



MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Kettős-fázisú (DP) acélok AWI hegesztésének végelelemes modellezése

Vékony Sándor
II. éves MSc szintű gépészmérnök hallgató

Konzulens:
Gáspár Marcell
PhD hallgató
Prém László
PhD hallgató
Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet

Miskolc, 2013

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3
2.	DP 600 acél és hegeszthetősége.....	5
2.1.	Járműiparban alkalmazott acélok	5
2.1.1	Korszerű nagyszilárdságú acélok.....	6
2.1.2	Második és harmadik generációs korszerű nagyszilárdságú acélok	7
2.2.	DP acélok előállítása és jellemzői.....	9
2.3.	DP acélok hegeszthetősége	11
2.4.	DP acélok alkalmazása	12
3.	Ívhegesztési folyamatok végelelemes modellezése.....	14
3.1.	Hegesztési jelenségek végelelemes modellezése.....	14
3.2.	SYSWELD programcsomag	18
4.	Modellezési feladat összeállítása	20
4.1.	Geometriai modell elkészítése	20
4.2.	Hegesztési paraméterek megadása	21
4.2.1	A kísérlet alapanyaga	21
4.3.	Modellezés eredményei.....	24
4.3.1	Hőforrás	24
4.3.2	Szövetszerkezet.....	25
4.3.3	Maradó feszültség	27
5.	Modellezés eredményeinek összehasonlítása a hegesztési kísérlettel	29
5.1.	Hőmérsékletmező.....	29
5.2.	Keménységeloszlás	30
5.3.	Deformáció.....	32
6.	Összefoglalás	34
7.	Köszönetnyilvánítás	34
8.	Irodalomjegyzék	35

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt körülbelül húsz év egyik legnagyobb törekvése a környezetünk védelme, melynek egyik területe az üvegházhatást okozó gázok csökkentése. Az üvegház gázok kibocsátásához az egyre növekvő számú közlekedési eszközök nagymértékben hozzájárulnak, ezért egyre szigorúbb környezetvédelmi előírások születtek. Emiatt a nagy autógyárak olyan konstrukciókat terveznek, amelyek kevesebb károsanyagot bocsátanak ki a levegőbe.

Mivel az autógyártók a jelenleg elfogadott konstrukciók (Otto-motor, Dízel-motor) határait feszegetik, ezért a kevesebb károsanyag-kibocsátás érdekében olyan új konstrukciókkal rukkolnak elő, mint például a hibrid-hajtás, vagy a start-stop rendszer. Ám ezek is csak átmeneti megoldások, hiszen a lényegi konstrukción nem változtatnak.

Egy további lehetősége a kisebb üzemanyag-felhasználásnak a járművek tömegének a csökkentése. Mivel a járműipar elsősorban acéllemezeket használ fel a karosszériaelemek gyártásához, ezért a probléma erre a területre koncentrálódik. A hagyományos lágyacélt az autók saját tömegük csökkentése céljából igyekeznek felváltani könnyebb anyagokra. Az acéllemez nagy sűrűsége miatt az egyik módszer az acél felváltása más anyagokra, így például alumíniumra, magnéziumra, titán-ötvözetekre vagy polimerekre, de ez a tömeggyártásban az árak miatt kevésbé elterjedt módszer. Mivel az acél mind máig a legolcsóbb alapanyaga a karosszériaelemeknek, ezért a másik megoldás az acéllemezek fejlesztése. Ez annál is inkább fontos, hiszen a tömegcsökkentés mellett az emberi élet védelme is egyre nagyobb szerepet kap, tehát a törésteszték során az autókba beépített alapanyagokkal szemben egyre szigorúbb szilárdsági követelményeket támasztanak. Az autóiipari acéllemezek fejlesztése így az egyre nagyobb szilárdságú lemezek alkalmazása felé tolódott el. Egyike ezen nagyszilárdságú acéloknak az ún. kettős fázisú (DP) acéllemezek, melyeket dolgozatomban kísérleteihez használtam fel, azon belül is a DP 600 jelű acéllemezeket.

Mint tudjuk, az acéllemez még csak alapanyag, ahhoz hogy abból például egy „B-oszlop” legyen, egy sor műveleten kell átesnie. Ezen elemeknek a legfontosabb alakítási technológiája a képlékeny hidegalakítás, míg legfontosabb kötőeljárásai az ömlesztő hegesztések és az ellenállás-ponthegesztés. A DP acélok ömlesztő- és sajtoló hegesztő eljárásokkal

egyaránt hegeszthetőek. A lágy ferrit a jó alakíthatóságot, míg a viszonylag kemény martensit a szilárdságot biztosítja. A DP acélok hegesztéstechnológiájának tervezésekor mindenképpen figyelembe kell venni az alapanyag martensit- és ötvözőtartalmát.

Dolgozatomban a technológiatervezés hegesztéstechnológia tervezésére szűkül, hiszen tudjuk, hogy a technológiák körében a hegesztés sajátos helyet foglal el, mert a hegesztett termék tulajdonságai, minősége, így megbízhatósága is vagy egyáltalán nem, vagy csak nagyon költséges vizsgálatokkal állapítható meg.

A költséges vizsgálatok csökkentése érdekében előtérbe került a tervezésben a végeselemes modellezés. Mára már a számítástechnika fejlődése révén a hétköznapi számítógépeken is pár óra alatt képesek vagyunk egy szimuláció lefuttatására, és az eredmények kimutatására. A hegesztés modellezése szempontjából több célrendszer is rendelkezésünkre áll, dolgozatomban az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetben elérhető SYSWELD programcsomag segítségével a VISUAL ENVIRONMENT tervezőkörnyezetben készítettem el a DP acélok AWI hegesztésének szimulációit. A Hegesztő Laboratóriumban a modellezés során beállított paraméterek alkalmazásával valós hegesztési kísérleteket is végeztem.

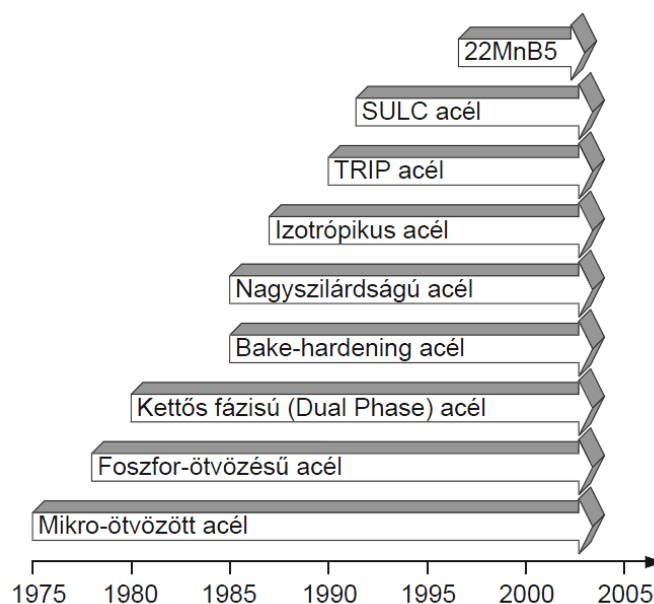
Dolgozatom célja ezért a VISUAL ENVIRONMENT bemutatásán túl a szimuláció összehasonlítása volt valós hegesztési kísérletekkel, ezáltal bizonyítva, hogy a számítógépes szimuláció mennyire fedi a valóságot, vagyis mennyire alkalmazható a kísérletek, és próbahegesztések helyettesítésére [1].

2. DP 600 ACÉL ÉS HEGESZTHETŐSÉGE

2.1. Járműiparban alkalmazott acélok

Ahhoz, hogy megértsük a DP acélok jelentőségét és kifejlesztésének okát, szükségszerűnek tartom bemutatni a járműiparban alkalmazott különböző acélokat.

Elsősorban az üzemanyagárak rohamos növekedése, később a környezetszennyezés csökkentése arra ösztönözték az autógyárakat, hogy az üzemanyag fogyasztáson csökkentsenek. Ezt az újabb konstrukciók kifejlesztésén túl a járművek sajáttömegének csökkentésével tudták elérni. A kisebb sajáttömeget pedig az acéllemezek súlyának csökkentésével tudták elérni. Az, hogy milyen módon csökkentették és csökkentik a felhasznált acéllemezek tömegét, rengeteg tényezőtől függ. Ilyen tényezők a jármű kategóriája, és az előállítandó mennyiség nagysága. Ezért két fejlesztési irány létezik. Az egyik a drágább anyagok, alumínium ötvözetek, karbonszál erősítéses kompozit anyagok (CFK), kis sűrűségű magnézium ötvözetek stb. alkalmazásán és fejlesztésén alapszik. Míg a másik és egyben nagyobb jelentőségű, az acél, mint olcsóbb alapanyag fejlesztésén alapul.

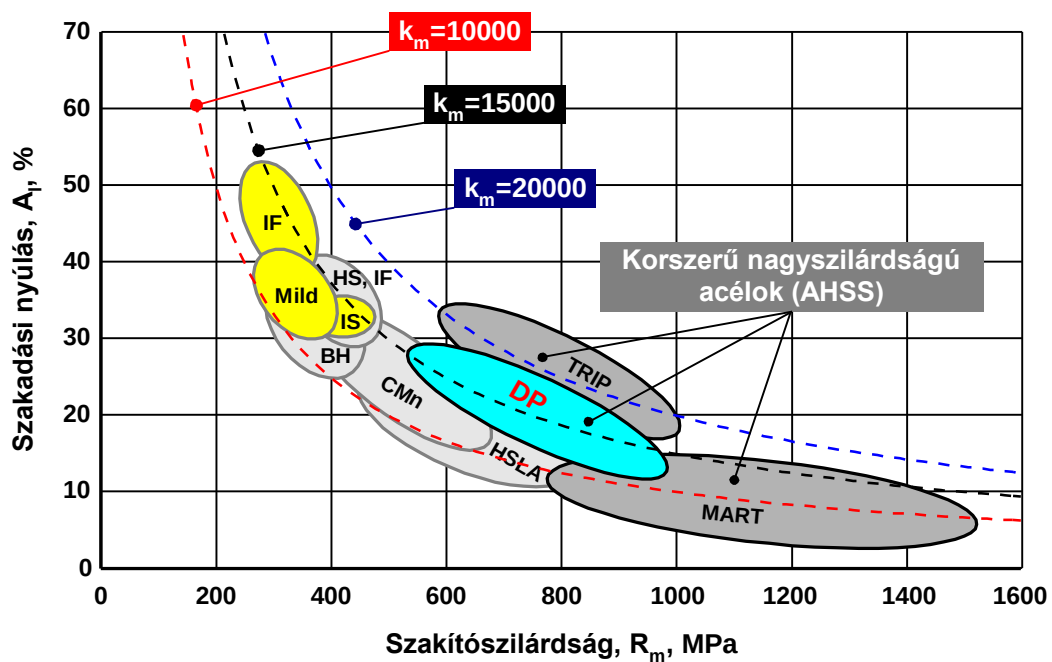


1. ábra Acélfejlesztési eredmények az autóiipari lemezanyagok területén

Az 1970-es évektől kezdődő acélfejlesztések idő diagramját az 1. ábra mutatja. Jól látható, hogy körülbelül 5 évente egy-egy újabb acéltípus jelent meg, természetesen a korábbiakat korszerűsítve, ezek a fejlesztések nagy hatással voltak a technológia fejlődésére is, elsősorban az autóiipari acéllemezek alakítási technológiájára [2].

2.1.1 Korszerű nagyszilárdságú acélok

Egy másik aspektusban láthatjuk a hagyományos kis- és nagyszilárdságú acélok (*Conventional Low- and High Strength Steels*) fejlesztését a 2. ábrán, amely a szakítószilárdság-fajlagos nyúlás ($R_m \times A_5$) kapcsolatot mutatja.



2. ábra A hagyományos lágyacélok és a korszerű nagyszilárdságú acélok (AHSS) a szakadási nyúlás- szakítószilárdság diagramban

A 2. ábrából jól látható, hogy a két tengely értékei közt hiperbolikus összefüggés van, jelen esetben a szilárdság növelésével az alakváltozó képesség hiperbolikus összefüggés szerint csökken. A hiperbola konstansát a szakítószilárdság MPa-ban kifejezett értéke és a fajlagos nyúlás százalékban kifejezett értékének szorzata adja. A 2. ábrából jól látható, hogy a ma már inkább kis- és közepes szilárdságú acélok (beleértve a HSLA-High Strength Low Alloyed, nevében nagyszilárdságú, gyengén ötvözött acélokat is) konstans értéke $k_m = 10000$. A kettős-fázisú (DP) acélok hiperbola konstansa $k_m = 15000$, míg a klasszikus TRIP acéloké $k_m = 20000$. Ezen

anyagfejlesztések voltak nagy jelentőséggel a kisebb fogyasztású személygépkocsik megjelenésére [2].

A 2. ábrán látható acéltípusok a mára hagyományosnak mondható autóiipari acélok, melyeket csupán a rövidítések kifejtése végett szeretnék felsorolni:

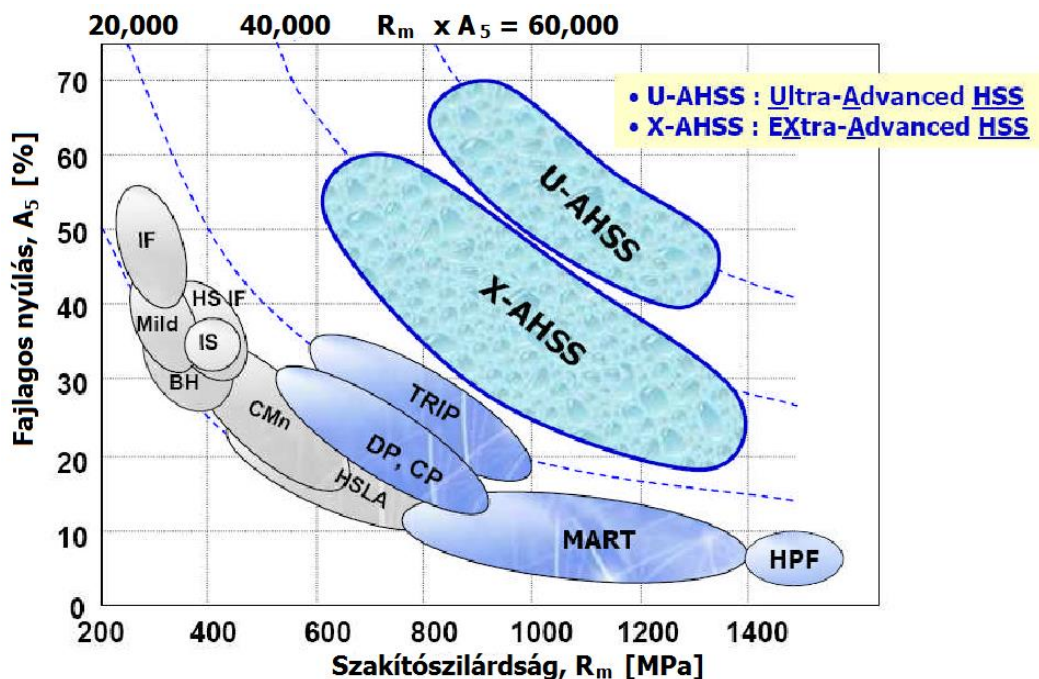
- Mild steels – Hagományos lágyacélok;
- IF steels – Interstíció mentes acélok;
- Bake Hardening steels – Festés utáni kiégetés során kiválóan keményedő acélok;
- IS steels – Izotropikus acélok;
- HSLA steels – Nagyszilárdságú gyengén ötvözött acélok;
- Dual Phase (DP) steels – Kettős-fázisú acélok;
- TRIP steels – Fázisátalakulással indukált képlékenység, TRIP acélok;
- MS steels – Martensites acélok [2].

A hagyományos AHSS acélokat (DP, CP; MART/CP; TRIP) bizonyos szakirodalmak korszerű nagyszilárdságú acéloknak is neveznek. A hagyományos megnevezésre a [2] szakirodalomban találtam. Mindkét megnevezést helytállónak találom, de hogy jobban megértsük a következő fejezetet, szeretném mégis korszerű nagyszilárdságú acéloknak nevezni ezen acélokat.

2.1.2 Második és harmadik generációs korszerű nagyszilárdságú acélok

A valódi korszerű nagyszilárdságú acélokat a 3. ábra szemlélteti, kiegészítve a 2. ábra diagramját. A második generációs korszerű nagyszilárdságú acélok (X-AHSS; Extra-Advanced High Strength Steels, azaz Extra korszerű nagyszilárdságú acélok) a $k_m = 40000$ -es konstans értéknél található halmazban helyezkednek el, míg a harmadik generációs korszerű nagyszilárdságú acélok (U-AHSS; Ultra-Advanced High Strength Steels, azaz Ultra korszerű nagyszilárdságú acélok) a $k_m = 60000$ -es konstans értéknél található halmazban. Ezen acélcsoportok az „elsőgenerációs” korszerű acéloknál kétszeres vagy akár háromszoros alakváltozó képességgel bírnak, nem mellesleg akár nagyobb szilárdság mellett. Ennek a szinte elképzelhetetlen

nagy képlékenységek az eléréséhez szükség volt a XXI. századi elméleti felfedezésekre és acélgyártási innovációkra [3].



3. ábra A szakítószilárdság-fajlagos nyúlás kapcsolata az X-AHSS és az U-AHSS acélokra

Akárcsak a „hagyományos” nagyszilárdságú acéloknál, úgy az újgenerációs nagyszilárdságú acéloknál is szeretném felsorolni típusait.

X-AHSS acélok

A TRIP acélok továbbfejlesztett változatai, három fő típusuk ismert:

- FB-TRIP steels – Ferrit bainites TRIP acélok;
- SB-TRIP steels – Szuper bainites TRIP acélok;
- M-TRIP steels – Martensites TRIP acélok.

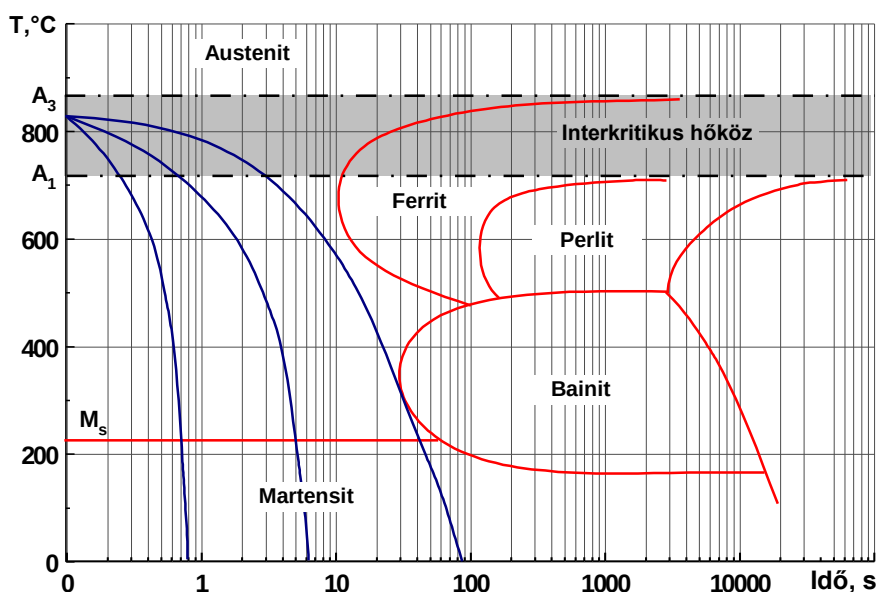
U-AHSS acélok

A mai acélfejlesztések csúcán az U-AHSS acélok állnak, melyeknek legjelesebb képviselője a TWIP (Twinning Induced Plasticity), azaz ikerképződéses képlékenységgel rendelkező TWIP acélok [2].

2.2. DP acélok előállítása és jellemzői

A DP acélok, mint a nevében is benne van, kettős-fázisú acélok. E két fázis a ferrit és a martensit. A martensit szigetek formájában helyezkedik el a ferrit mátrixban. A két fázis arányával a DP acélok tulajdonságai tág határok között változtathatók.

Általában folyamatos hőkezeléssel (áthúzó kemencében, vagy sófürdőben) állítják elő, vagy a meleg hengerlést követő szabályozott lehűléssel is hőkezelhetők. A DP acélok általános előállítását, továbbá a TRIP acélok előállítását láthatjuk a 4. ábrán [2].

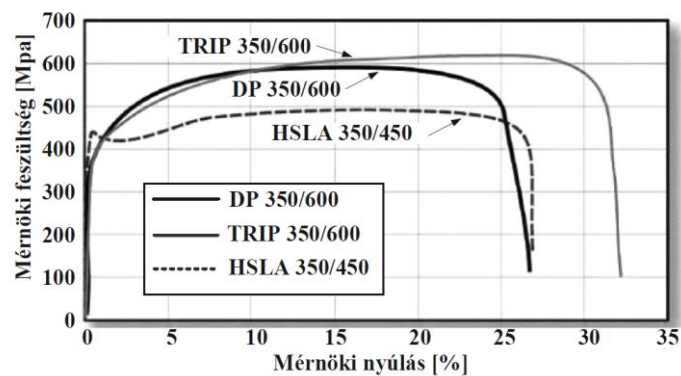


4. ábra DP acélok előállítása részleges austenitesítéssel és különböző hűtési sebességekkel

A hőkezelések során a különbözőséget az adja a hagyományos martensit előállításához képest (homogén austenites mezőből), hogy itt az ún. interkritikus hőmérsékleten, azaz az $\alpha + \gamma$ mezőben alakítják ki a kívánt ferrit/austenit fázisarányt. Ebből következően a legnagyobb eltérést az acél normális edzéséhez képest az jelenti, hogy az austenit kristallitokat edzés előtt ferrit veszi körül. A martensit keletkezésével együtt járó fajtérfogatnövekedés, a ferritben — elsősorban a keletkező martensit-szigetekkel szomszédos tartományokban — képlékeny alakváltozást okoz. Ennek következtében a

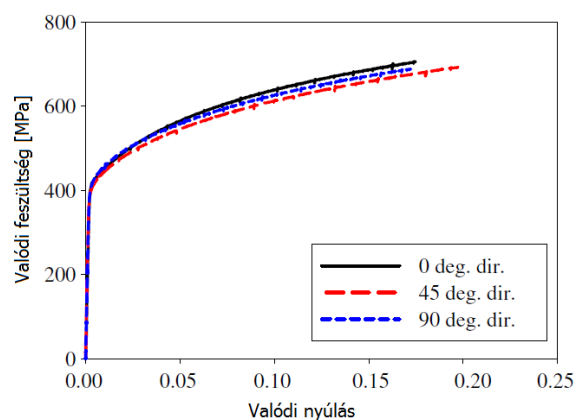
ferritben a diszlokáció sűrűség jelentősen megnő. Legnagyobb az α -martensit fázishatár közelében, és attól távolodva csökken [2, 4].

A DP acélok jellemzői a fentebb említett előállításuk alapján: szövetszerkezetük lágy, jól alakíthatóak a ferritbe ágyazott diszperz eloszlású martensit szigetek miatt. A martensit mennyisége általában 20...70 % körüli. A nagy szakítószilárdságuk mellett nagyon jók a képlékenységi mutatói is. Ezt az 5. ábra is alátámasztja.



5. ábra DP 350/600, HSLA 350/450 és TRIP 350/600 acélok szakítódíagramjai

Az 5. ábra alapján láthatjuk, hogy a DP acéloknak nincs kifejezett folyáshatár, szakítódíagramjuk folytonos, alakítási keményedési kitevőjük meglehetősen nagy, ami a jelentős egyenletes nyúlásra utal. Mechanikai tulajdonságait kismértékű anizotrópia jellemzi. Ezt a 6. ábra is alátámasztja, mely egy tanulmány során készült el, amely tanulmányban DP 590-es acél hegesztését kívánták megvizsgálni. Ennek egyike volt az alapanyag anizotrópiájának vizsgálata.



6. ábra DP 590 acél keményedése hengerlési irányban (0 deg. dir.), 45°-os szög alatt (45 deg. dir.) és hengerlési irányra merőlegesen (90 deg. dir.) [5]

2.3. DP acélok hegeszthetősége

A későbbi fejezetekben bemutatott kísérletekhez felhasznált acél típus a Docol DP 600-as acél. A Dual Phase acélok hegeszthetőségének vizsgálatához először érdemes a kísérleti alapanyagunk vegyi összetételét elemezni. A gyártók a hegeszthetőségi szempontokat szem előtt tartva a DP acélokat általában 0,15%-nál kisebb C-tartalommal, illetve 1,5%-ot nem meghaladó Mn-koncentrációval állítják elő. A Mn az acél egyik legfontosabb ötvözője, azonban a szilárdság és az edzhetőség javítására számos más ötvözőt is alkalmaznak, mint például a Cr, Mo, Ti vagy Nb, V és a B-t. Ezen ötvözők közül a króm, molibdén, vanádium és a bór növelik az edzhetőséget, valamint a ridegedési hajlamot. A kísérleti alapanyag vegyi összetételét spektrométeres vizsgálatokkal meghatározva, az 1. táblázatban összefoglalva láthatjuk.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	V	B
0,098	0,20	0,81	0,03	0,04	0,014	0,01	0,0002

1. táblázat: A kísérletekhez használt DP 600-as acél vegyi összetétele tömegszázalékban

Az általunk vizsgált acéllemez vegyi összetételéből látható, hogy a kedvező szilárdsági jellemzőket hidegalakítással és szemcsefinomító ötvözők hozzáadásával érték el. Meg kell említenünk, hogy a gyártástechnológia szempontjából rendszerint kétfajta DP acél érhető el a piacon. A kísérleti alapanyagot az SSAB acélgyártó állította elő. Az acélgyártók termékpalettáján szerepel mind a melegen hengerelt, erősebben ötvözött változat, mind a kisebb ötvöző tartalommal rendelkező hidegen hengerelt típus, mint amilyen a mi acéllemezünk is. A hegesztési technológia tervezése során semmi esetre sem hagyhatjuk figyelmen kívül, hogy a hegesztendő alapanyag szövetszerkezetében "vakedzett" (alacsony karbon-tartalmú, ún. lágy) martensit van jelen, továbbá számolnunk kell az edződést segítő ötvözők hatásával is. Ebből kifolyólag a DP 600-as anyagminőség ívhegesztése során korlátozott vonalenergiára van szükség, hiszen ezen acélok hegesztésekor kis vonalenergiánál az ötvözőelemek hatására a hőhatásövezet felkeményedhet, a kötés elridegedik, ezzel szemben túlzottan nagy vonalenergia alkalmazása esetén pedig a hőhatásövezet kilágyul, keménysége az alapanyag

keménységével közel egyező lesz, a kötés teherbíró-képessége pedig lecsökken.

A Dual Phase acélok jellemző szövetszerkezete az alakítási folyamat és a lehűtés célirányos kombinációjának eredménye, ezért ezeknél az acéloknál az eredeti, kiinduló anyagállapotot sajnálatos módon még hegesztést követő hőkezeléssel sem lehet visszaállítani [1].

További problémát jelent a DP acélok exogén ömlesztő hegesztései esetén, hogy a hozaganyagok is megolvadnak hegesztés során, majd kristályosodnak, ezért ugyanazon az elven nem gyárthatóak, mint az alapanyagok. Ahhoz, hogy a hegesztett kötés megfelelő szilárdsági és képlékenységi jellemzőkkel készüljön el, a hozaganyagok makro- és mikroötvöztetésével lehet csak elérni, de így a hegesztett kötésben szükségszerűen olyan heterogenitás jön létre, amelynek következményeit ma még nehéz előre látni [3].

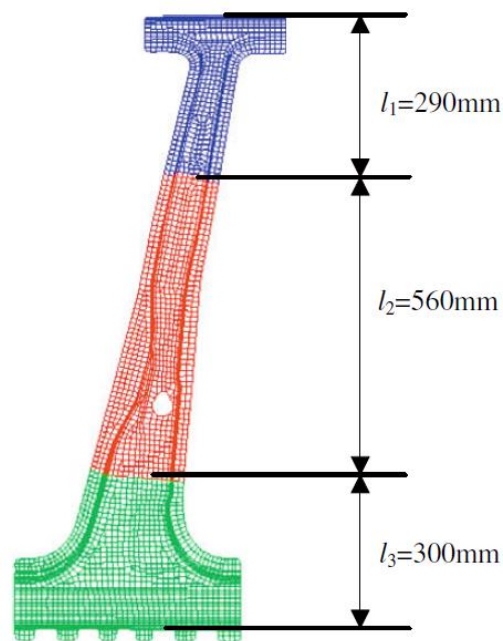
2.4. DP acélok alkalmazása

A DP acéltípusból elsősorban a gépkocsik lökhárítói, A, B és C oszlopai, az ülésvázak, valamint az ajtók, tető, stb. különböző merevítő elemei készülhetnek, amelyek jelentős energiaelnyelési képességük folytán egy esetleges ütközéskor az utasok biztonságát hivatottak szolgálni. Egyik ilyen alkatrész a B-oszlopként ismert vázalkatrész, melyet TWB-ből (tailor-welded blank, azaz kiszabott-hegesztett lemez) készítenek. A B-oszlop bonyolultságát láthatjuk a 7. ábrán, melyből kiderül, hogy nem pusztán a hegesztés technológiájának a megtervezése okozhat problémát, hanem az oszlop maga a súlycsökkentés miatt különböző vastagságú lemezekből tevődik össze.



7. ábra B-oszlop alkotóelemei

Az alkotóelemek jobb esetben egy fajta lemezből állnak, viszont láthatunk például a 8. ábrán olyan alkotóelemre, amely maga is több különböző vastagságú lemezből áll. Ennek oka a további súlycsökkentés, hiszen az igénybevételnek kevésbé kitett alkatrészeket igyekeznek a gyártók vékonyabb anyagból készíteni. Gyakran előfordul az is, hogy az olyan alkotóelemek, amelyekkel szemben nagyobbak a szilárdsági követelmények, nagyobb szilárdságú alapanyagból készülnek.



8. ábra Különböző vastagságú TWB-kból álló B-oszlop külső

A 8. ábrán egy olyan B-oszlop látható, amely már végelelemes hálóval is rendelkezik. A végelelemes modellezéssel az ilyen, vagy még bonyolultabb alkatrészek tervezését tehetjük meg, ezáltal csökkentve az előállítás költségeit [6].

3. ÍVHEGESZTÉSI FOLYAMATOK VÉGESELEMES MODELLEZÉSE

A végeselemes modellezés alapjainak feltárása a huszadik század legjelentősebb mechanikai eredményei között szerepel. A végeselemes modellezés mechanikai hátterének kidolgozása döntően a XX. század 60-as, 70-es éveire tehető, a nemlineáris végeselemes feladatok, mint maga a hegesztés, megoldására pedig a 80-as évektől kezdődően nyílt lehetőség. A mechanika fejlődésével szoros összhangot mutatott a számítástechnika fejlődése is. Még korábban az egyszerűbb lineáris feladatok megoldása, mint például egy rúd rugalmas alakváltozásának végeselemes modellezése is akár napokat vett igénybe, mára a végeselemes szempontból igen összetettnek bizonyuló ún. nemlineáris hegesztési folyamatok egy napjainkban átlagosnak mondható hétköznapi számítógépen akár néhány óra alatt modellezhetők.

A végeselemes modellezés alkalmazásának előnyei :

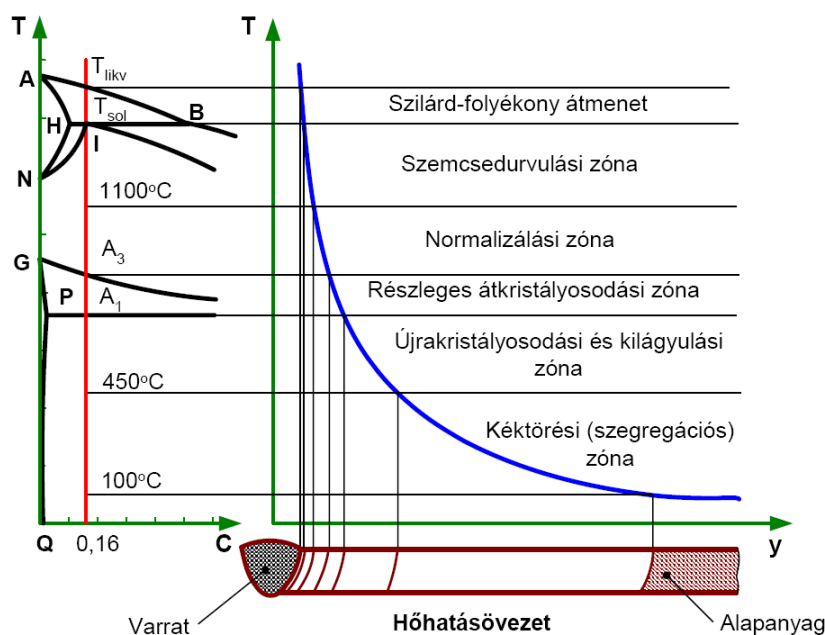
- gyártási folyamatok mélyebb megértése,
- prototípusok és fizikai tesztek számának csökkentése,
- tudatosabb gyártás, jobb minőség,
- gyorsabb piacra lépés,
- alacsonyabb fejlesztési és gyártási költségek [7].

3.1. Hegesztési jelenségek végeselemes modellezése

A gyártástechnológiák közül a hegesztési folyamatok bizonyulnak modellezés szempontból talán az egyik legbonyolultabbnak, hiszen a hegesztés maradó alakváltozással és feszültségekkel, különböző olvadási és fázisátalakulási folyamatokat eredményező hőbevitellel járó folyamat. A hő-, mikroszerkezeti- és mechanikai folyamatokat együttesen csatolt folyamatoknak nevezi a szakirodalom, hiszen ezek egy időben lejátszódó folyamatok [10].

Az általános végeselemes szoftvereknek a legnagyobb nehézséget a mikroszerkezeti változások kezelése okozza. Ezért a hegesztés, mint gyártási folyamat modellezésére specializált célszoftver, a SYSWELD bizonyul az egyik legalkalmasabbnak a szövetszerkezeti átalakulások követésére [7].

Ahhoz, hogy megértsük, hogy a hegesztési folyamatok modellezése miért jelent egy komplex feladatot, tekintsünk meg egy ömlesztő hegesztő eljárással készült hegesztett kötés hőhatásövezetéről készült ábrát (9. ábra). A varrat mellett mindkét irányban 6-6 különböző zóna található. Ezek közül a két legveszélyesebb az első (szilárd-folyékony átmenet) és a durvaszemcsés zóna (szegregációs zóna). Ha a szimuláció során mind a 6 zónáját a hőhatásövezetnek külön szimulálni szeretnénk, meglehetősen nehéz és hosszadalmas feladatot vállalnánk, amelyre ráadásul nem is állnak rendelkezésre szoftverek. Viszont ebben nagy segítségünkre szolgálnak a fizikai szimulációk. A valóságnak megfelelő állapotok megközelítését a hegesztésre specializált VEM rendszerek az átalakulási diagramok segítségével próbálják megvalósítani, így a hegesztési hőciklus függvényében a kialakuló szövetszerkezet típusa a hőhatásövezetben megbecsülhető [7, 8].

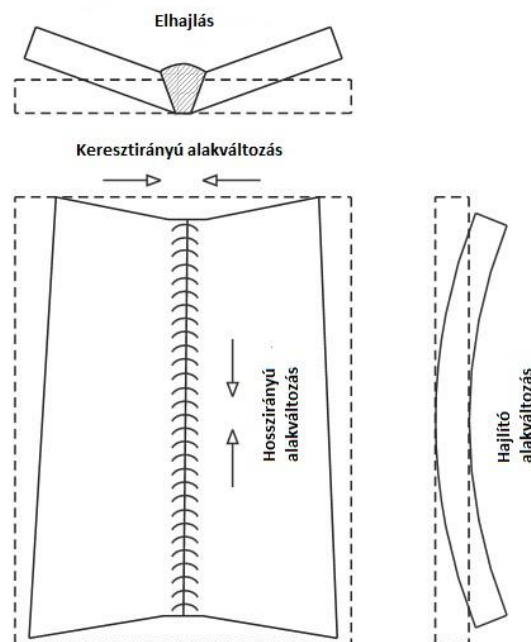


9. ábra A hegesztett kötés szerkezete [8]

Ezzel gondolnánk, hogy megoldottuk a hőhatásövezet problémáját, ám ez csak egysoros varrat szimulációja esetében lenne igaz. Az iparban viszont ugyanannyira előfordulhatnak többsoros, mint egysoros varratok. A probléma azért merül fel, mert a többsoros varratfelépítés esetében a létrehozott új hegesztési sorok megeresztő hatással vannak a korábban elkészített varratsorokra és azok hőhatásövezetére.

További érdekességet jelent, hogy a hegesztő hozaganyag az esetek túlnyomó többségében eltérő összetételű, mint az alapanyag. Ekkor még az összetételből származó eltérések diffúziót indíthatnak be az ömledékben és a hőhatásövezetben. Az egyszerűség kedvéért azonban vegyünk olyan példát, amikor a hozaganyag megegyezik az alapanyagával. Ebben az esetben is a varrat dendrites mikroszerkezete teljesen különbözni fog az alapanyagétól. További problémát jelent a hegfürdőt érő erőhatások (ívnyomás, felhajtó erő, gravitáció, felületi feszültség) hatására létrejövő áramlási folyamatok a hegfürdőben, melynek a modellezése roppant bonyolulttá válna, ezért a legtöbb célrendszer, mint a kísérleteinkhez használt SYSWELD is, nem számol ezzel a jelenséggel (ehhez CFD rendszerre van szükség). Természetesen létezik olyan program, amely számol a jelenséggel, ilyen például a COMSOL [7].

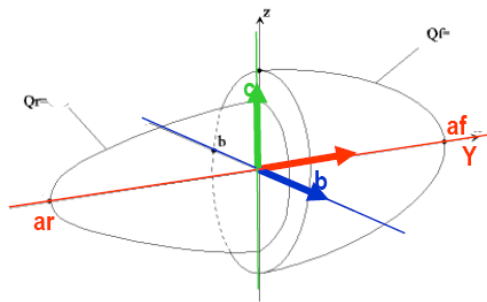
A hegesztés folyamata során az alapanyag a hőtágulás és a belső feszültség következtében deformálódik. A hegesztési tervezés megismételhetősége következtében elsősorban a hegesztés során létrejövő belső feszültség elemzésére korlátozzuk figyelmünket, míg a gyártás során az alakváltozások elemzésére. Az alakváltozásokat felnagyítva a 10. ábra mutatja [7].



10. ábra Hegesztés következtében létrejött alakváltozások (felnagyítva)

Ezek alapján látható, hogy a hegesztés végeselemes modellezésében alapvető jelentőséggel bír a hőátadás, ami külső hőforrás formájában kerül az anyagra, munkadarabra. A hőmérséklet növekedését általánosan két különböző

módon tudjuk modellezni, előírt hőmérséklettel, vagy előírt fajlagos hőbevitellel. Napjainkban az utóbbit szoktuk megadni hegesztés modellezése esetén. A legáltalánosabb hőforrások Gauss eloszlásúak, de az ívhegesztések során a Goldak-egyenletet használjuk hőforrás megadásához, amit a következőképpen írunk fel, és ahol a hőfolt a 11. ábra alapján értelmezhető [7, 9].



11. ábra Goldak-féle hőforrás (ívhegesztéshez)

Goldak-egyenlet:

$$Q(x, y, z) = Q_{f,r} \cdot e^{-\frac{y^2}{a_{f,r}^2}} \cdot e^{-\frac{x^2}{b^2}} \cdot e^{-\frac{z^2}{c^2}} \quad [\text{W} \cdot \text{mm}^{-3}]$$

ahol, $Q(x,y,z)$ – koordináták szerinti hőmennyiség

$Q_{f,r}$ – hőeloszlás

$a_{f,r}$, b , c , - mérethez kapcsolódó paraméterek [9].

A fentiek alapján láthatjuk, hogy a hegesztési folyamatok modellezésénél a valóságot megközelíteni mennyire bonyolult, ezért általában nincs lehetőségünk, és nincs is rá szükségünk, hogy minden részlet szerint vizsgáljuk a folyamatokat. Tehát az eredményeket minden esetben fenntartással és kritikus szemmel kell vizsgálnunk, tudnunk kell, hogy jellegében milyen eredményt várhatunk. Az alkalmazott modellező programot is a célunknak megfelelően kell megválasztanunk. Így más programot használunk, ha az optimális hegesztési sorrendet keressük, ha a minimális maradó deformációkat kutatjuk, vagy ha olyan bonyolult szimulációt futtatunk, ahol az ömledékben lévő áramlásokat szeretnénk vizsgálni [7].

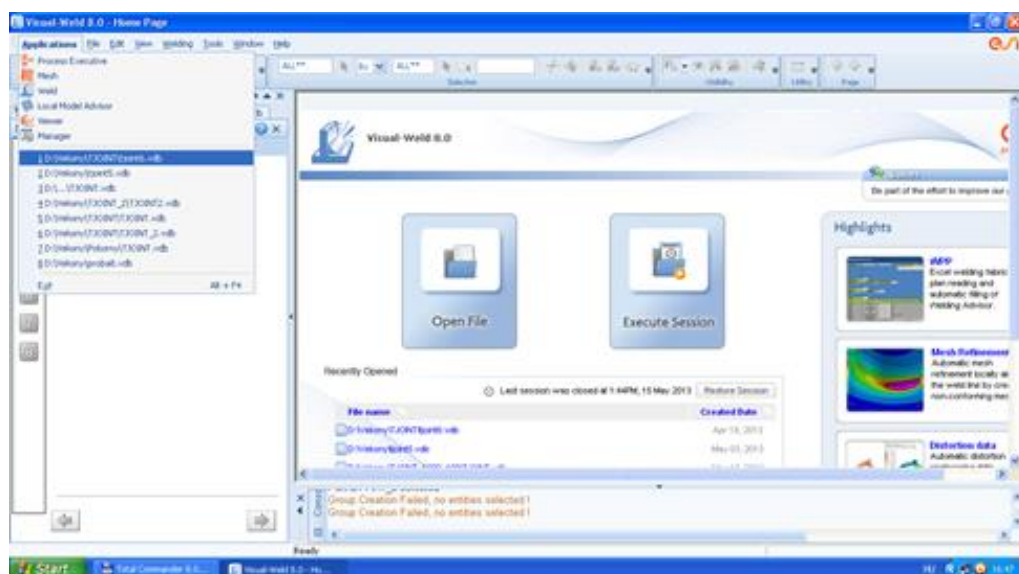
3.2. SYSWELD programcsomag

A SYSWELD programcsomag kezeli a „csatolt folyamatokat”, azaz ahogyan a nevében is szerepel, kimondottan a hegesztési folyamatok modellezésére fejlesztették a francia ESI Group által. A szoftver alkalmas a hegesztés numerikus analízisére, figyelembe véve a fázisátalakulásokat is, amely miatt ez a szoftver vezető szerepet tölt be a hegesztéssel foglalkozó modellezésre alkalmas programok között [7].

A program lehetővé teszi mind hegesztésre, mind hőkezelésre:

- a hőmérséklet mező meghatározását,
- a szövetszerkezet meghatározását,
- a keménység meghatározását HV-ben,
- az austenit szemcsenagyságának meghatározását,
- a maradó alakváltozások meghatározását,
- a maradó feszültségek meghatározását,
- a karbon és nitrogén tartalom meghatározását [10].

A modellezési eredmények alapján a hegesztéstechnológia optimalizálható, a szükséges paraméterek kiszámíthatóak, és lehetővé teszik új hegesztési technológiák kidolgozását. A számítási eredmények alapján a módosított hegesztési paraméterek is igazolhatóak [7, 10].



12. ábra VISUAL ENVIRONMENT felhasználói felülete

A SYSWELD program önmagában mára csak a végelelemes számításokat végzi. A tervezőrendszer felhasználófelülete a VISUAL ENVIRONMENT, mely a modellezés különböző lépéseire különböző modulokat használ. Így a geometria, és a hálózás elkészítéséhez a VISUAL MESH modult, a hegesztés modellezéséhez a VISUAL WELD, az eredmények megjelenítésére pedig a VISUAL VIEWER modulokat használja. A 12. ábrán a tervezőrendszer felhatalnáló felületét láthatjuk.

A geometria, és a végelelemes háló megadása után a számításokhoz az alábbi bemenő adatokat kell megadnunk:

- a hegesztési eljárás,
- a vonalenergia (fajlagos hőbevitel),
- a szerkezet és a varrat geometriája,
- hegesztési pálya,
- a felhasznált anyagok,
- az előmelegítési hőmérséklet,
- a varratok felépítése, helyük és sorrendjük,
- a megfogások (készülékezés),
- az utólagos hőkezelés,
- stb [10].

A szoftverben a következő anyagok hegesztése és hőkezelése modellezhető:

- minden acél (ötvöztelen, gyengén ötvözött, ötvözött, ausztenites stb.)
- alumínium ötvözetek,
- titán ötvözetek,
- öntött vasak,
- stb [10].

A hegesztés bonyolultsága miatt a SYSWELD bizonyos folyamatokkal nem számol, ezért nem alkalmas:

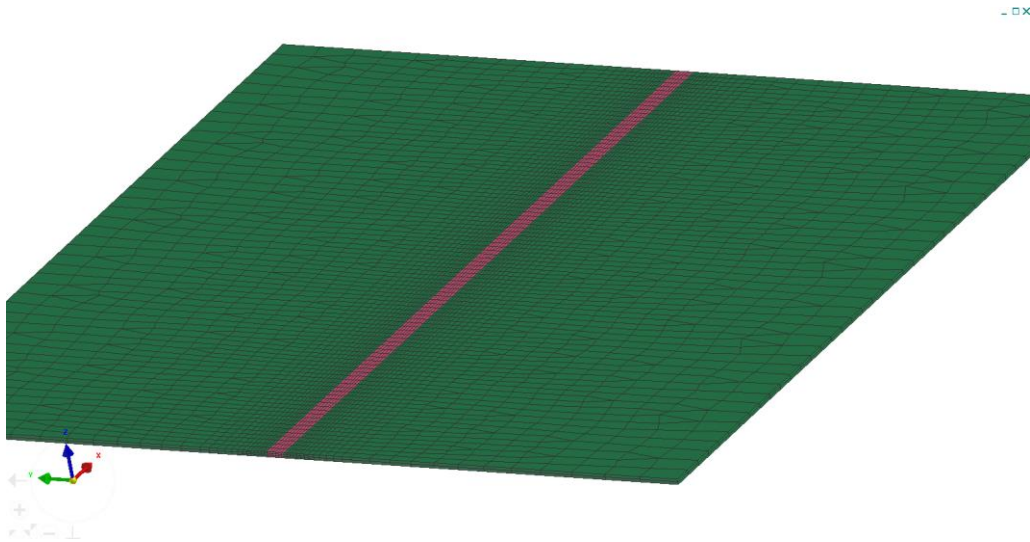
- a hegfürdő és a (pikkelyes szerkezetű) varratfelület alakjának meghatározására,
- az ömlesztési, cseppleválási és áramlási folyamatok modellezésére,
- a hegesztési folyamat fizikai megvalósításának modellezésére (elektromos ív, elektronsugár, huzaladagolás stb.).

4. MODELLEZÉSI FELADAT ÖSSZEÁLLÍTÁSA

4.1. Geometriai modell elkészítése

A modellezési feladat során első lépésként meg kell rajzolnunk a pontos geometriát. A SYSWELD-ben miliméterben kifejezve tudjuk ezt meghatározni. A hegesztési kísérlet során 1 mm vastagságú 150x80 mm méretű próbalemezeket hegesztünk össze autogén (hozaganyag nélkül) módon, AWI, azaz argonvédőgázos volfrámelektrodos ívhegesztéssel (ISO kód: 141).

Következő lépésben jön a modellezés első iterációs feladata, a végeselemes háló elkészítése. Ezért, hogy megkönnyítsük feladatunkat, magát a geometriai modellt érdemes több részből felépíteni, hogy ezáltal felesleges számításokat ne végeztessünk a programmal. A hegesztési folyamat szempontjából kevésbé befolyásolt területeket kisebb hálósűrűséggel, míg a nagyobb mértékben befolyásolt területeket, mint például a hőhatásövezetet érdemes sűrűbb hálózással ellátni. A kész hálózott geometriai modellre látunk példát a 13. ábrán.



13. ábra A hálózott geometriai modell

A geometriai modellt és a hálózást a VISUAL MESH modulban készítettem.

4.2. Hegesztési paraméterek megadása

A hegesztési paramétereket a Welding Advisor fül alatt tudjuk megadni. Elsőként az anyagminőséget kell definiálnunk. Mivel hozaganyag nélkül hegesztettünk, ezért a későbbi varrathoz és az alapanyaghoz is ugyanazt az anyagminőséget rendeltük hozzá.

A hálózás mellett a hegesztés modellezésének másik kritikus eleme az anyagtörvények pontos megadása, melyek nagy része ráadásul hőmérsékletfüggő anyagjellemzőket tartalmaz. A 2. táblázat tartalmazza azokat az anyagjellemzőket, amelyek nélkülözhetetlenek a számítások elvégzéséhez. Amennyiben a hegesztés során megváltozott szövetszerkezetről is szeretnénk eredményeket kapni, úgy a vizsgált alapanyagunk folyamatos hűtésű átalakulási diagramjára is szükségünk van [1].

Mechanikai anyagjellemzők	Hőfizikai anyagjellemzők
folyáshatár $R_{p0.2}(T)$	hővezetési tényező, $\lambda(T)$
alakítási szilárdság, $k_f(\varphi)$	fajhő, $c_p(T)$
Young modulusz, $E(T)$	entalpia, $h(T)$
Poisson tényező, ν	sűrűség, $\rho(T)$
Termikus nyúlás, $L(x,y,z,T)$	fázisátalakulások reakciói

2. táblázat A modellezéshez szükséges anyagjellemzők

Azt természetes nem várhatjuk el, hogy a szoftver adatbázisa minden egyes gyártó minden anyagtypusáról ismerje az összes anyagjellemzőt, ezért lehetőségünk van anyagjellemzőket bevinni a rendszerbe. Sajnos ez a módszer azonban rendkívül időigényes, és költséges, hiszen megannyi vizsgálatra szükség van. Ráadásul egy-egy hegesztett szerkezetek gyártásával foglalkozó vállalat többnyire többféle lemezanyagot használ fel, és egy-egy anyagtypust sokszor többféle gyártótól szerez be.

4.2.1 A kísérlet alapanyaga

Kísérletünk esetében a szűkös anyagadatbázis ellenére a szoftver tartalmazza a DP 600-as acél anyagjellemzőit. Az anyagadatbázisban szereplő DP W 600 acél bár mechanikai tulajdonságait tekintve azonos kategóriába esik a hegesztési kísérleteinkhez használt DP 600-as acéllal, gyártástechnológiáját

tekintve mégis eltér attól. A kísérletünkhöz használt Docol DP 600 acél hideghengerléssel készül, miközben a program adatbázisában szereplő DP acélt melegehengerléssel gyártják, amelyre a jelölésben szereplő W betű utal. A gyártástechnológiai különbséget a két acél eltérő vegyi összetétele is mutatja (3. és 4. táblázat) [11].

C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	V	B
0,098	0,20	0,81	0,03	0,04	0,014	0,01	0,0002

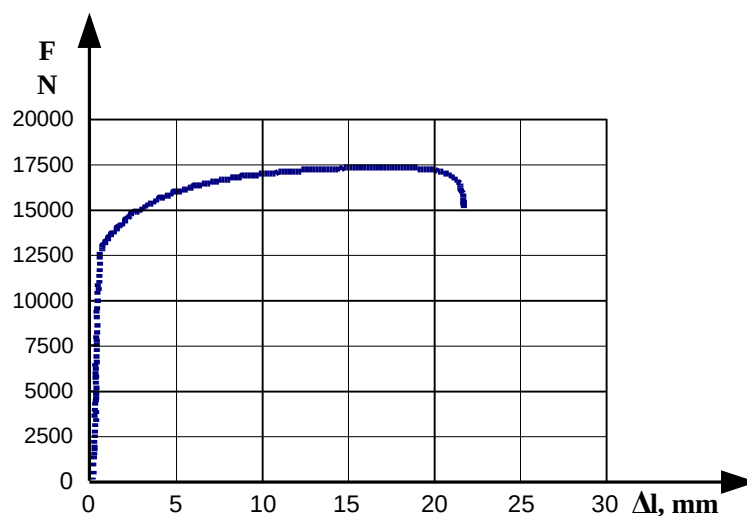
3. táblázat Kísérletekhez használt DP 600-as acél vegyi összetétele tömegszázalékban

A Docol DP 600-as acél vegyi összetételét spektrométeres vizsgálatokkal határoztuk meg [1].

C	Si	Mn	Cr	Al
0,085	0,11	1,54	0,41	0,16

4. táblázat Szoftver anyagadatbázisában szereplő DP W 600 acél vegyi összetétele tömegszázalékban [12]

A 3. és 4. táblázatból látható, hogy jelentős összetételbeli különbség van a valós kísérleti és a modellezett alapanyag közt. Ennek a különbségnek az 5. fejezetben még látjuk a jelentőségét.



14. ábra Docol DP 600 jelű acél (kísérleti alapanyag) szakítódiaagramja

Fontosnak tartom megemlíteni, hogy az alapanyagon szakítóvizsgálatokat végeztem, így a 14. ábra bizonyítja, hogy az alapanyag mechanikai tulajdonságaiban mennyire fedti a szakirodalmakban leírtakat [1].

A modellezés következő lépésében kiválasztottam és beállítottam az adott hegesztő eljárásra (AWI) jellemző hőforrás modellt (Goldak-féle hőforrás). A hőforrás három paraméterből áll, így a hőforrás szélességéből ($w = \text{width}$) és hosszúságából ($l = \text{length}$), valamint a beolvadási mélységből ($p = \text{penetration}$). Mivel két kísérletet készítettem, két különböző vonalenergiával, ezért természetesen két különböző méretű varrat jött létre. A hegesztési kísérletek során létrejött valós varratalak méretei alapján készítettem el a modellezett varratalakat (5. táblázat).

	szélesség	hosszúság	beolvadás mélysége
1. kísérlet	3,5 mm	7 mm	1,75 mm
2. kísérlet	2,625 mm	5,25 mm	1,3125 mm

5. táblázat A hőforrás függvény definiálásához szükséges méretek

A hőforrás pontos megadása az egyik legfontosabb pontja a modellezésnek, ugyanis a pontatlan megadásból jelentős eltérésekre számíthatunk, hiszen az adott energiamennyiséget a hőforrásra, mint térfogategységre számítja a program.

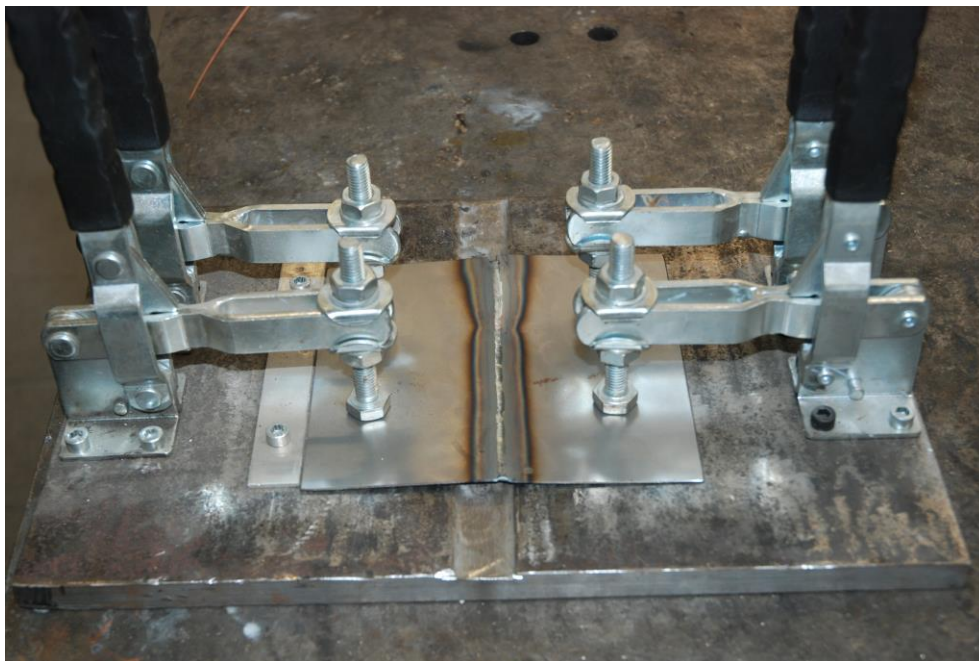
Ezután a hegesztési paraméterek megadására került sor, amelyeket a 6. táblázat foglal össze. Ahogyan fentebb írtam, két kísérlet készült, két különböző vonalenergiával, amelyeket a valós hegesztés során az áramerősség módosításával értem el.

	U_{iv} (V)	I_h (A)	v_h (cm/min)	E_v (J/mm)
1. kísérlet	11,5	38	8-9	186
2. kísérlet	11,3	31,6	8-9	151

6. táblázat Hegesztési paraméterek

Az ívfeszültség értékeit az argonvédőgázos volfrámelektrodos ívhegesztéshez tartozó (ISO által ajánlott) munkaegyes segítségével határoztam meg [1].

A hegesztési paraméterek után a hegesztés pálya definiálása, majd azután a termikus és mechanikai peremfeltételek megadása következett, amelynél a megfogásokkal együtt figyelembe vettem a modellezést követő tényleges hegesztési kísérlet (15. ábra) összeállítási tervét.



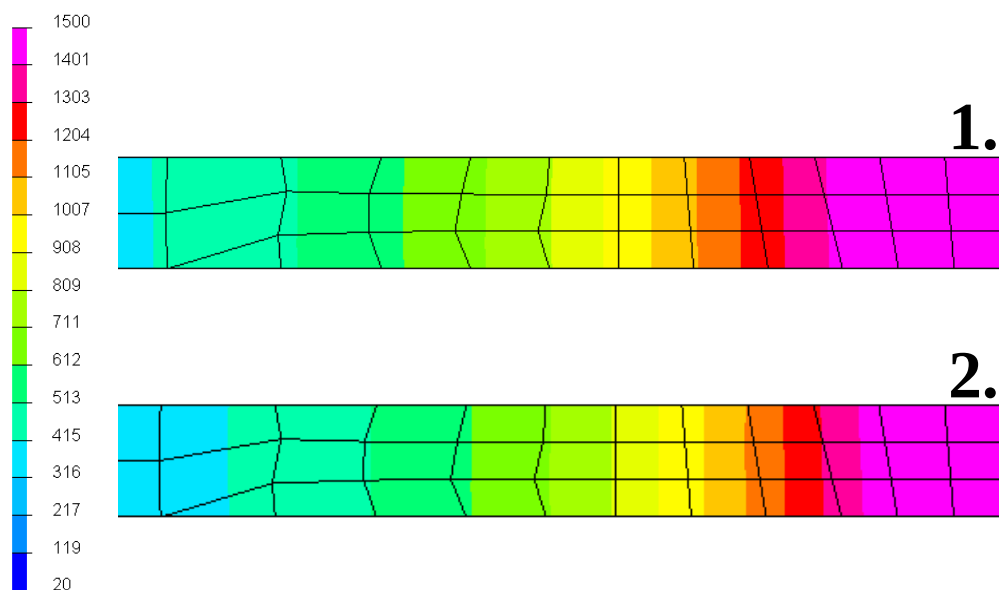
15. ábra Összeállított hegesztési kísérlet

4.3. Modellezés eredményei

4.3.1 Hőforrás

A modellezés során kapott eredmények közül először a két különböző vonalenergiához tartozó hőmérsékletmezőt hasonlítottam össze (16. ábra). Az ábra a hegesztett kötés egy adott keresztmetszetében a hőforrás elhaladásakor kialakuló hőmérsékletmező keresztirányú hőmérséklet eloszlását szemlélteti. Látható, hogy az adott hőmérséklethez tartozó izotermák nagyobb vonalenergia esetén a varrat középvonalához képest távolabb helyezkednek el, vagyis ezáltal bebizonyosodott, hogy a hegesztési paramétereket helyesen adtam meg. A valós hegesztési paraméterek megtartása mellett, de a hőforrás

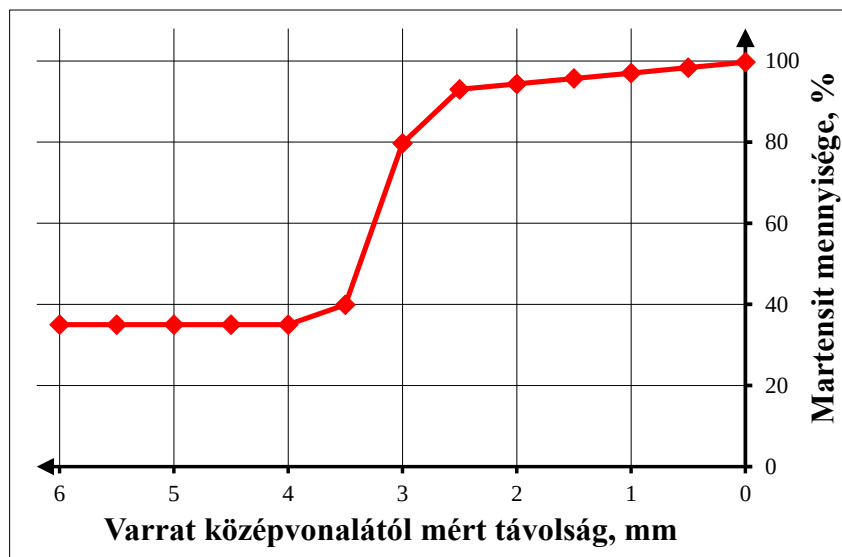
alakját változtatva szintén lefutattam több szimulációt is a különbségek megfigyelése érdekében. Tapasztalatom szerint az nem jelent jelentős problémát, ha a hőforrás méretei nem annyira pontosak, mivel pl. a hegfürdő hosszát nem tudjuk megmérni hegesztés közben. Mértéket csak a dermedt varratlábokból számíthatjuk ki. Természetesen a nagyon eltérő méretek esetén kaphatunk pontatlan eredményeket [1].



16. ábra A hegesztési paraméterek hőmérsékletmezőre gyakorolt hatása

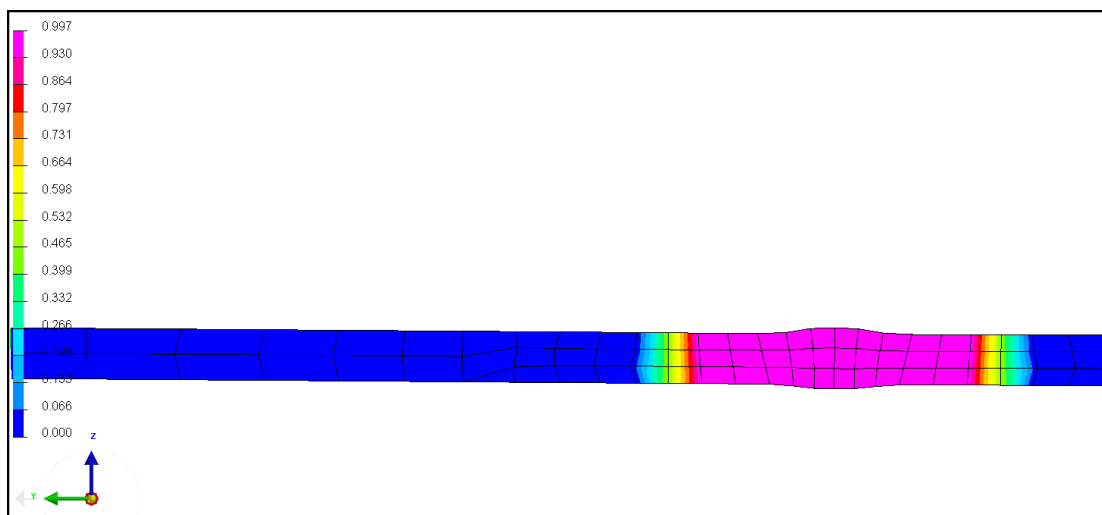
4.3.2 Szövetszerkezet

Következő kiértékelési szempont a hegesztés végén létrejövő szövetszerkezet vizsgálata volt. Ezeket a szövetszerkezeteket a program folyamatos hűtési átalakulási diagramok alapján számítja ki. A DP W 600-as acél esetén a program csak a martensites szövettel számol, holott az alapanyagban és a hőhatásövezetben mindig van bainit és austenit is. Sajnos a melegen hengerelt DP acélról nincs valós szövetszerkezeti képünk, amely alapján alá tudnánk támasztani a program eme egyszerűsítését, viszont feltehetőleg valóban sokkal kevesebb visszamaradt bainit és austenitet tartalmazhat a hidegen hengerelt DP acélnál, hiszen a krómtartalom a folyamatos hűtésű átalakulási diagramban szereplő görbéket jobbra tolva kedvezően hat a martensit képződésére. A hidegen hengerelt változatnál, mint amilyen a kísérletünkben is szerepel, feltehetőleg valamivel nagyobb arányú bainit és austenit keletkezik. A 17. ábrán láthatjuk a második hegesztési kísérlet hegesztés utáni martensit mennyiségét [1, 12].



17. ábra A martensit mennyiségének részaránya keresztirányban (2. kísérlet)

Az adatbázisban nem szerepel martensit-arány a kiinduló alapanyagról. A 18. ábra alapján láthatjuk, hogy az alapanyagban a martensit arány 0-ra csökkent. Ez valószínűleg azzal magyarázható, hogy a hegesztés utáni állapotot veszi alapul a program, és nem a kiindulási állapotot.



18. ábra 2. kísérlet martensit mennyiségének részaránya hegesztés után

A 17. ábra felvételéhez vegyes megoldást alkalmaztunk. Egyik részét a 18. ábra alapján készítettük, egészen addig a pontig, ameddig a martensit aránya el nem érte az alapanyag martensit arányát. Az alapanyag martensit arányát makrosziszolati kép alapján képelemző szoftver segítségével határoztuk meg. A szövetszerkezetről láthatunk képet a 19. ábrán.



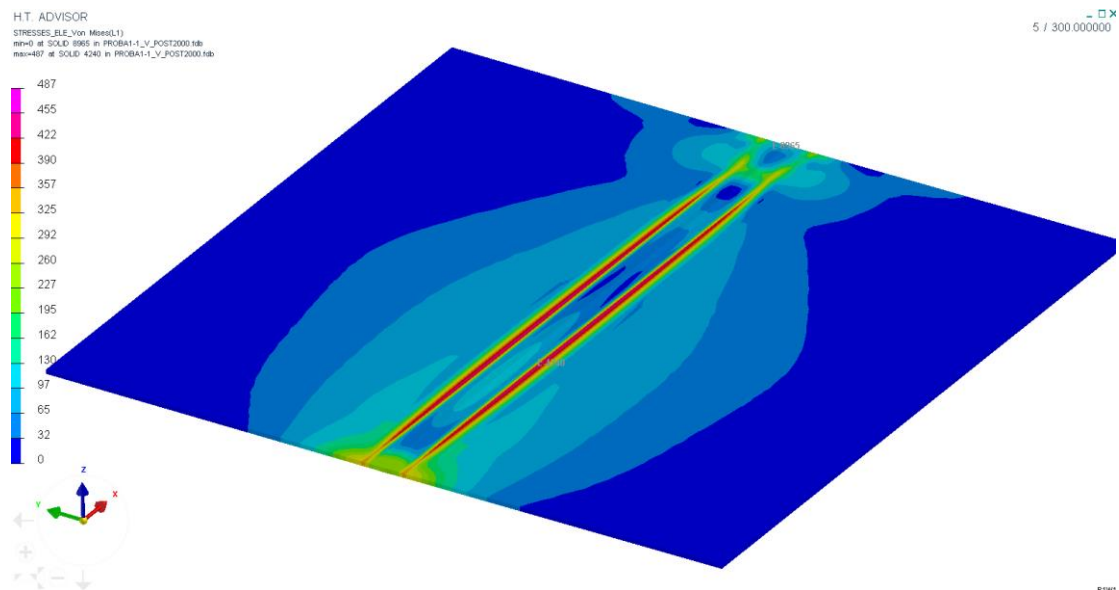
19. ábra A DP 600-as acél ferrit-martensites mikrociszolati képe. Nagyítás: 500x, Marószer: Nital

A képelemző szoftver eredménye szerint az alapanyag 35%-os martensit-, és 65%-os ferritaránnyal rendelkezik.

A két eltérő vonalenergiával készült modell összehasonlításakor azt tapasztaltam, hogy a kisebb fajlagos hőbevitellel készült kötés hőhatásövezete szélesebb tartományban tartalmaz martensitet, amely fokozott ridegédési hajlamot jelez. Túl magas hőbevitel esetén viszont az ötvözők kiéghetnek, ezáltal a varrat és főleg a hőhatásövezet szilárdsága nagyon lecsökkenhet [1].

4.3.3 Maradó feszültség

A végeselemes modellezés sok más előnye mellett az egyik legnagyobb előnye, hogy olyan információkhoz juthatunk hozzá, amelyeket csak nagyon költséges és körülményes módszerekkel, vagy egyáltalán nem tudunk meghatározni. Ilyen a maradó feszültségek meghatározása. Jelenlétéről tudunk, mérni viszont csak nagyon költséges módszerekkel tudjuk (röntgen diffrakció, mérőbélyeges mérés). A SYSWELD segítségével, természetesen a megfelelő mechanikai peremfeltételek megadásával, prognosztizálni tudjuk a maradó feszültségeket, ezáltal olyan hegesztéstechnológiát tudunk kidolgozni, amellyel kisebb mértékű maradó feszültséget tudunk elérni. Ezáltal pedig egy biztonságosabb hegesztett szerkezet gyártható, amelynek az élettartama is hosszabb lesz. Az első kísérlet maradó feszültségeinek az eloszlását a 20. ábrán láthajuk.



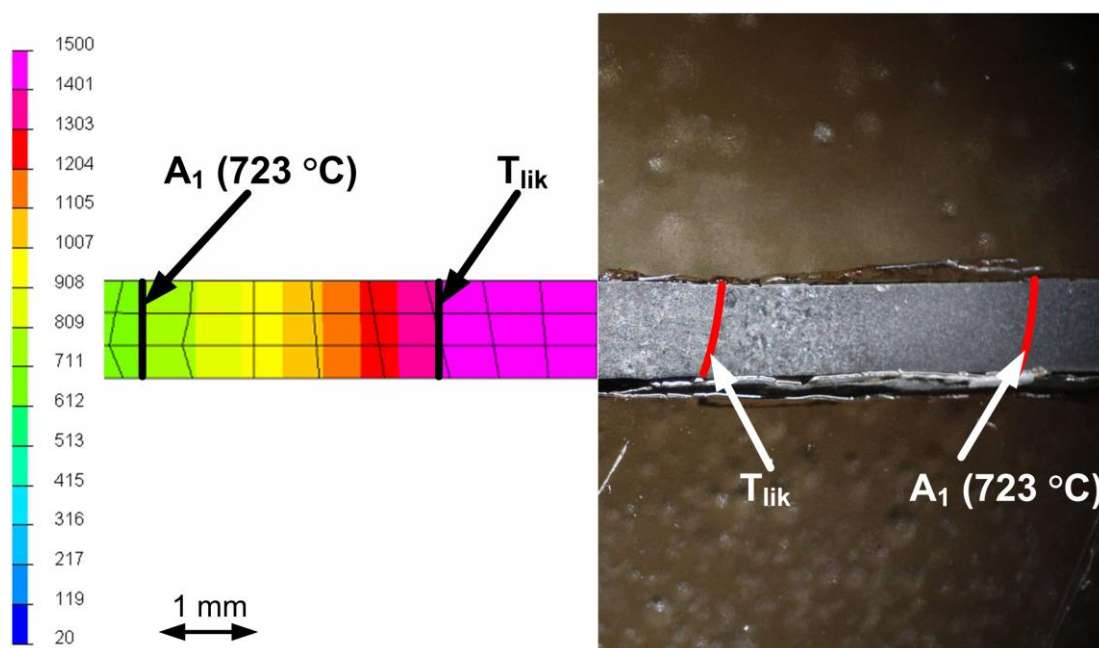
20. ábra Az 1. hegesztési kísérlet maradó feszültségeinek eloszlása a hegesztést követően (Von-Mises elmélet alapján)

A számítások eredményei alapján arra a következtetésre juthatunk, hogy a hegesztett kötésben a maradó feszültség maximális értéke megközelítette, sőt a varrat mellett bizonyos helyeken meg is haladta a folyáshatárt [1].

5. MODELLEZÉS EREDMÉNYEINEK ÖSSZEHAISONLÍTÁSA A HEGESZTÉSI KÍSÉRLETTEL

5.1. Hőmérsékletmező

Ahogy az előző fejezetben, úgy ebben a fejezetben is a hőmérsékletmezők összehasonlításával foglalkoztam először. A hőmérsékletmezők egyezése alapvető jelentőséggel bír, hiszen amennyiben nem látunk egyezőséget, akkor a modellezés további eredményeinek tekintetében nincs is értelme további összehasonlításokat tenni, mert nagy valószínűséggel teljesen eltérő eredményeket fogunk kapni. Amennyiben nem áll rendelkezésünkre termoelemes műszer, úgy elegendő a 21. ábra jobb oldalán látható keresztirányú makrosziszolati képet készítenünk, melyen jól látható a likvidusz hőmérséklethez (T_{lik}) tartozó beolvadási vonal, és a látható hőhatás övezet szélét jelző A_1 izotermához tartozó vonal. A valós és a modellezett hőmérsékletmező összehasonlítását a 21. ábra szemlélteti [1].

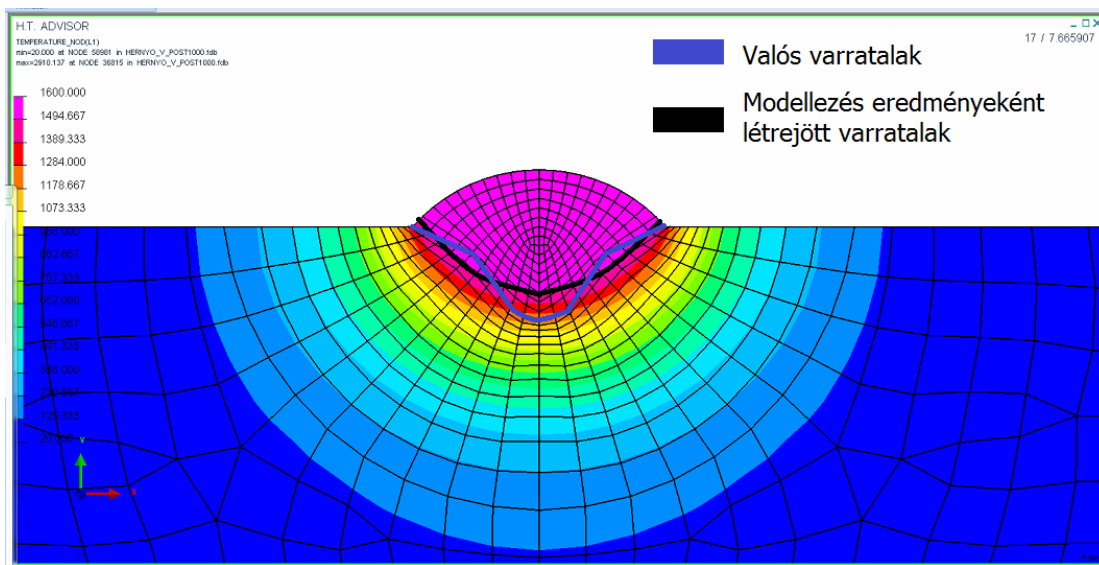


21. ábra A modellezés és a valós hegesztési folyamat során kialakuló hőmérsékletmező összehasonlítása (2. kísérlet)

Természetesen, ahogy korábban említettem, a valós hegesztési kísérlet méretei alapján építettem fel a geometriai modellt, ezért a varrat alakjában lényegi különbség nem látható. A modellezés eredményességét mutatja, hogy

az A_1 hőmérsékleti vonal közel azonos távolságra van, mint a valós hegesztési próbadarabon. Ezáltal elértük célunkat, hiszen a hőforrás, és a hegesztési paraméterek definiálása sikeres volt, ebből kifolyólag értelmet nyert a további vizsgálatok folytatása.

Pusztán érdekesség gyanánt szeretném bemutatni egy korábbi kísérlet eredményeit, amelyben a varratalak helyes modellezése ellenére a kívánt hőfolt nem állt elő. Ezt a példát a 22. ábrán láthatjuk.

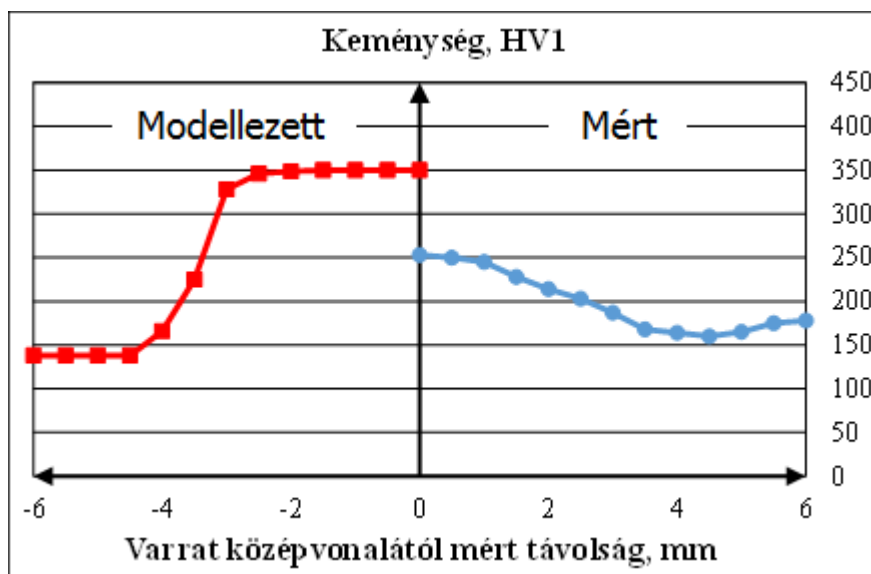


22. ábra Szerkezeti acél valós és a modellezés eredményeként létrejött varratalakja

Ennek a látható különbségnek az oka lehet, hogy több tényező mellett a védőgáz is(jelen esetben 82% Ar + 18% CO₂) nagyban befolyásolja a varratalakot, ezért szinte lehetetlen elvárás, hogy a modellezés eredményei tökéletesen egyezzenek a valósággal.

5.2. Keménységeloszlás

Az anyagtechnológiákkal (alakítás, hőkezelés, hegesztés) kapcsolatos modellezési feladatoknál az eredmények igazolására gyakran hasonlítják össze a virtuális és valós keménységeloszlást. A 23. ábra bal oldala az első hegesztési kísérlet során mért keménységeket, a jobb oldali rész pedig a modellezés eredményeit szemlélteti.



23. ábra A modellezés során számított eredmények összehasonlítása a valós hegesztett kötés keménységeloszlásával (1. kísérlet)

Az acéllemez kis vastagsága miatt ($s = 1 \text{ mm}$) az általános HV10-es keménységmérés helyett HV1-es keménységmérést végeztem el. Mint az a 23. ábrán látszik, a különbség ebből is származhat, ám ennek csak kismértékű különbségnek kellene lennie.

A nagy különbséget, ami körülbelül 100 HV értékű (a varrat középvonaltól), a modellezett és a kísérleteknél használt alapanyag eltérő vegyi összetétele okozza. Kísérleteimhez DP 600 acélt alkalmaztam, a végeselemes modell esetében a szoftver anyagadatbázisában szereplő DP W 600 acél meleghengerréssel készül, ebből kifolyólag pedig nagyobb krómtartalommal kell rendelkeznie ahhoz, hogy a hideghengerelt acélra jellemző mechanikai tulajdonságokat elérje. Ezért a 350 HV csúscskeménység legfőbb indoka a króm, amely a varrat és a hőhatásövezet beolvadási vonalához közel eső részének martensites szövetszerkezetét igazolja. Érdeemes megemlíteni, hogy előzetes ívponthegeztési kísérleteket végeztünk a hidegen hengerelt DP 600 alapanyagon, ahol a heglencsében 340 HV csúscskeménységet mértünk, tehát bizonyos körülmények közt előfordulhat a hidegen hengerelt DP 600 acélnál is az ilyen magas keménységérték [1].

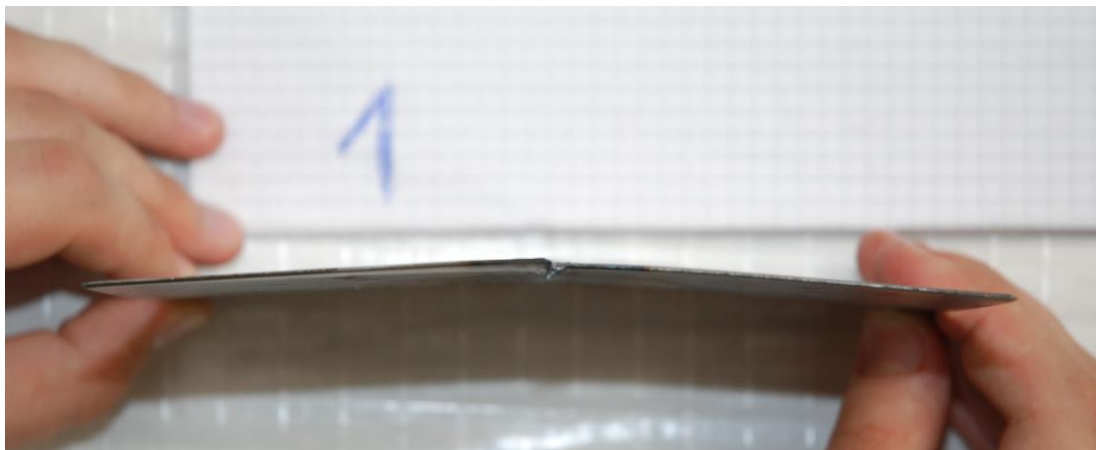
Ennek ellenére a modellezés eredményei felhasználhatók, hiszen a valós és a modellezésből származó keménységértékek görbéje hasonló jelleget mutat, ráadásul a modellezés segítségével sikerült előzetes ismereteket kapnunk a melegen hengerelt DP 600 acélok várható keménységeloszlásáról is. A

varratnál magasabb értékű, tovább haladva a hőhatásövezeten keresztül, értéke enyhén csökkenő tendenciát mutat, majd az A_1 vonalnál egy nagyobb mértékű esést láthatunk.

5.3. Deformáció

Egy hegesztett szerkezet tervezésénél talán az egyik legfontosabb feladat a deformáció minimalizálása. Kiiktatni ezt a jelenséget szinte lehetetlen, ám megfelelő technológia alkalmazásával mértéke jelentősen csökkenthető.

A deformáció elsődleges oka a hőtágulás. További oka, hogy az ömledék dermedése során fajtérfogat csökkenés következik be. Ez kétszer is megtörténik, először az ömledék dermedésekor, majd a $\delta \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ átalakulás során előbb egy fajtérfogat növekedés, majd egy fajtérfogat csökkenés megy végbe. Előbb a térben középpontos kristály, szabályos felületen középpontos kristállyá (γ) alakul, mely fázis tömöttebb, ezért megnő az acél térfogata, majd a γ fázist fajtérfogat csökkenés követi, amikor az α fázisba alakul át a rendszer. Az α fázis ritkább, térben középpontos kristály, ezért történik fajtérfogat csökkenés a γ fázishoz képest [13].



24. ábra Az 1. hegesztési kísérlet keresztirányú elhajlása

A deformáció problémája különös figyelmet igényel a kis méretű termékek gyártásánál. Ilyen terméknek tekinthető például a 7. ábrán látható B-oszlop, hiszen nem pusztán az a probléma, hogy a hegesztés elhúzódással jár, hanem a B-oszlop hegesztett kötéseiben szereplő alapanyagok már eleve alakított kiindulási anyagok. Ezen alapanyagoknak az alakítás hatására nő a belső

feszültsége, amit a rossz hegesztési technológia tovább növelhet, amely könnyen átlépheti a folyáshatárt, ezáltal pedig tönkremenetelt okozhat.

A valós kísérlet keresztirányú alakváltozását láthatjuk a 24. ábrán.

Mechanikai számításaink egyelőre nem hozták a valós deformáció eredményeit, ezért további modellezésre és számítások végeztetésére van szükség.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat elkészítése során a szimulációk elvégzésével és az utána következő kísérletekkel sikerült mély és gyakorlati tapasztalatokra szert tennem a hegesztési folyamatok végeselemes modellezését illetően.

A dolgozatomban áttekintettem a Dual Phase (DP) acélok tulajdonságainak, hegeszthetőségének legfontosabb jellemzőit és legjellemzőbb alkalmazási példát. A hegesztés hőciklusa irreverzibilisen megváltoztatja a lehűtés és hengerlési alakítás speciális kombinációjaként létrehozott ferrit-martensites szövetszerkezetet, ezért a hegesztéstechnológia tervezésekor a lágyacél lemezekhez képest körültekintőbben kell eljárni.

A napjainkban egyre nagyobb jelentőséggel bíró végeselemes modellezés nagy lehetőséget jelent ezen speciális acélok hegesztéstechnológiájának tervezésére, illetve a hegesztési folyamatok mélyebb megértésére. A dolgozatban a Mechanikai Technológiai Tanszéken elérhető hegesztési folyamatokra specializált végeselemes szoftverrendszer, a SYSWELD segítségével egy DP 600 korszerű nagyszilárdságú autóiipari acél argon védőgázos volfrámelektrodás ívhegesztését sikerült egy virtuális térben megvalósítani, és a számításokból sikeres eredményekhez jutni. A modellezés során információkat kaptam a hegesztési paraméterek hatásáról, a folyamat során kialakuló szövetszerkezetéről és a maradó feszültségekről is. A deformációk pontos kiszámításához a modellezés további optimalizálására van szükség. A kapott eredményeket valós hegesztési kísérletekkel igazoltam, azonban a modellezési feladat pontosításához a hideghengerléssel készült DP 600 acél anyagjellemzőinek pontos meghatározására van szükség, ez a témában való további kutatásra ad ösztönzést [1].

7. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A dolgozatban ismertetett kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 jelű projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Gáspár M.; Prém L.; Vékony S.; Balogh A.: DP 600 Autóipari acél AWI hegesztésének végelelemes modellezése, GÉP, (megjelenés alatt), 2013.
- [2] Tisza M.: Járműipari acélfejlesztések, GÉP, LXIII. évf. 11. sz., pp. 3-10., 2012.
- [3] Dr. Balogh A.; Gáspár M.; Prém L.: A hegesztett szerkezetek konvencionális és korszerű nagyszilárdságú acéljainak rendszerezése és hegesztési nehézségei, (megjelenés alatt), 2013.
- [4] Marosné Dr. Berkes M. (tantárgy előadója): Anyagtudomány előadás jegyzet, Miskolci Egyetem, 2012.
- [5] Kyung-Hwan Chung; Wonoh Lee; Ji Hoon Kim; Chongmin Kim; Sung Ho Park; Dongil Kwon; Kwansoo Chung: Characterization of mechanical properties by indentation tests and FE analysis – validation by application to a weld zone of DP590 steel, International Journal of Solids and Structures 46, 2009. pp. 344-363.
- [6] Feng Pan; Ping Zhu; Yu Zhang: Metamodel-based lightweight design of B-pillar with TWB structure via support vector regression, Computers and Structures 88, 2010. pp. 36-44.
- [7] Gáspár, M.; Balogh, A.: Számítógéppel segített technológiai tervezésre alkalmas programok ömlesztő hegesztő eljárások esetén, TÁMOP tanulmány, Miskolci Egyetem, 2012.
- [8] Balogh A.; Schaffer J.; Tisza M.: Mechanikai Technológiák (Szerk.: Tisza M.) Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2007. ISBN 963 661 571 3
- [9] Gáspár M.; Prém L.: Anyagtechnológiák végelelemes modellezése, szimuláció szerepe a hegesztésben és a hőkezelésben, Gyakorlati bemutató korszerű anyagtechnológiák tantárgyból, Mechanikai- Technológiai Tanszék, Miskolci Egyetem, 2012.
- [10] Pogonyi, T.; Palotás, B.: „SYSWELD” a hegesztés végelelemes modellezésének eszköze, 26. Hegesztési Konferencia és Hegesztéstechnikai Kiállítás, Budapest, 2012, pp. 35-44
- [11] ThyssenKrupp Steel: DP-W and DP-K dual-phase steels – For the manufacture of complex high-strength structural elements, 2009.

[12] SYSWELD programcsomag adatbázisa

[13] Tisza M.: Az anyagtudomány alapjai, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2008. ISBN 978 963 661 844 5

Készítette: Vékony Sándor

Konzulens: Gáspár Marcell

PhD hallgató

Prém László

PhD hallgató

Miskolc, 2013. november 9.