdulások

A feladat szempontjából lényeges és értékelhető elmozdulás a síkra merőleges eltolódás, mely a programban az y irányt jelenti. Az 56. ábra az 5.4 fejezetben már kiragadott időpillanatokhoz tartozó elmozdulásokat mutatja. A 600. másodperchez tartozó maximális elmozdulás 0.39 mm -re adódott. Látható, hogy a lemezek a varrat körül kvázi elfordulnak, és a lemezszélek felé egyre nagyobb eltolódások jelentkeznek. Az alkalmazott lakatok mérete igencsak jelentős az elmozdulások szempontjából, hiszen mind a keresztirányú zsugorodással, mind a keresztirányú hajlítással szemben ellenállással bírnak. Azt viszont látnunk kell, hogy az itt definiált lakatok jóval kisebbek, mint a valóságban. Elsősorban a modellezés megkönnyítése érdekében használtam lakatokat, elkerülvén a merevtestszerű mozgást négy ponton való megtámasztás esetén.



56. ábra: Függőleges irányú elmozdulások a 12. (bal fent), 20. (jobb fent), 61. (bal lent). és 600. (jobb lent) másodpercben

Az egysoros varratkialakításhoz tartozó négy különböző eset imperfekt alakjait az 57. ábra mutatja be.

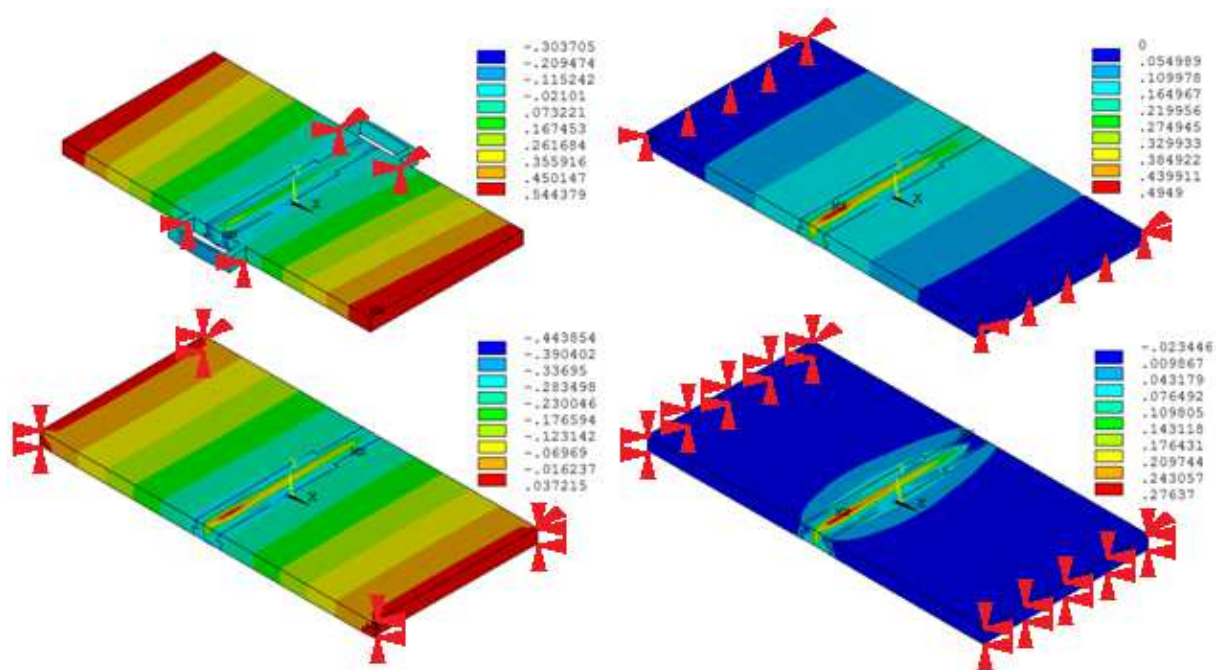


57. ábra: Függőleges irányú elmozdulás végső állapotban egysoros varratkialakításnál: lakattal összefogott lemezek esete (bal fent); a szélső él mentén függőleges értelemben minden csomópont meg van támasztva (jobb fent); a négy sarok befogott (bal lent); a szélső élek befogottak (jobb lent)

Az 57. ábra felső két ábrarészlete meglehetősen hasonló elmozdulásértékeket mutat. Az összelakatosított esetben körülbelül $0.45\text{--}0.50\text{ mm}$ a maximális elmozdulás a lemezre. (Megj.: Ezt úgy kapjuk, hogy a pozitív és negatív értékek különbségét vesszük. Ennek az az oka, hogy a megtámasztások a lakat és a lemez találkozásánál vannak a varrattól távolabbi pontban.) Ez ahhoz az értékhez hasonló, mint amit a széleken megtámasztott esetben kaptam (eltekintve a varratdudortól a lemezvégen).

A szélső éleken végig, illetve csak a sarkokban megfogott lemezek esetén nem alakulnak ki nagy alakváltozások. Abszolút értelemben nincs nagy különbség a két eset között, de relatíve 20-30% az eltérés. A feszültségek eloszlásában (melyet a következő pont taglal) is szerepet játszanak az említett szempontok, azonban ami ebből az aspektusból sokkal fontosabb, hogy a befogott él esetén keresztirányban folyamatosan meg van támasztva a lemez.

A kétsoros varratkialakításhoz tartozó négy különböző eset sajátdeformációs alakjait az 58. ábra mutatja be (1200. másodperchez tartozó ábrarészletek).



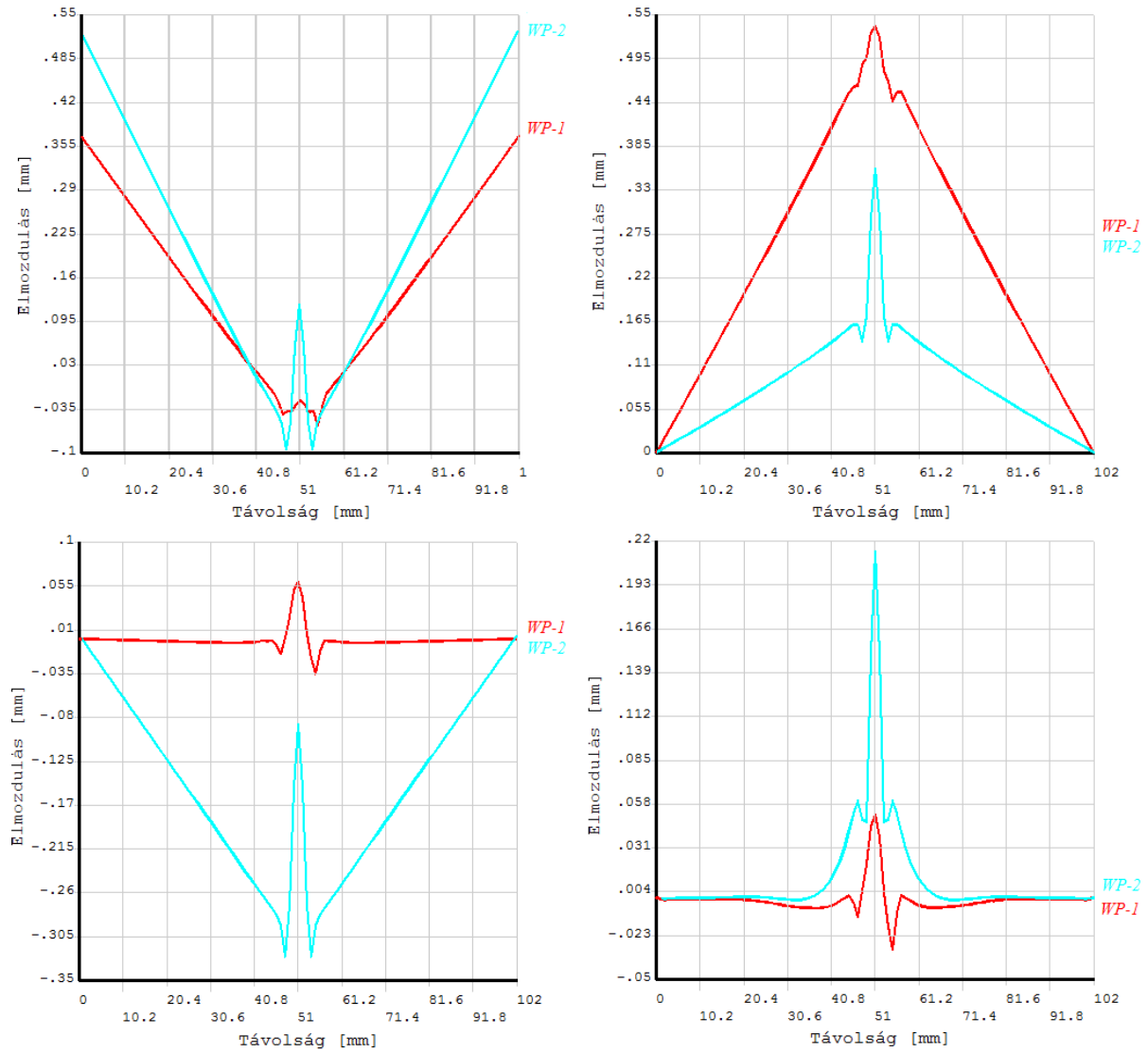
58. ábra: Függőleges irányú elmozdulás végső állapotban kétsoros varratkialakításnál: lakattal összefogott lemezek esete (bal fent); a szélső él mentén függőlegesen értelemben minden csomópont meg van támasztva (jobb fent); a négy sarok befogott (bal lent); a szélső élek befogottak (jobb lent)

Az egysoros varratkialakításnál tapasztaltakkal szemben az eltérések elsősorban a varratsoroknak a lemezek semleges tengelyéhez viszonyított külpontosságából adódik. A befogott szélső élek esetén legkisebbek a változások (amennyiben a varratdudort nem számítjuk). Az egyes esetekhez tartozó változásokat a következő pontban lévő metszeteken mutatom be.

5.5.2 Metszetek - elmozdulások

A metszeteket keresztirányban, a hossz tengely felében, a lemezek felső síkján vettem fel. Az 59. ábra szemlélteti az egysoros (WP-1) és kétsoros (WP-2) kialakítás közötti változásokat. Az előző ponttal összehasonlítva, itt még inkább láthatóvá válnak a markáns változások. A varrat egyik széle 47 mm-nél, másik széle 53 mm-nél helyezkedik el, ezt a belső varratszakaszt érdemes külön kezelni, hiszen a varratdudor alakjának ismerete nem kardinális kérdés számunkra ennél a vizsgálatnál.

Az összelakatolt esetről közel 40%-os elmozdulásnövekedést tapasztaltam. A szélső élen csuklósan megtámasztott, valamint a sarkokban megfogott lemezeknél a varratszélekre koncentrálna, kiderül, hogy a változás igen jelentős.



59. ábra: : Függőleges irányú elmozdulások összehasonlítása végső állapotban WP-1 és WP-2 esetén: lakattal összefogott lemezek esete (bal fent); a szélső él mentén függőleges értelemben minden csomópont meg van támasztva (jobb fent); a négy sarok befogott (bal lent); a szélső élek befogottak (jobb lent)

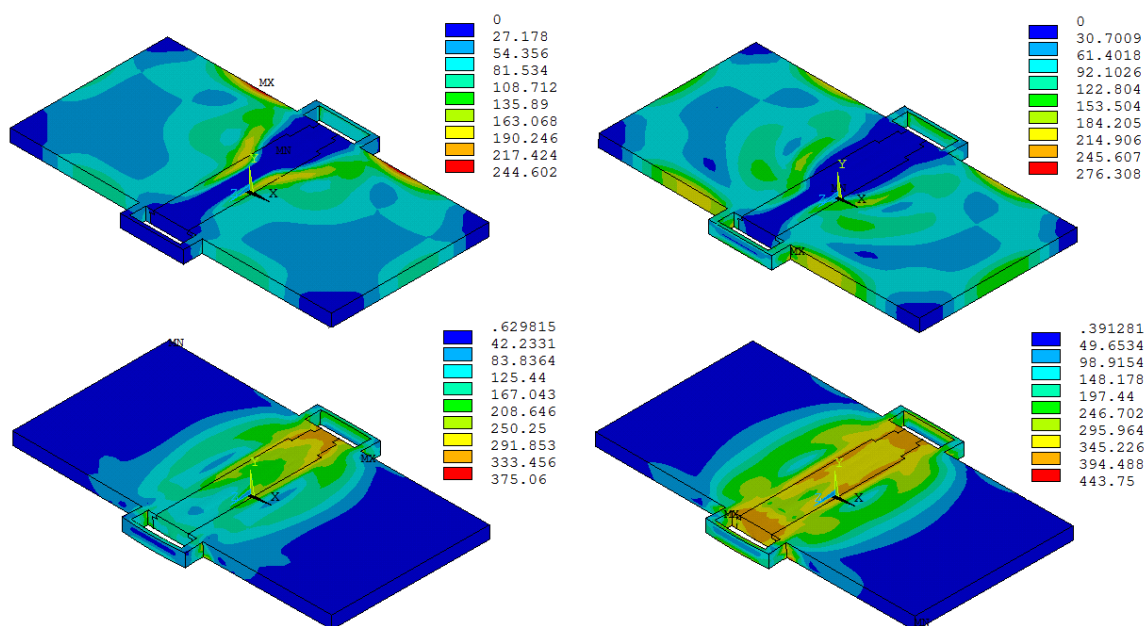
5.5.3 Feszültségek

A hegesztés hatására kialakuló feszültségrendszer térbeli, így a 60. ábra a széles körben alkalmazott összegzés után kapott von Mises feszültségeket mutatja be a már bemutatott időpillanatokhoz egysoros varrathoz, összelakolt esetben.

A von Mises feszültségeket (ANSYS-ben ekvivalens feszültségek) a következő (24) formulával lehet megadni [23]:

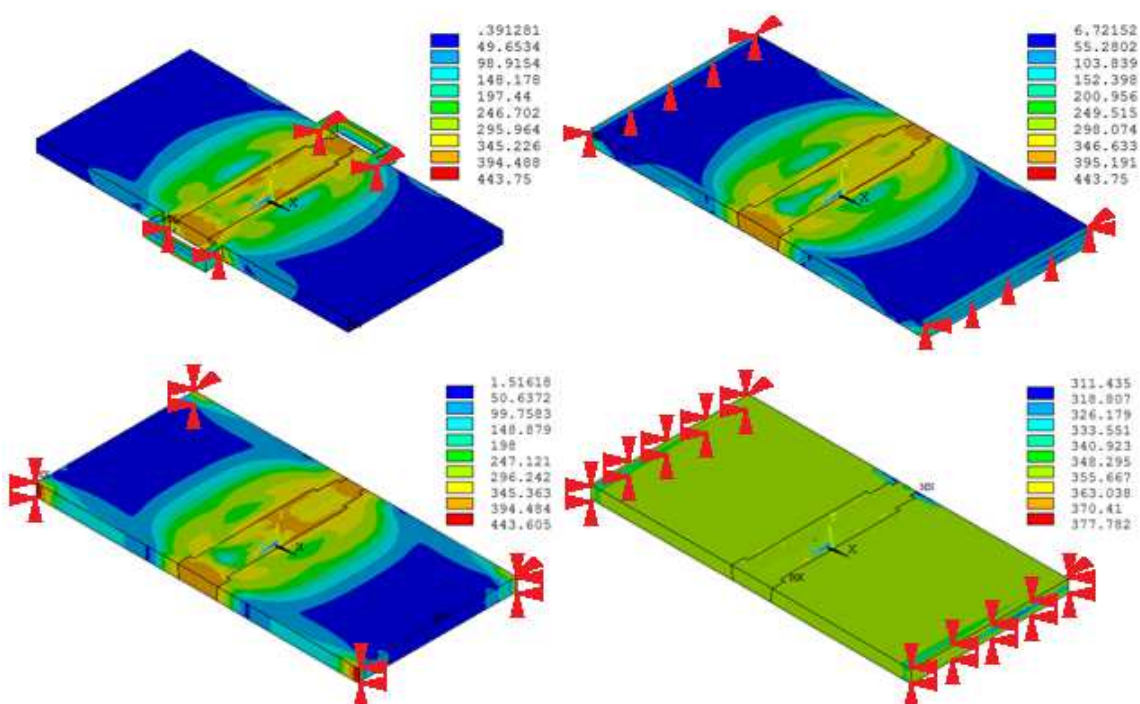
$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (24)$$

ahol: σ_1 , σ_2 , σ_3 a főfeszültségeket jelölik.



60. ábra: Von Mises feszültségek a 12. (bal fent), 20. (jobb fent), 61. (bal lent). és 600. (jobb lent) másodpercben

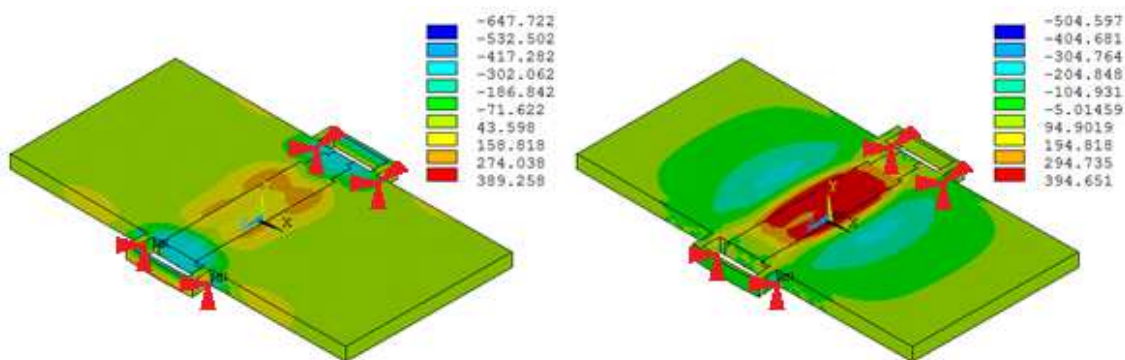
Az eredményekből látszik, hogy a feszültségcsúcsok a varrat környezetében jelentkeznek, melyek kezdetben a hőforrás környezetére összpontosulnak. A lehülés során szintén a varratszélhez közel maradnak a legnagyobb értékek, de hosszirányban egyenletesebb lesz az eloszlásuk. Jól látható a két felső ábrarészleten, hogy a varrat egy része kezdetben még inaktív, vagyis nincsen benne feszültség.



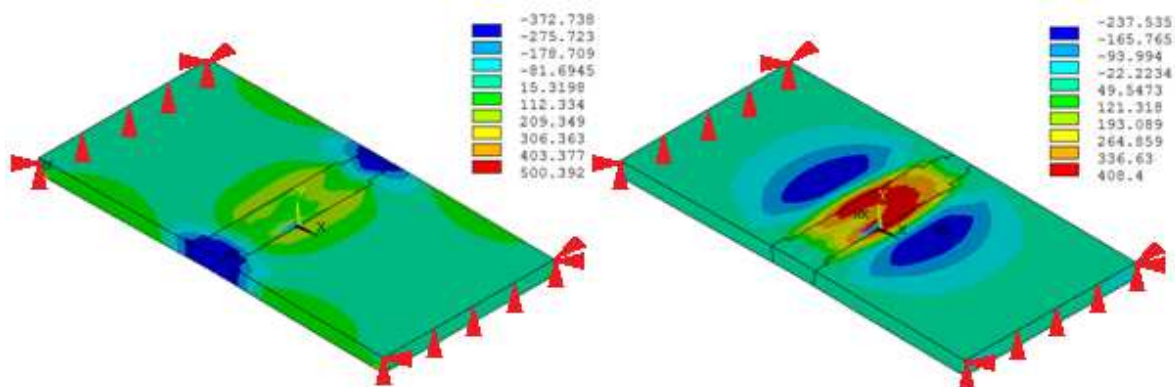
61. ábra: Von Mises feszültségek végső állapotban egysoros varratkialakításnál: lakattal összefogott lemezek esete (bal fent); csuklós megtámasztás a széleken (jobb fent); a négy sarok befogott (bal lent); a szélső élek befogottak (jobb lent)

Az egysoros varratkialakításhoz tartozó négy különböző eset *von Mises* feszültségeit az 61. ábra szemlélteti. Megfigyelhetjük, hogy *von Mises* feszültségek szempontjából az első három verzió egészen hasonló eredményeket ad és csak a szélső élein befogott lemez lóg ki a sorból. A hozzá tartozó ábra meglehetősen semmitmondónak tűnik, de ami megállapítható belőle, az az, hogy gyakorlatilag a lemez minden pontjához azonos *von Mises* feszültség tartozik (hasonló feszültségállapotban vannak).

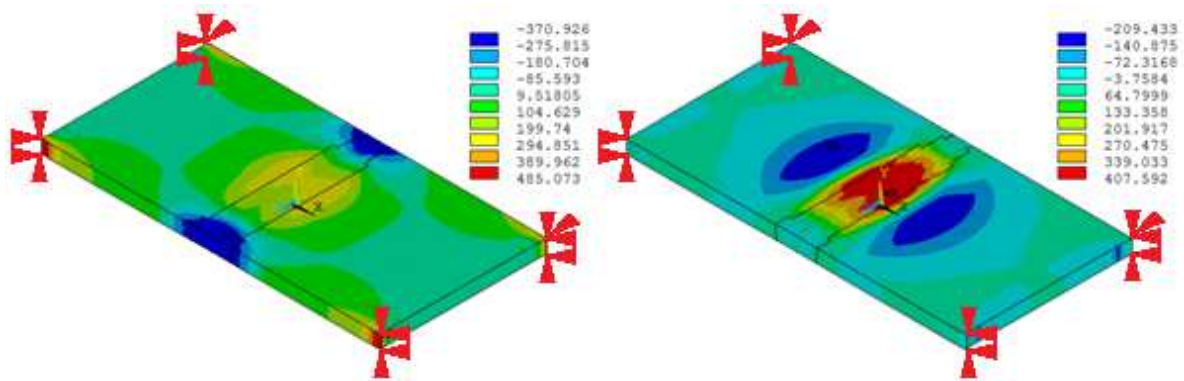
A *von Mises* feszültségnél sokkal fontosabb a hosszirányú (σ_z) és keresztirányú (σ_x) feszültségek ismerete. A modellek verifikálását ezen feszültségek laboratóriumi mérése alapján is el lehet végezni. A vizsgált eseteket a következő ábrák összegzik.



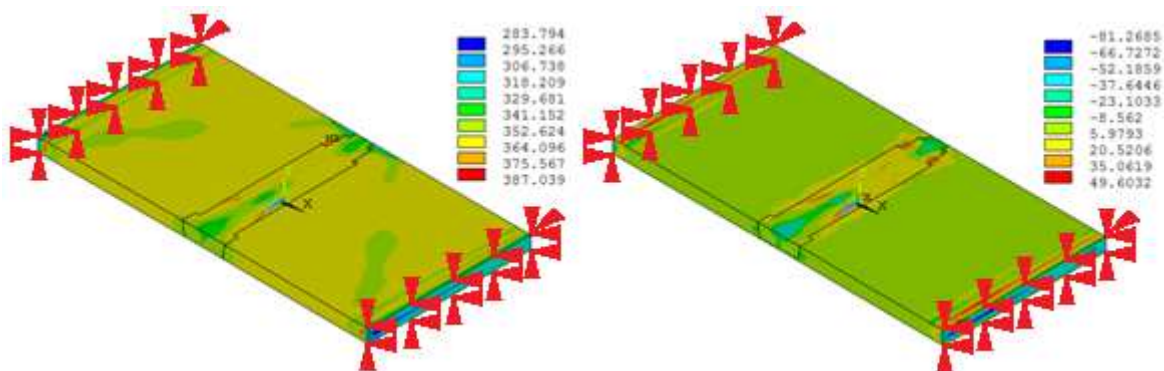
62. ábra: σ_x és σ_z feszültségek végső állapotban egysoros varratkialakításnál: lakattal összefogott lemezek esete



63. ábra: σ_x és σ_z feszültségek végső állapotban egysoros varratkialakításnál: a szélső él mentén függőleges értelemben minden csomópont meg van támasztva



64. ábra: σ_x és σ_z feszültségek végső állapotban egysoros varratkialakításnál: a négy sarok befogott

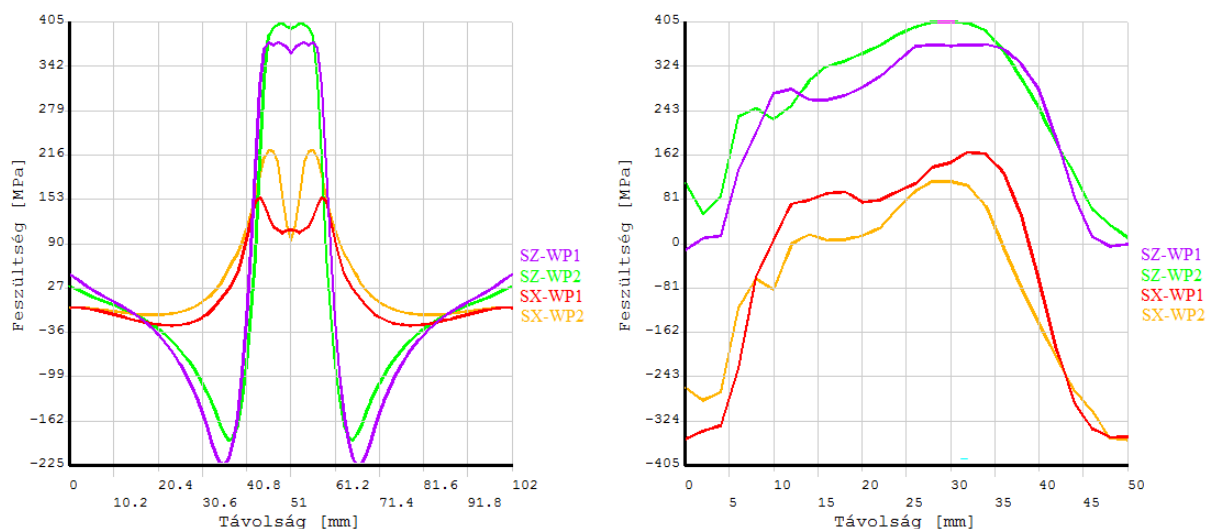


65. ábra: σ_x és σ_z feszültségek végső állapotban egysoros varratkialakításnál: a szélső élek befogottak

A kétsoros varrathoz tartozó σ_e , σ_x és σ_z ábrákat külön nem közlöm. A hosszirányú és keresztirányú feszültségeket csak az 5.5.4 pontban lévő metszeteken tüntetem fel.

5.5.4 Metszetek - feszültségek

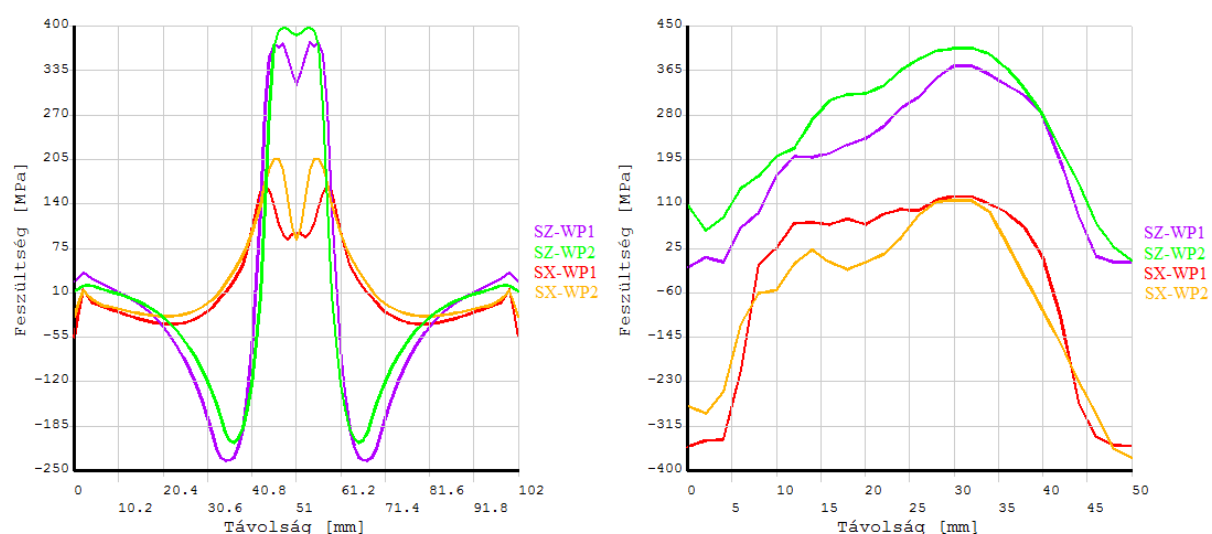
A jellegzetes helyeken, vagyis a lemez felénél keresztirányban (*PATH-1*) és a varrat szimmetriasíkján hosszirányban (*PATH-2*) a lemez felső síkján a metszetekben fellépő sajátfeszültségek σ_x és σ_z komponenseit is megadom (66. ábra-69. ábra). A metszetek $t=600$ s-hoz (*WP-1*) és $t=1200$ s-hoz (*WP-2*) tartoznak. Az első három metszet lefutása az [1] szerint közölt szimulációs, valamint tanszéki laboratóriumi mérési eredményeknek is megfelelő alakot követi.



66. ábra: σ_x és σ_z feszültségek végső állapotban (lakattal összefogott lemezek esete): keresztirányú metszet – PATH-1 (bal); hosszirányú metszet – PATH-2 (jobb)

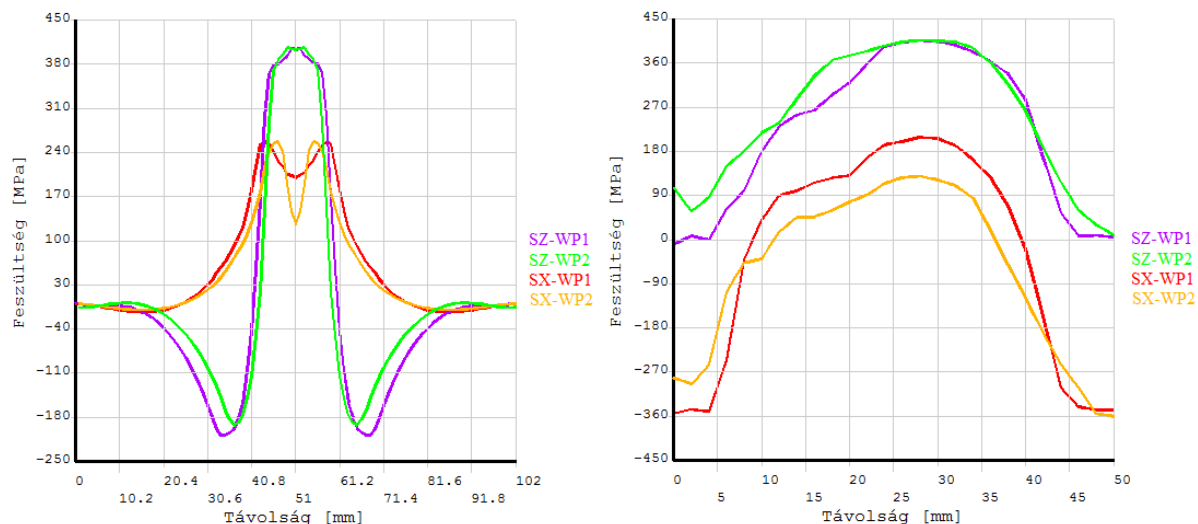
A 66. ábra szerint a hegesztés során kialakuló sajátfeszültségek meghatározásához elegendő lehet egyetlen varratsorral helyettesíteni két varratsort. Mind a görbék jellege, mind a feszültségértékek jól korrelálnak. Az ide tartozó elmozdulásoknál (59. ábra) csak a jelleg volt nagyon hasonló, az értékek között tetemes különbség volt.

A 67. ábra nagyban hasonlít az előzőekben ismertetett ábrához. Nyilván az értékekben van némi különbség, de ez nem jelentős, a görbék jellege teljesen megegyezik. Azonban ebben az esetben megfigyelhető a keresztirányú metszetenél a folytonos függőleges megtámasztásból adódó peremzavar.



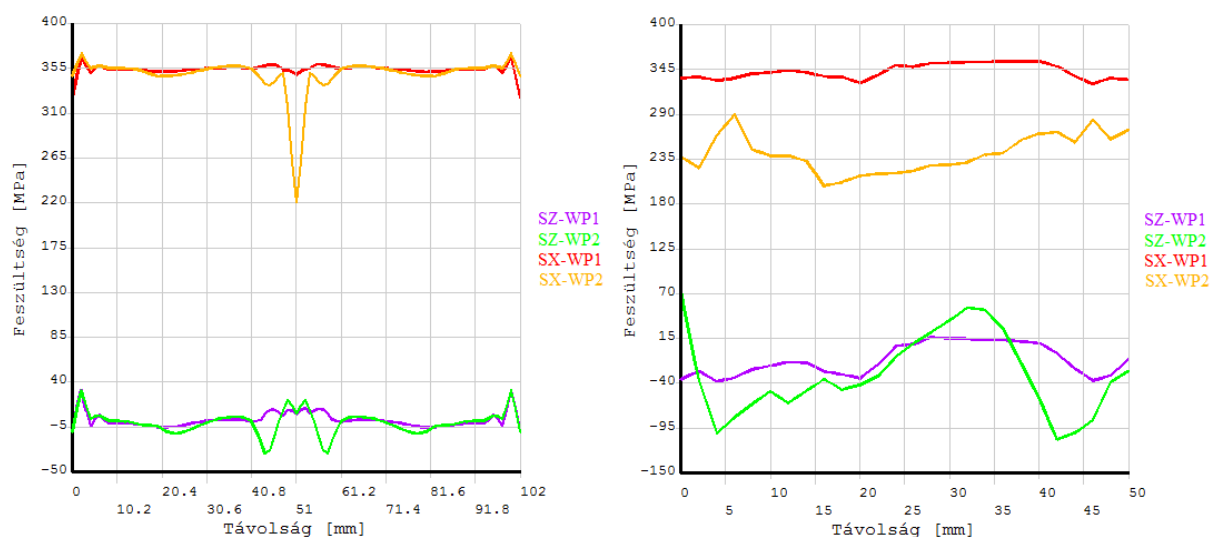
67. ábra: σ_x és σ_z feszültségek végső állapotban (a szélső él mentén függőleges értelemben minden csomópont meg van támasztva): keresztirányú metszet – PATH-1 (bal); hosszirányú metszet – PATH-2 (jobb)

A négy sarkán befogott lemez (68. ábra) pozitív feszültségei kis mértékben meghaladják az előző két esetet: σ_x keresztirányú feszültségnél a legnagyobb a különbség; σ_z hosszirányú feszültség esetén csak a varratban lévő feszültségnél van kis eltérés, a varratszegélynél kapott értékek az előzőekkel gyakorlatilag megegyeznek.



68. ábra: σ_x és σ_z feszültségek végső állapotban (a négy sarok befogott): keresztirányú metszet – PATH-1 (bal); hosszirányú metszet – PATH-2 (jobb)

A szélső élein keresztirányban befogott lemezeknél (69. ábra) a csomópontok (néhány kisebb'zavartól' eltekintve) nagyon hasonló feszültségállapotban vannak. Nem tűnik szerencsés megtámasztásnak: habár az σ_z feszültségek nagyon alacsonyak, a σ_x feszültségek a teljes lemezben magas értékeket vettek fel, nem csak a varrat környezetében. Mindegyik esetben megfigyelhető, hogy a σ_z feszültségek a varratszegélynél az S355 jelű acélra jellemző 355 MPa-os folyáshatár (f_y) és a felkeményedést is figyelembe vevő 443.75 MPa ($1.25 \cdot f_y$) között vannak.



69. ábra: σ_x és σ_z feszültségek végső állapotban (a szélső élek befogottak): keresztirányú metszet – PATH-1 (bal); hosszirányú metszet – PATH-2 (jobb)

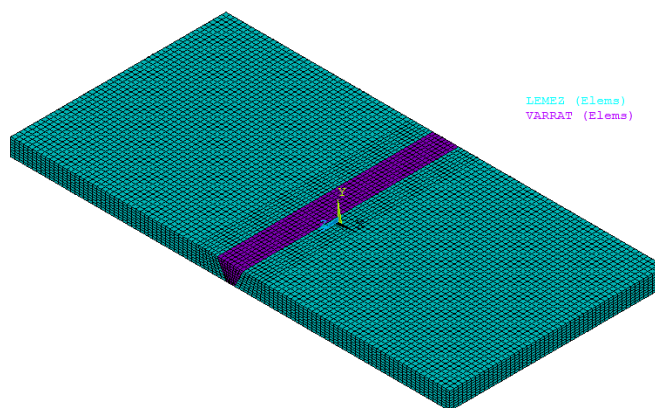
A legjobb választásnak a *négy sarkon befogott* eset tűnik. Az alakváltozások a legkisebbek (még a két varratsoros kialakításnál tapasztalt drasztikus növekedés után is), a sajátfeszültségek pedig nem kiugróak a többi esethez képest.

6 Szimuláció verifikációja és eredmények összehasonlítása

Az általam vizsgált hegesztés-szimulációs modellek termikus analízisének verifikációját az előzőekben bemutatott egysoros tompavarrattal kialakított kapcsolatra végeztem el. Az ANSYS [23] programban készült modellt egy azonos geometriával kialakított SYSWELD [33] modell eredményeivel hasonlítottam össze. Egy további Eurocode alapú modellel – mely nem vesz figyelembe fázisátalakulást – is összevetettem a kontroll modellt, megvizsgálva az anyagjellemzők hatását.

6.1 Geometria és alkalmazott elemtípus

Vizsgálatunk tárgya tehát két $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ -es, 4 mm vastag lemez tompavarrattal történő hegesztése. A varrat előkészítésére a lemezek felső élét 2 mm -rel kisebbre alakították ki, az alsó élek közt pedig ugyancsak 2 mm nagyságú rés van. A hálófelosztás a SYSWELD modellnek megfelel (70. ábra). A termikus analízisnél az eddigiekhez hasonlóan a nyolc csomópontú *SOLID70* elemtípust (ld. 4.3.3) alkalmaztam.



70. ábra: Végeselemes modell hálófelosztása

6.2 Anyagjellemzők és hegesztési paraméterek

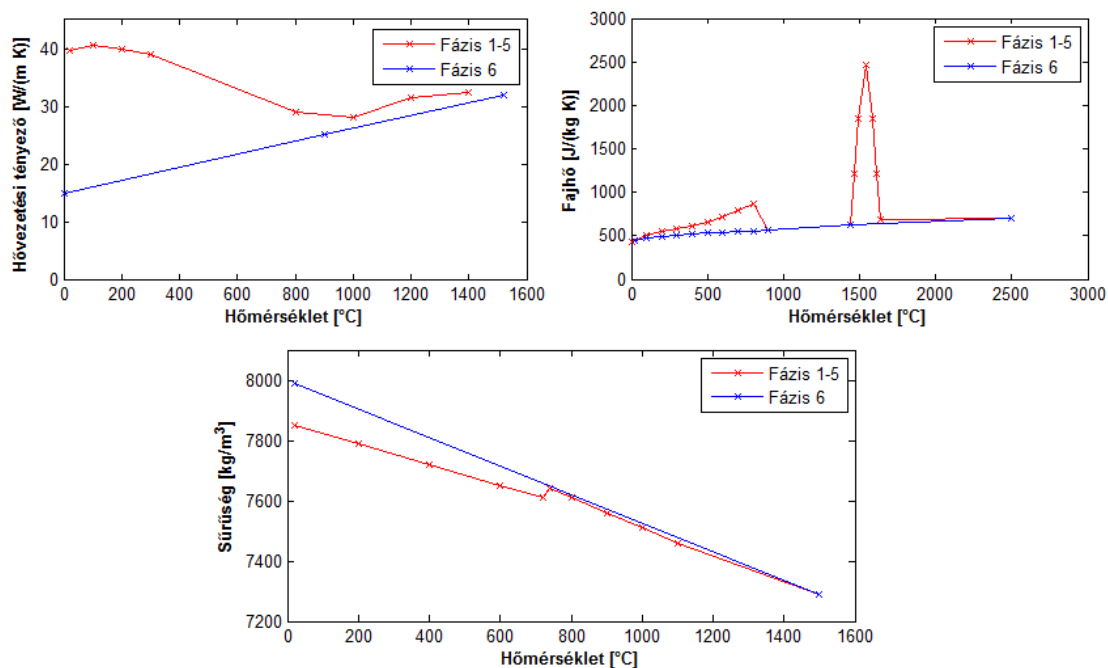
Az anyagjellemzőket a hőmérséklet függvényében a SYSWELD program beépített adatbázisa alapján adtam meg (71. ábra). A hővezetési tényezőt $4000\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ -ben maximalizálták 3000 °C -on. Mind a fajhő, mind a sűrűség konstans értékkel került a modellbe az utolsó megadott értéktől kezdve. A 4.3.2 ponthoz hasonlóan a fajhő és sűrűség helyett az

anyag entalpiáját definiáltam (az olvadás során felszabaduló látens hőt nem kellett figyelembe venni). A hőátadási tényezőt $25 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ -re, míg az emissziós tényezőt 0.8 -re vettem fel.

A program figyelembe veszi az acélon belül az egyes fázisok átalakulását és térfogati hányadát. Hat különböző lehetséges fázist különböztet meg a végelelemes program:

- 1. Ferrit (magában foglalja a perlit és cementit fázist)
- 2. Bainit
- 3. Martenzit
- 4. Hozanyag
- 5. Edzett bainit és martenzit
- 6. Ausztenit

Mivel az első öt fázis termikus anyagjellemzői azonosak, így csak az ausztenit-képződést kell vizsgálni az alapanyag és a hozanyag esetén. Az 1., 2., 3., 5. fázis egymáshoz viszonyított térfogati aránya nem fontos ennél a vizsgálatnál, hiszen a térfogati arány szerinti súlyozás során azt kapnánk, hogy egyszeres súllyal kell figyelembe venni az ezekhez tartozó anyagtulajdonságokat. Az ausztenitesedéshez két hőmérsékleti érték kapcsolható (TTA diagram alapján: 'time-temperature-austenitization'): Ac_1 és Ac_3 . Ac_1 a ferrit fázis ausztenitté alakulásának kezdeti hőmérséklete melegítés során, értéke $727^\circ C$. Az ausztenit-képződés végét az $Ac_3=867^\circ C$ jelzi, ekkorra teljes mértékben elausztenitesedett a felhevített anyag. Az átmenet a két fázis között lineárisnak tekinthető [34]. A varrat anyaga $1505^\circ C$ -on kezd átalakulni ausztenitté, $1530^\circ C$ -on pedig már teljes mértékben elausztenitesedik. [33]

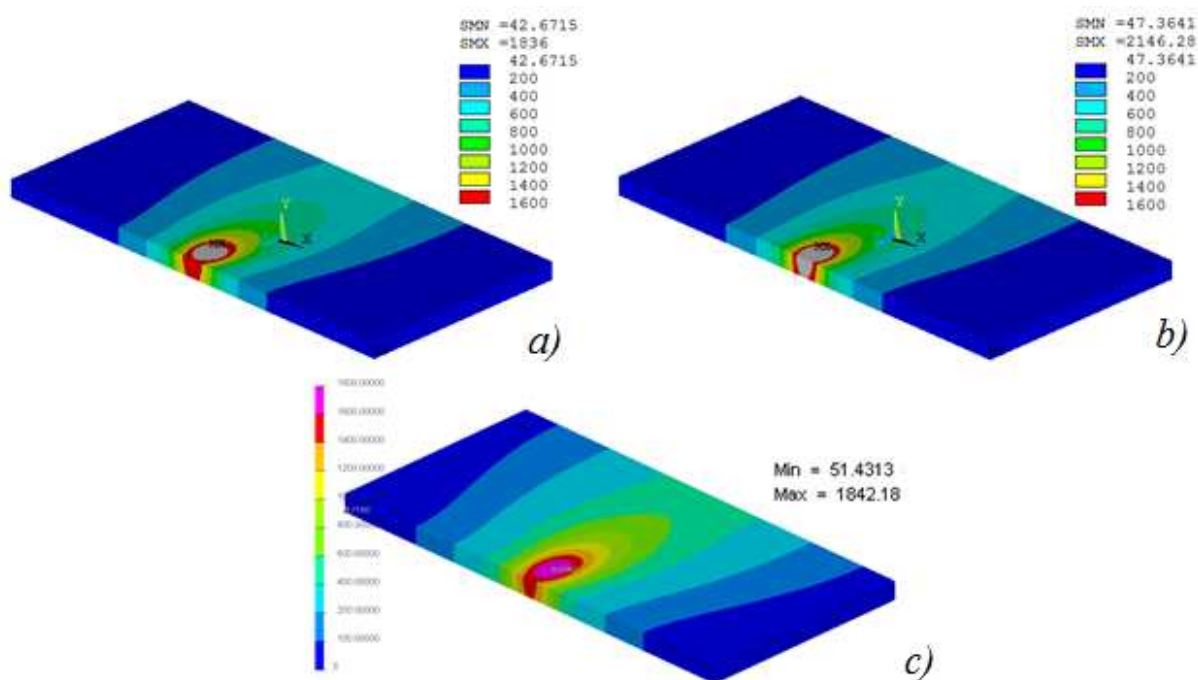


71. ábra: Anyagjellemzők SYSWELD adatbázis alapján S355 anyagra [33]

A lemezek S355 acélból (St E 43 az adatbázisban) készültek, MAG hegesztéssel összeillesztve. A hegesztés 60 A áramerősséggel és 20 V feszültséggel, 1,5 mm/s sebességgel haladt végig 33 másodperc alatt. A hegesztési és hűlési folyamat legvégét $t=600$ s jelzi. A hegesztés hatásfokát 0.87-ra vettem fel. A hőforrás paraméterei Goldak-féle jelöléssel (ld. 4.3.1) a következők: $a = 5$ mm, $b = 5$ mm, $c_f = 5$ mm, $c_r = 5$ mm, $f_f = f_r = 1$.

6.3 Termikus analízis eredményei

A termikus analízis a mechanikai analízis alapját képezi. A tranziens termikus analízis kezdetén a lemezt a $T=20$ °C-os külső hőmérsékletnek megfelelő hőmérsékletűre vettem. A két modellben azonos volt a teherlépcsők kiosztása, ez fontos része a verifikációnak, hiszen egy nemlineáris jelenségről van szó: a vizsgált időpontok kiosztása relatív értelemben jelentősen befolyásolja a kapott eredményeket (habár ez a mechanikai analízis eredményeire nincs olyan nagy hatással).

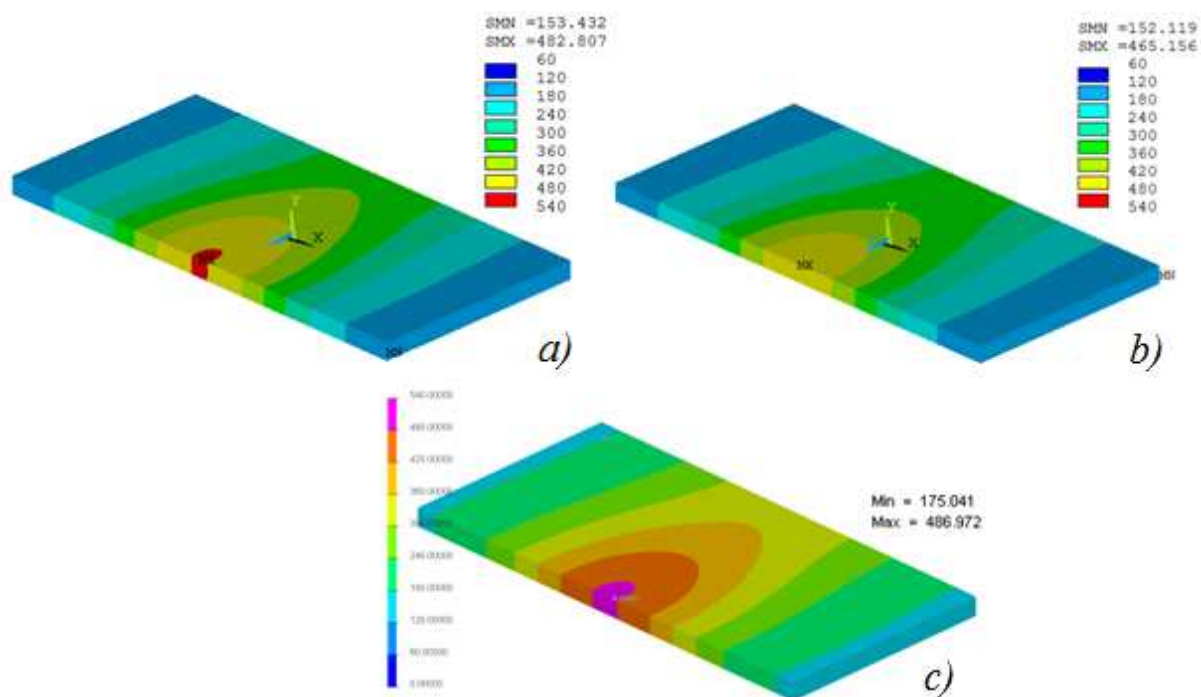


72. ábra: Hőmérsékleti mező a 31. másodpercben – a mintadarab hegesztési fázisban van:
a) SYSWELD alapú ANSYS modell; b) Eurocode alapú ANSYS modell;
c) kontrollként vizsgált SYSWELD modell

Ahogy azt a 72. ábra is mutatja, az izotermák lefutása és a csúcshőmérséklet is jó egyezést mutat a SYSWELD modellel az a) esetben. Egyik esetben 1842 °C, másik esetben 1836 °C volt a maximális hőmérséklet. Amit érdemes hozzáfűzni, hogy a c) részleten ábrázolt SYSWELD modellnél kicsit más a skálázás, mint az ANSYS modellnél. Ez a különbség a

100°C-os izoterma meglétéből, illetve hiányából adódik: ANSYS-ben a felhasználó kevesebb skálaparamétert definiálhat.

A *b)* ábrarészleten a csúcshőmérséklet viszonylag magas (2146 °C), ez elsősorban abból adódik, hogy a tűztervezéshez megadott Eurocode-os hővezetési tényezők a magasabb hőmérsékleti régiókban jóval kisebbek, mint a SYSWELD-es anyagjellemzőknél. Az 1600°C-os izotermát leszámítva a többi azonos hőmérsékletű szintvonal megfelel az ellenőrzésre kijelölt modellnek.



73. ábra: Hőmérsékleti mező a 61. másodpercben – a mintadarab lehűlési fázisban van:
a) SYSWELD alapú ANSYS modell; *b)* Eurocode alapú ANSYS modell;
c) kontrollként vizsgált SYSWELD modell

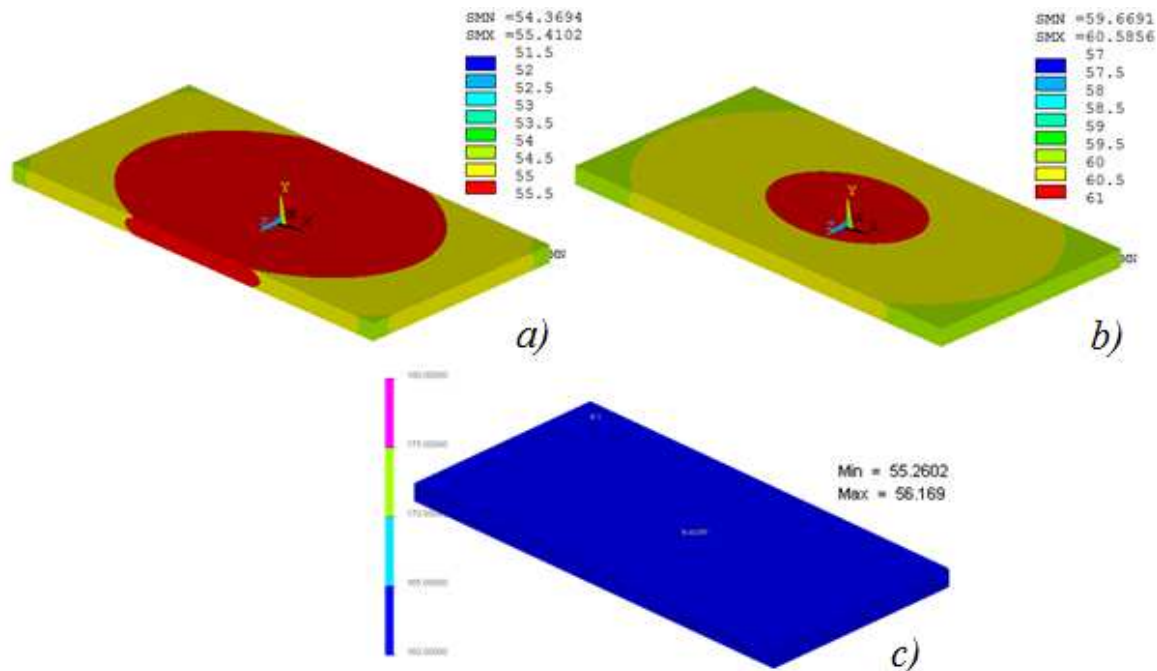
A 73. ábra szintén eleget tesz az elvártaknak, a maximális hőmérsékleti értékben sincsenek jelentős eltérések az *a)* ábrán. SYSWELD esetén 487 °C, ANSYS-nél 483 °C volt a csúcshőmérséklet. A *b)* ábra szerint az Eurocode alapú modellnél a csúcshőmérséklet kis mértékben alacsonyabb (465 °C), mint a *c)* részleten ábrázolt kontroll modell esetén. Azonos időpillanatokot vizsgállok mind a három esetben, tehát mindegyik modellnek azonos időintervallum állt rendelkezésére a visszahűlésre. Két dolgot érdemes itt megjegyezni az észlelt jelenséggel kapcsolatban:

- a sugárzás miatt minél magasabb a hőmérséklet, lokálisan annál intenzívebb a hűlési folyamat;

- az EC-s anyagjellemzők az alacsonyabb hőmérsékleti tartományban kevésbé térnek el a SYSWELD-es termikus jellemzőknél. A hővezetési tényezőben tapasztalható eltéréseknek van a legnagyobb hatása. Mivel az Eurocode-ban magasabb hővezetési tényezők tartoznak ezen hőmérsékletekhez, így a *b*) esetben könnyebben szétterjed a hő a lemezben.

A szimuláció végét jelentő $t=600$ s esetén (74. ábra) a lemez az *a*) jelű SYSWELD alapú modellemnél $55.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra hűlt le a kontrollként használt SYSWELD-es $56.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal szemben. A *b*) részleten lévő EC alapú modell a felsoroltaktól alig eltérően $60.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra hűlt le. (Megjegyzés: Mivel gyakorlatilag a lemez minden pontja azonos hőmérsékletű, így az említett értékek a csúcshőmérsékletre vonatkoznak. A *c*) ábrán látható hőmérsékleti mező sajnos rossz hőmérsékleti skálát alkalmaz, de a maximális és minimális hőmérsékletből kiderül, hogy az izotermákhoz tartozó értékek a lemez széle felé csökkennek.)

A bemutatott ábrák alapján az általam szimulált hőmérsékleti analízis jól korrelál a kontroll modell eredményeivel, vagyis ezek alapján a termikus analízishez tartozó modelleket verifikáltam.



74. ábra: Hőmérsékleti mező a 600. másodpercben – a mintadarab lehűlési fázisban van:
a) SYSWELD alapú ANSYS modell; b) Eurocode alapú ANSYS modell;
c) kontrollként vizsgált SYSWELD modell

7 Konklúziók és további kutatási lehetőségek

A végeselemes szimulációból kiderült, hogy az ANSYS program alkalmazható hegesztésszimuláció elvégzésére. A *termikus analízis* során mind a *hővezetés*, mind a *sugárzás* jelenségét figyelembe vettem. A hőmérsékleti analízis stabil futása szempontjából a legfontosabb az entalpia fogalmának bevezetése volt. A *fajhő* gyors változása mellett az *olvadáshő* is kényelmesen figyelembe vehető ezzel az anyagjellemzővel. A hőforrást *Goldak*-féle paraméterekkel adtam meg, mely lehetőséget nyújt egy elülső és hátsó ellipszoid megadására, így pontosítva a hőforrás leírását. A termikus analízis hőmérsékleti mezőit a *mechanikai analízis* során hőmérsékleti teherként működtettem. *Nem kapcsolt analízist* végeztem, hiszen az általam vizsgált ívhegesztés során nem kell nagy hőfejlődésre számítani plasztikus nyúlások vagy súrlódó felületek miatt. A tranziens hőmérsékleti és a szerkezeti analízis során megadott anyagjellemzőket az *Eurocode* szabvány [20] szerint vettem fel. A hőmérséklet időbeli változása hegesztés során nyilván sokkal gyorsabb, mint egy tüzesetnél. Erre vonatkozó részei azonban egyelőre még nincsenek a szabványnak, de számításaink és több nemzetközi cikk is azt bizonyítja, hogy a tűztervezéshez megadott jellemzők alkalmasak ilyen jellegű vizsgálatokhoz. A mechanikai analízisnél a kialakuló sajátdeformációk és sajátfeszültségek kiértékelését végeztem el.

Az acél egyes fázisai jelentősen eltérő mechanikai anyagjellemzőkkel bírnak, így a termikus analízistől eltérően szükség van a közeljövőben egy olyan ANSYS kód kifejlesztésére, amellyel figyelembe tudjuk venni a fázisok egymáshoz viszonyított térfogati arányát. Így a SYSWELD-ben kapott deformáció és feszültség eredmények is verifikálhatóak lesznek. Továbbá szeretnék bonyolultabb kapcsolatokat modellezni, legyen szó egy többszörösen merevített lemezmezőről vagy akár egy hengerelt I-szelvény hegesztett homloklemez kapcsolatról. A jövőben stabilitásvizsgálat során szeretném a gyártásból adódó 'pontos' sajátdeformációs alakot figyelembe venni, és ezt összehasonlítani a szabvány által előírt kezdeti imperfekciókkal terhelt szerkezetekkel. Terveim között szerepel az ISM módszer alkalmazása, valamint fáradásvizsgálat elvégzése egy hegesztett kapcsolatra.

8 Szakirodalom

- [1] A. ANCA, A. CARDONA, V.D. FACHINOTTI: Finite Element modeling of welded joints, In A. CARDONA, M. STORTI, C. ZUPPA, editors, *Mecánica Computacional*, Volume XXVII, p. 1445-1470, 2008
- [2] D. RADAJ: Welding residual stresses and distortion: Calculation and measurement, *DVSVerlag*, 2003
- [3] BÉRES L., CZITÁN G., GÁTI L., GREMSPERGER L., KOVÁCS M.: Hegesztési zsebkönyv, *Cokom Mérnökiroda Kft.*, 1996
- [4] BACZOVSZKI R.: Hegesztés numerikus modellezése, MSc diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidak és Szerkezetek Tanszék, 2013
- [5] NÉZŐ J.: Virtual Fabrication of Full Size Welded Steel Plate Girder Specimens, PhD thesis, Heriot-Watt University School of Engineering and Physical Sciences, 2011
- [6] NÉMETH GY.: Hegesztési alakváltozások és sajátfeszültségek, Szerkezetépítés II. előadásdió, Széchenyi István Egyetem, Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszék, 2011
- [7] D. STAMENKOVIC, I. VASOVIC: Finite Element Analysis of Residual Stress in Butt Welding Two Similar Plates, *Scientific Technical Review*, Volume LIX, No.1, p. 57-60, 2009
- [8] A. CAPRICCIOLI, P. FROSI: Multipurpose ANSYS FE procedure for welding processes simulation, *Fusion Eng. Des.*, 2009
- [9] N. SYAHRONI, M. I. P. HIDAYAT: 3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stresses and Distortions, In M. ANDRIYCHUK, editor, *Numerical Simulation - From Theory to Industry*, 24:583-606, 2012
- [10] Y. SUN, H. LI, X. WANG: Finite element analysis on welding residual stresses of welded box column, *Journal of Engineering and Technology*, Volume 1 (3), p. 57-61, 2011
- [11] M. RHODIN: Calculation of Welding Deformations in a Pipe Flange, Master's thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012
- [12] N. VISNIAKOV, D. SCEKATUROVIENE, O. CERNASEJUS: Modelling of thermal processes in a dissymmetrical welded cast aluminium designs, *4th International DAAAM Conference*, Tallinn, Estonia, 29 - 30th April 2004, p. 223-226, 2004
- [13] C. SIMION, C. MANU, S. BASET, J. MILLARD: Distortions Generated by Welding Process Using ANSYS-FEA, *2006 International ANSYS Conference*, 2-4th May 2006
- [14] PAPP S.: Milyen erőművet építsünk?, *Fizikai Szemle*, 1992/4, XLII. évfolyam, p. 144, 1992
- [15] D.B. ARAÚJO, P.R.F. TEIXEIRA, L.A.B. CUNDA: Applicability of the Gaussian distribution heat source model to the thermal simulation of welding processes, *22nd*

International Congress of Mechanical Engineering COBEM 2013, Ribeirão Preto, SP, Brazil, November 3-7 2013, ISSN 2176-5480, p. 10023-10032, 2013

[16] ÁDÁNY S., DULÁCSKA E., DUNAI L., FERNEZELYI S., HORVÁTH L.: Acélszerkezetek, 1. Általános eljárások, Tervezés az Eurocode alapján, *Business Media Magyarország Kft.*, 2. kiadás, 2007

[17] FE modeling & simulation of GTAW process of thin-walled structure for circumferential welding, *Expert System for Optimization of Welding Process of Thin Walled HSLA Steel Structures, Chapter 4*, p. 99-140

[18] T. PADMAKUMARI, S. VENKATASAIRAM: Finite Element Analysis of EBW Welded Joint Using SYSWELD, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 3 (2), p. 335-340, 2013

[19] J.-M. CHEN, H. LU, J.-H. WANG, W.-X. CHEN, D.-J. HAO: Prediction of Welding Deformation With Inherent Strain Method Based On FEM, *10th International ANSYS Conference and Exposition*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 22-24th April 2002

[20] ENV - 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.2 : General rules, Structural fire design, 2001

[21] G. E. TOTTE: Steel Heat Treatment – Metallurgy and Technologies, *Taylor & Francis Group and CRC Press*, Second Edition, 2007

[22] A. M. MALIK, E. M. QUERESHI, N. U. DAR, I. KHAN: Analysis of circumferentially arc welded thin-walled cylinders to investigate the residual stress fields, *Thin-Walled Structures* 46, p. 1391-1401, 2008

[23] ANSYS 14.0, ANSYS Inc.

[24] C. RONTESCU, I. VOICULESCU, G. IACOBESCU, C. DUMITRAȘCU, D.-T. CICIC: Analysis of the thermal field for TIG welding by using infrared thermography, *U.P.B. Sci. Bull.*, Series D, Vol. 70, No. 3, 2008

[25] B. A. B. ANDERSSON: Thermal stresses in a submerged-arc welded joint considering phase transformations, *ASME Journal of Engineering Materials and Technology* 100, p. 356-362, 1978

[26] J. A. GOLDAK, M. AKHLAGHI: Computational Welding Mechanics, *Spronger Science + Business Media, Inc.*, 2005

[27] E.A. BONIFAZ: Finite Element Analysis of Heat Flow in Single-Pass Arc Welds, *Welding Research Supplement*, 2000 May, p. 121s-125s

[28] Wikipedia – The Free Encyclopedia, *View factor* [Online], Elérhető: <http://upload.wikim>

edia.org/wikipedia/en/4/42/View_factor_two_differential_areas_illustration.svg [Letöltve: 2014. 10. 12.]

[29] R. SILVA: Direct Coupled Thermal-Structural Analysis in ANSYS WorkBench, 2013 *ESSS Conference & ANSYS Users Meeting*, Atibaia, SP, Brazil, 23-25th April 2013

[30] L. E. LINDGREN: Finite element modeling and simulation of welding, Part 2: Improved material modeling, *J. Thermal Stresses*, 24(3):195–231, 2001

[31] M. FRANCIS, S. RAHMAN: Probabilistic analysis of weld cracks in center-cracked tension specimens, *Computers and Structures*, 76:483–506, 2000

[32] P. CHANG, T. TENG: Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints, *Computational Materials Science*, 29(4):511–522, 2004

[33] SYSWELD, ESI Group

[34] T. WU, M. CORET, A. COMBESCURE: Numerical simulation of welding induced damage and residual stress of martensitic steel 15-5PH, *International Journal of Solids and Structures*, 45:4973–4989, 2008