

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Anyagtudomány és Technológia Tanszék

Duplex korrózióálló acélok lézersugaras hegesztése

Készítette: Bögre Bálint
Konzulens: Dr. Dobránszky János

2013.

Nyilatkozat

Alulírott Bögre Bálint, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója kijelentem, hogy ezt a Tudományos Diákkör Konferenciára készített munkámat meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megjelölésével egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2013. november 4.

.....

Bögre Bálint

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Dr. Dobránszky János tanár úrnak, Dr. Buza Gábor úrnak és a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-nek, hogy Tudományos Diákköri dolgozatom elkészítésében segítséget nyújtottak.

„Lézertechnológiák a járműipar és a megújuló energiaforrás hasznosítás szolgálatában” című (TÁMOP 4.2.2.A11/1/KONV2012 0075 azonosító számú) projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Tartalomjegyzék

1. Duplex acélok	8
1.1. Duplex acélok általános jellemzői	8
1.2. Duplex acélok anyagtani vonatkozásai.....	11
1.3. A 2304-es duplex acél felhasználási területei.....	14
1.4. Duplex acélok hegesztése	15
1.5. Újabb duplex acélok hegeszthetőségi kérdései	18
2. Lézersugaras megmunkálások	20
2.1. A lézerről általánosságban.....	20
2.2. Fontosabb lézer típusok	23
2.3. Lézersugaras hegesztés általános jellemzői.....	25
3. A hegesztési kísérletek elvégzése	26
3.1. A kísérleti terv ismertetése	26
3.2. A hegesztés végrehajtása	29
3.3. A szén-dioxid lézeren készített darabok szemrevételezése	37
3.4. A szén-dioxid lézeren készített darabok szemrevételezése	40
3.5. A hegesztett minták utólagos mérési módszerei.....	45
4. Összefoglalás	59
5. Felhasznált irodalom.....	60

Tartalmi összefoglaló

Napjainkban egyre nagyobb szerepet kapnak a duplex acélok különleges tulajdonságaik miatt. Ennek az oka az anyag szerkezetében rejlik. A duplex acélok ausztenitet és ferritet tartalmaznak kb. 60/40 százalékban. Az ausztenit feladatai közé tartozik az acél jó alakíthatósága, korrózióállósága és jó hegeszthetősége. A ferritnek pedig a szilárdság biztosításában van meghatározó jelentősége. Számos iparágban kitüntetett szerep jut a duplex acéloknak, mint például a gáziparban, olajiparban vagy olyan helyeken, ahol a korrózióállóság fontos szerepet játszik. Munkám során az volt a célom, hogy megismerjem a duplex acélok hegesztési tulajdonságait a lézersugaras hegesztés feltételei között.

Ennek érdekében próbatesteket készítettem, melyeket lézersugaras hegesztés segítségével tompakötéssel összehegesztettem. A felhasznált alapanyag 1.4362 (SAF 2304) típusú duplex acél volt, mely 23% krómot és 4% nikkelt tartalmaz. A hegesztést kétféle lézersugaras géppel végeztem: egy szén-dioxid lézerrel és egy YAG-lézerrel. Mindezek mellett a hegesztés során a védőgáz összetételét is változtattam. Kíváncsi voltam rá, hogy hogyan változik a varrat tulajdonsága, ha a 100% argon védőgázhoz nitrogént keverek különböző arányban. Összességében ötféle védőgázzal és védőgázkeverékekkel végeztem el a munkát. Így a két gép összevetésén kívül még lehetőségem volt, hogy a védőgázzal is kísérletezzek.

Azért, hogy össze tudjam hasonlítani a kétféle típusú lézersugaras gépet, mindkét gépen 2500 W teljesítményt állítottunk be. Így a többi hegesztéstechnológiai tényezőt, mint például az előtolási sebességet vagy a védőgázmennyiséget, már össze lehetett hasonlítani.

Miután elkészültek a hegesztési varratok, anyagvizsgálati mintákat készítettem. A szövetszerkezet tanulmányozása végett optikai mikroszkópon vizsgáltam a mintákat. Emellett még hajlítóvizsgálatot végeztem, valamint termofeszültséget is mértem. A varrat ferrittartalmát Fischer Feritscope műszerrel határoztam meg.

Az elvégzett vizsgálatok alkalmasak voltak rá, hogy eldöntsem, milyen hegesztési tényezőkkel és védőgáz kombinációval érdemes a kísérletben szereplő, 1.4362-es típusú duplex acélt hegesztetni. Mindez további segítséget adhat más összetételű duplex acélok hegesztése során is.

Summary

Nowadays duplex stainless steels play a main role in the field of welding due to their specific characteristics. The reason for this is the material microstructure. Duplex stainless steels contain austenite and ferrite generally in proportion of 60/40. Austenite is responsible for corrosion resistance, plastic deformation and good weldability of the steel. Ferrite makes the steel particularly high strength. Duplex stainless steels have exceptional role in several industries such as oil and gas industry, or in other field where corrosion resistance is important. The aim of my work was to determine more about the welding characteristics of duplex stainless steels.

The first step was to prepare samples, which were laser welded butt welds. The used material was 1.4362 (2304) type duplex stainless steel, which contains 23 % of chromium and 4 % of nickel. The welding experiments were carried out by using two different laser welding equipments. One of them was a carbon-dioxide laser the other one was a YAG laser. Furthermore during the welding process I changed the composition of the shielding gas. I examined how the joint's feature changes if I mix the argon shielding gas with nitrogen in different proportions. Altogether I used five types of shielding gas mixtures. I experimented not just with two laser beam welding machines, but with shielding gases.

I used both machines with the power of 2500 W in order to compare the two types of laser welding machines. After that it was possible to compare the other welding parameters, for example welding speed and the quantity of shielding gas.

When the welded joints were ready, I prepared samples. Samples were examined with metallography to study the material microstructure. I also performed bending tests and I measured the thermoelectric power as well. The ferrite content of the joints was determined by a Fischer Feritscope.

This experiments and examinations were useful to define which welding parameters and shielding gas mixture are suitable for welding of 1.4362 type duplex stainless steel. Based on this, the results can help in further examinations with different combination of stainless steels' welding.

Bevezetés

Manapság a duplex acélok egyre több helyen jelennek meg, mint szerkezeti elemeknek az alapanyaga, főleg hegesztett elemeknél. Ezért is célszerű megismerni a duplex acélokat hegeszthetőségük szempontjából. A lézersugaras hegesztés ugyancsak egyre nagyobb teret hódít napjainkban a gyártástechnológiában, előnyös tulajdonságai miatt.

Így érdekes kihívásnak gondoltam, ha a duplex acélokat hegesztését lézersugaras technológiával oldanánk meg. Szerettem volna megismerni ezen alapanyag típus és gyártási technológia sajátosságait. Azt, hogy hogyan változnak az anyag tulajdonságai a varratnál, ha nem egy nagy általánosságban elterjedt hegesztési technológiával – mint például a fogyóelektródás, argon védőgázos kézi ívhegesztéssel – kerülnek meghegesztésre a darabok, hanem egy különleges, egyre jobban terjedő, de még csak korlátozott helyen alkalmazott módszerrel.

Másrészt a lézersugaras technológia jól ismert előnye a nagy termelékenység. A mai világban pedig egy gyors technológia, egy gyors gyártási folyamat előnyt élvez. Ez pedig a költségek szempontjából sem lényegtelen.

Dolgozatom gyakorlati részében először a hegesztett kötések készítem el lézersugaras technológia alkalmazásával, kísérletezve a hegesztéstechnológiai tényezőkkel. Ezt követően mérések alá vettem a kész mintákat, melyek alkalmasak voltak arra, hogy a különböző módon készült varratok tulajdonságait megismerjem. Ez információt tud szolgáltatni magáról a hegesztési módszerről, hogy megfelelően lett-e alkalmazva, vagy változtatásra szorul.

Mielőtt magát a hegesztési kísérletet elvégezném, érdemes megismerni a duplex rozsdamentes acéloknak és a lézersugaras technológiának az elméleti hátterét, melyeket az 1. és 2. fejezet részletez.

1. Duplex acélok

1.1. Duplex acélok általános jellemzői

A duplex acélok sajátossága abból áll, hogy szövetszerkezetük kétfajta szövetelemből tevődik össze. Ez az ausztenit (γ) és a ferrit (α). A duplex acélokat már az 1920-as évek óta ismerik, viszont elterjedésük csak az 1980-as években következett be. Elviekben az ilyen fajta acélokban az ausztenitnek és a ferritnek az aránya 50/50 % abból a célból, hogy ennek a kétfajta szövetelemnek az előnyös tulajdonságait egyesíteni tudjuk. A kombinálásból adódó kedvező tulajdonságként említhetjük a megnövekedett szilárdságot és korrózióállóságot. A kialakult szövetszerkezeti egyensúly alatt a ferritnek és az ausztenitnek az arányát értjük az acélon belül, melyet a mai korszerű kohászati technológiák alkalmazásával gond nélkül elő lehet állítani mind az alapanyagok, mind pedig az előgyártmányok tekintetében is. [1] [2]

Míg a kohászat során könnyedén elő lehet állítani a kívánt fázisarányt, addig a hegesztett kötés esetén ennek az aránynak a megtartása elég bonyolult feladatnak mutatkozik. Egy általános duplex acél kémiai összetétele a következőképpen néz ki:

C max= 0,03 %, Cr =22-25%, Ni=4-7%, Mo=0-4%, W=0-2%, Cu=0-1,5%, N=0,1-0,35%

Látható, hogy a szénttartalom erősen korlátozva van, melynek a fő célja a korrózióállóság biztosítása. Ugyanis a duplex acélok esetében a karbontartalmat korróziós szempontból szennyezőnek tekinthetjük. A duplex acélokban az ötvözők mennyiségének növelése a kiválások kialakulásnak fokozódását okozza, emiatt is szükséges a karbontartalom csökkentése. Az ausztenit-ferrites acéloknál akár néhány perc elteltével már megjelenhetnek a 475 °C –os elridegést okozó folyamatok, illetve fél órán belül a σ -fázis 800-900 °C között. Ez az oka annak, hogy ebből az anyagból készült szerkezeteket -50...250 °C közötti hőmérsékleten használják. Erről a lentebbi fejezetekben részletesebben esik majd szó. A két fő ötvöző közül a krómra a korrózióállóság szempontjából, míg a nikkelle a szívósság biztosítása miatt van szükség. A nitrogénnek szilárdságnövelő szerepe van, illetve a pittiggel szemben is kedvező a hatása. A fentebb említett három ötvözőt, vagyis a krómot, a nikkelt és a nitrogént minden duplex acél tartalmazza, de emellett a molibdén, a volfram és a réz is megjelenhet ötvözőként. Bár meg kell említeni, hogy a wolframmal és a rézzel való ötvözés főleg a japán, francia és angol területeken gyártott duplex acélokra jellemző. Ezzel ellentétben, a korszerű duplex acélokat kifejlesztő svéd és csak főleg kutatásokat végző német és amerikai gyártók nem használják ezt a két ötvözőt az acéljaik gyártása során. A volframra jellemző még, hogy hatása hasonló a molibdénhez, ugyanis javítja a pittiggel és a

részkorrózióval szembeni ellenállást, így kísérletek folynak azzal kapcsolatban, hogy hogyan lehetne a molibdén egy részét volframmal helyettesíteni. Ezen kutatásoknak a fő célja annak a vizsgálata, hogy hogyan hat a volfram az ausztenit és ferrit fázisstabilitásra, a σ fázis és más intermetallikus fázisoknak a kiválására. A réz korróziós szempontból fontos ötvöző a duplex acéloknál, viszont a volfram és a réz között szinergikus kölcsönhatás jön létre. [1] [5]

A duplex acéloknál az ausztenit és a ferrit szövetelemek megoszlása 50/50 %, elviekben. A kétféle szövetelem között munkamegosztás tapasztalható. Ennek keretén belül az ausztenit feladata az acél jó alakíthatóságának, szívósságának és jó hegeszthetőségének a biztosítása. A ferritnek pedig a korrózióállóság biztosításában van meghatározó szerepe, ezen belül is a pittinggel, részkorrózióval és feszültségi korrózióval szemben. A ferrit tartalom kellő meghatározása nagyon fontos a duplex acéloknál, ugyanis a ferrit csökkentése a szilárdságot és a korróziós ellenállást rontja, növelése viszont kedvezőtlen hatással van az acél szívósságára. Így az elmúlt években megváltozott az ausztenit és ferrit 50/50 %-os viszonya 60/40 %-osra a duplex acéloknál. Mindennek azonban következményei is vannak, ugyanis ekkor az acéloknál az ausztenitképzők és ferritképzők arányára is tekintettel kell lenni. Duplex acéloknál nő a Mo és a Mo+W mennyisége, minél inkább az erősebben ötvözött acélok felé haladunk. Mivel ezek ferritképző ötvözők, így az ausztenitképző Ni és N mennyiségét is növelnünk kell, hogy megmaradjon az egyensúly. [1] [5]

A duplex acélokat 4 csoportba szokták besorolni kémiai összetételük szerint. Ez a besorolás az 1.1.1. számú táblázatban látható. Az 1.1.2. számú táblázat pedig a legfontosabb duplex acélokat mutatja márkajelzésekkel és kémiai összetétellel együtt.

Típusjel	Csoportjellemzők	N	C	Ni	PREN	Jellegzetes acéltípusok
1.	23 % Cr, Mo-mentes	0,1 %	0,02 - 0,03 %	~ 4	~ 25	SAF 2304
2.	22 % Cr, 2 - 3 % Mo	0,15 %		↓ nő ↓ ~ 7	30 - 37	SAF 2205 1.4462 Carpenter 7Mo+
3.	25 % Cr, 2,5 - 3 % Mo, (esetleg Cu)	0,15 - 0,35 %			38 - 39	UR 52N Ferrallium 255
4.	25 % Cr, 3 - 4 % Mo, (esetleg W és/vagy Cu)	0,20 - 0,30 %			40 - 43	SAF 2507 UR 52N+ Zeron 100 DP3W

1.1.1. táblázat: Duplex acélok besorolása [1]

Csoport-jel	Márkanév	UNS jelölés	C _{max} [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	N [%]	Cu [%]	W [%]	PREN
1.	SAF 2304 UR 35N	S32304	0,03	0,5	1,2	23	4	-	0,1	-	-	25
2.	SAF 2205 UR 45N 1.4462	S31803	0,03	0,5	1,5	22	5,5	3,2	0,18	-	-	35
	UR 50	S32404	0,04	1,0	2,0	21	7,0	2,5	-	1,5	-	29
	Carpenter 7Mo+	S32950	0,03	0,6	2,0	27	4,8	1,7	0,25	-	-	35
	AISI 329	S32900	0,08	0,6	0,8	25	4,0	1,7	-	-	-	30
3.	Ferrallium 255	S32550	0,05	0,3	0,5	25	6,0	3,0	0,18	1,8	-	38
	UR 52N	S31250	0,03	0,3	1,2	25	6,5	3,0	0,17	1,5	-	38
4.	UR 52N+	S32550	0,03	0,3	1,0	25	6,0	3,3	0,24	1,5	-	40
	SAF 2507	S32750	0,03	0,8	1,0	25	7,0	4,0	0,30	-	-	42
	Zeron 100	S32760	0,03	0,8	0,8	25	7,0	3,2	0,25	0,7	0,7	41
	DP3W	S32740	0,03	0,3	0,5	25	6,7	3,1	0,26	-	2,0	43

1.1.2. táblázat: A legfontosabb duplex acélok összetétele és márkaneveik [1]

A duplex acélok kedvező tulajdonságai közé tartozik, hogy szilárdságuk sokkal nagyobb, mint a hagyományos ausztenites korrózióálló acéloké, melyek folyáshatára általában $R_{p0,2} = 200 - 250 \text{ MPa}$. Ez a kis folyáshatár például nyomástartó edények méretezésekor nagy falvastagságokat hozhat ki, mely kedvezőtlen. A duplex acélok folyáshatára viszont akár háromszorosa is lehet a hagyományos ausztenites acélokénál. Ezáltal duplex acélból sokkal célszerűbb egy-egy szerkezetet kialakítani, például csővezetéket, mivel a nagyobb szilárdság megengedi, hogy kisebb falvastagságokat alkalmazzunk. Ezáltal csökkennek a költségek is, ráadásul korrózióállóság és élettartam növekedés szempontjából is sokkal kedvezőbb. A 4 csoportba sorolt duplex acélok mechanikai tulajdonságait az 1.1.3. táblázat mutatja. [1] [5]

Típusjel	Mechanikai tulajdonságok		Nyúlás
	R _{p0,2} (min.) [MPa]	R _m (min.) [MPa]	
1.	400	600	25
2.	450	620	25
3.	460 - 550 *	600 - 760 *	15 - 25 *
4.	550	750 - 800	15 - 25
KO36Ti (~ 1.4541)	200	500	40

1.1.3. táblázat: Duplex acélok mechanikai tulajdonságai [1]

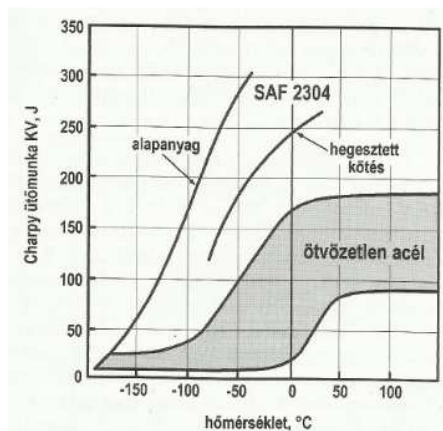
Az 1.1.4. táblázat pedig az Európában legismertebb SAF 2304, SAF 2205 típusú duplex és SAF 2507 típusú superduplex acélok mechanikai tulajdonságait részletezi.

Acéltípus	Mechanikai tulajdonságok			Nyúlás
	R _{p0,2} (min.) [MPa]	R _m (min.) [MPa]	HV	
SAF 2304	400	600 - 820	25	230
SAF 2205	450	680 - 880	25	260
SAF 2507	550	800 - 1000	25	290

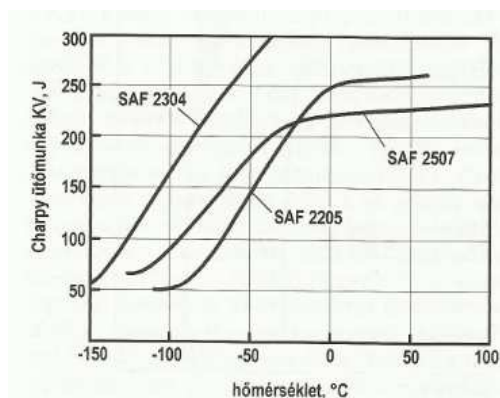
1.1.4. táblázat: Ismertebb duplex acélok mechanikai tulajdonságai [1]

A duplex acélok gyártásakor a cégek a megfelelő szívósságot képesek biztosítani különösebb nehézségek nélkül. Az 1.1.1. ábrán a SAF 2304-es duplex acél Charpy

ütőmunkája van összehasonlítva ötvöztelen acélokéval a hőmérséklet függvényében. Valamint az 1.1.2. ábra az 1.1.4. táblázatban bemutatott acélok ütőmunkáját ábrázolja ugyancsak a hőmérséklet függvényében. [1]



1.1.1. ábra: A SAF 2304-es duplex acél ütőmunkájának összehasonlítása ötvöztelen acélokéval [1]



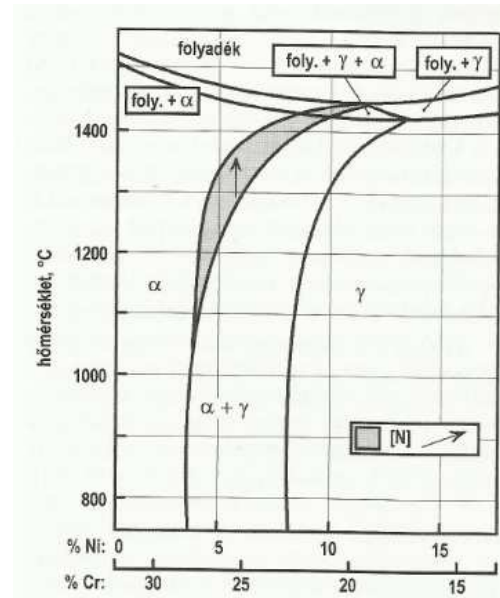
1.1.2. ábra: Fontosabb duplex acélok ütőmunkája a hőmérséklet függvényében [1]

Ütőmunka tekintetében a gyártók már képesek akár $KV > 100J$ -t is biztosítani $-120^{\circ}C$ -on, a szokásos $KV=40 J$ vagy $KV=27 J$ helyett. Viszont az igazi probléma a hegesztett kötés kialakításánál van. Ugyanis a kialakított varratnál és hőhatásövezetnél a megfelelő szívósság csak nehezen garantálható - $40^{\circ}C$ alatt. A duplex acélok felhasználási hőmérséklete maximálisan $280-325^{\circ}C$ -ig tekinthető, mivel ezen hőmérséklet felett már olyan kiválások jönnek létre üzemelés közben, melyek igencsak ridegítő hatással bírnak. [1]

1.2. Duplex acélok anyagtanai vonatkozásai

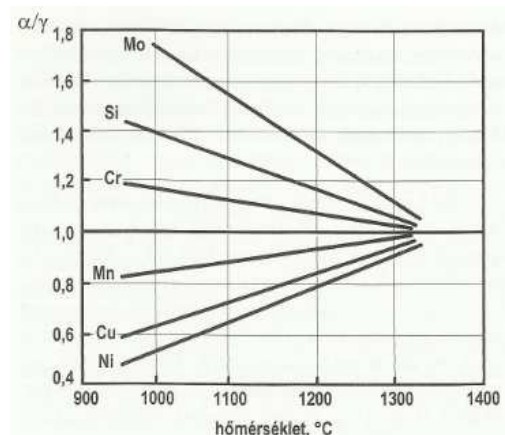
A duplex acélok elterjedése az 1970-es évek végén következett be, mivel a technika ekkorra állt már készen arra, hogy a kis karbontartalmú acélokat könnyen elő tudja állítani. Csak ekkor vált lehetővé, hogy a pontos kémiai összetételt megfelelően ellenőrizni lehessen a

gyártmányoknál, mely elengedhetetlen feltétel duplex acélok előállításánál. Az előző fejezetben említésre került, hogy napjainkban a duplex acélok ausztenit/ferrit fázisaránya 60/40 %-ra tolódott el. A nagyobb ausztenit arányt az ausztenitképzők mennyiségének növelésével érik el. Ennek a pontosabb megértéséhez ad segítséget az 1.2.1. ábra.



1.2.1. ábra: 68 % Fe tartalmú Fe-Cr-Ni fázisdiagram [1]

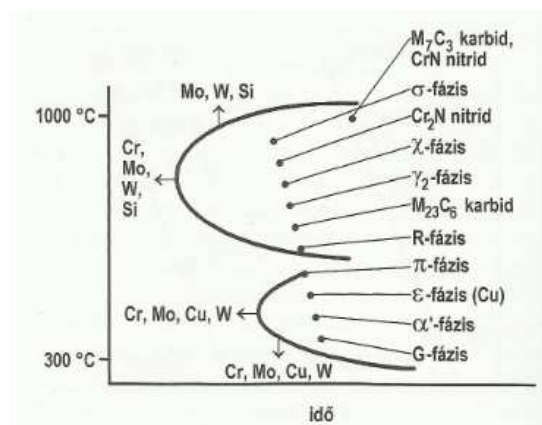
Az 1.2.1. ábrán egy Fe-Cr-Ni fázisdiagramot láthatunk, 68% Fe esetén. Észrevehetjük, hogy a kialakuló szövetszerkezet a kémiai összetételtől függ, melyet pontosan ellenőrizni kell. A diagram mutatja, hogy a ferrit és az ausztenit szerkezet csak szűk tartományban tud létrejönni, így ez meghatározza egyértelműen a felhasználható duplex acélok összetételét. Erre a szűk kémiai összetételi sávra azért van szükség, mivel biztosítani kell a megfelelő ferrit/ausztenit arányt, nem elég csak a ferrit-ausztenit mezőn belül lenni. Mindehhez szükséges az ausztenitképzők (C, Ni, Cu) és ferritképzők (Cr, Mo, W) egyensúlya, mely biztosítja a szövetszerkezeti egyensúlyt is. A különböző ötvözői a duplex acélnak nem egyenletesen oldódnak a szövetszerkezetben, az ausztenitképzők az ausztenitben, a ferrit- illetve karbidképzők a ferritben dúsulnak. Fontos megemlíteni, hogy minden duplex acél ferritként kristályosodik, majd ezt követően alakul át a hűlés során a ferrit egy része ausztenitté. Tehát a duplex szerkezet szilárd állapotban jön létre. Az ötvözők eloszlását az 1.2.2. ábra mutatja a ferrit –és ausztenitzemcsék között. [1]



1.2.2. ábra: Az ötvözők eloszlása a ferrit és ausztenit szemcsék között [1]

A nitrogénnek fontos szerepe van duplex acélok esetében. Nagy hőmérsékletű folyékony acéloknál a nitrogén oldhatósága függ a kémiai összetételtől. A króm növeli a nitrogén oldhatóságát folyékony acélokban. Vizsgálatok bebizonyították, hogy a ferrit/ausztenit fázishatárán nagyobb a nitrogéntartalom, mint az ausztenit szemcse belsejében, mivel a nitrogén oldhatósága nagyobb a fázishatáron, mint a szemcsén belül. [1]

Duplex acélok vizsgálata során figyelmet kell fordítani a különböző kiválásokra, melyek az anyagon belül alakulhatnak ki. A σ -fázis csak Mo ötvöztetés esetén alakul ki, 600-1000 °C hőmérsékleti tartományban. Minél nagyobb az ötvöztetőtartalom, annál nagyobb a σ -fázis kiválásának a valószínűsége. Egyéb kiválás a χ -fázis, mely 700-850 °C között alakulhat ki. Mind a σ -fázisnak, mind pedig a χ -fázisnak ridegítő hatása van, valamint a korrózióállóságot csökkentik. A króm-nitrid kiválás a ferrit szemcsék határán alakul ki, melynek hatására a környezete krómban elszegényedik, így a króm biztosította korrózióállóság mértéke nagyban csökkenni fog. Ezért szoktak ilyen esetben króm túlótvöztetést alkalmazni, hogy a kiválás miatt megkötődött krómot pótolják vele és ne alakuljon ki a korrózióállóság csökkenése. A ridegedést okozó R-fázis 550-650 °C között jön létre, míg a τ -fázis hasonló hőközben létrejövő tűs kiválás. Az 1.2.3. ábra a duplex acélokban előforduló kiválásokat mutatja. A különböző karbid-és ferritképzők a kiválások képződési hőmérsékletét növelik, valamint az inkubációs időt csökkentik, vagyis a kiválások hamarabb alakulnak ki.



1.2.3. ábra: A duplex acélokban előforduló kiválások [1]

A kialakuló π -nitridek ridegedést okoznak alacsonyabb hőmérsékleten, kiválásuk 550-600 °C között jön létre. Az alacsonyabb hőmérsékleti kiválások közül az α' fázisnak van nagy jelentősége. Ezt a 475 °C elridegedésként is ismerhetjük, amely során Cr-ban dús ferrites zónák alakulnak ki. A kevésbé ötvözött duplex acélokban az 5 leggyakoribb kiválás a Cr_2N , az M_{23}C_6 , a χ -fázis, a σ -fázis és az α' -fázis. [1]

Redjaimia és társai által végzett vizsgálatok kimutatták, hogy a σ - és χ - fázisok az ausztenitben jelennek meg 650-970 °C között. A χ - fázis kisebb hőmérsékleten jön létre, mint a σ - fázis, viszont izotermikus állapotok esetében a χ - fázis létrejöttéhez több idő kell. Például a SAF 2205-ös acélon végzett kísérletek során, 800 °C-on 200 óráig tartó hőntartás után a σ -fázis mennyisége meghaladta az 50 %-ot, a maradék 50 % pedig az át nem alakult δ -ferrit illetve ausztenit volt. Ilyen körülmények között a σ -fázis létrejöttéhez legalább 15 perces inkubációs idő kell. [1]

Mint ahogy a fentebbi pár oldalban láthattuk, a kialakuló kiválások miatt a duplex acélból készült szerkezeti elemek maximális üzemi hőmérsékletét korlátozni kell körülbelül 280-325 °C-on. Sok iparágban, ahol alkalmazásra kerülnek a duplex acélok nem mindig éri el az üzemi hőmérséklet ezt a maximális értéket, viszont a korróziós problémákra megfelelő ez az acélfajta. A fejlettebb országokban leginkább elterjedt duplex acélfajták a SAF 2304, a SAF 2205 és a SAF2507 jelölésűek, így célszerű ezen típusokat közelebbről megismerni, felhasználási területüket körbejárni. [1]

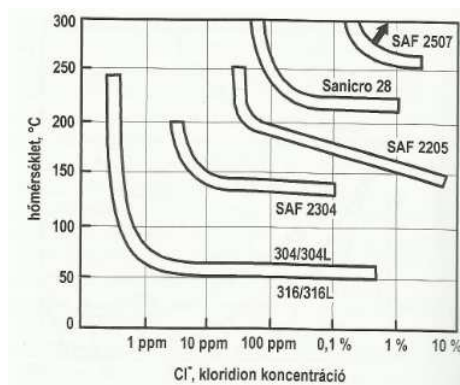
1.3. A 2304-es duplex acél felhasználási területei

A SAF 2304-es jelölésű duplex acél felhasználási területei:[1]

- Csöveknél és hőcserélőknél, ha bennük kloridtartalmú közeg áramlik. Ekkor az anyag feszültségi korrózióval szembeni nagyobb ellenállását használjuk ki.

- 325 °C –os üzemi hőmérsékletig gőzfűtés esetén, ha korróziós problémák vannak
- Ausztenites és ötvöztelen acélok helyett a korrózióállóság javítása érdekében a petrokémia iparágban
- Az olaj- és a gáziparban hűtőberendezéseknél.

Mint ahogy az a fentebbiekben is említve volt, a duplex acélok igen jól ellenállnak korróziót okozó, főleg kloridos közegekkel szemben. Mivel az 1970-es években az akkori korrózióálló acélok nem feleltek meg minden alkalmazásra, így kezdtek a duplex acélok a figyelem középpontjába kerülni. Sok kutatás folyt a duplex acéloknak a kloridos közeggel való ellenállásával kapcsolatban, így számos kutatási eredmény áll a rendelkezésünkre. Ilyen például az 1.3.1. ábrán látható diagram is, mely szerint a hagyományos ausztenites korrózióálló acélok már 50 °C-on feszültségi korróziót szenvednek, míg a SAF 2304, SAF 2205 és SAF 2507 típusú duplex acélok sokkal jobb ellenállást mutatnak a feszültségi korrózióval szemben.



1.3.1. ábra: Különböző típusú acélok feszültségi korrózióval szembeni ellenállása [1]

Ez a jobb ellenállás az ausztenites acélokkal szemben azzal magyarázható, hogy a duplex szerkezetben a ferrit részek megakadályozzák a feszültségi korróziós repedéseknek a terjedését.

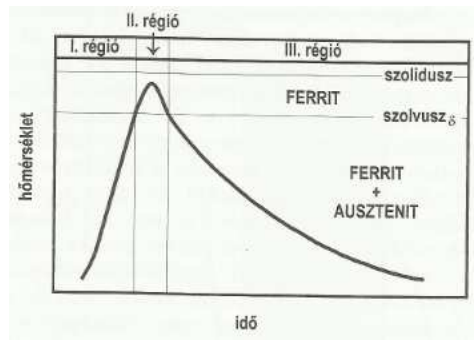
1.4. Duplex acélok hegesztése

Napjainkban egyre nagyobb figyelmet fordítanak a szakemberek a duplex acélok hegesztésére. A duplex acélok térhódítása nem valósulhat meg azok hegesztési tulajdonságainak részletes megismerése nélkül. Ugyanis hegesztés során olyan változások jöhetnek létre mind a varratfémbe, mind pedig a hőhatási övezetben, amelyek nagyban befolyásolják a hegesztett kötés tulajdonságait. A duplex acélok jellegzetes

szövetszerkezetének kialakulása ferrites megszilárdulással indul, vagyis ferrit alakul ki először, majd ebből jön létre a későbbi szerkezet. Ezután fog megjelenni a ferrit egy részéből az ausztenit. 1420 °C hőmérsékleten kezdődik meg az ausztenit képződése, mely egészen 800 °C-ig tart.[1] [10]

Fontos megjegyezni, hogy a kialakult varrat és a hőhatásövezet a kémiai összetételnek, valamint a hegesztési hőfolyamatnak a függvénye. A hűlés sebessége általában hegesztés után olyan nagy, hogy nem tud megfelelő mennyiségű ausztenit létrejönni, így a kialakult ferrit túlsúlyban lesz az egyensúlyi értékhez képest. Lézersugaras hegesztés során nagy hőkoncentráció jön létre, ezért gyors kristályosodás fog megvalósulni. Minél gyorsabb a hűtés, annál kevésbé fog lejátszódni a $\delta \rightleftharpoons \alpha$ átalakulás. Termodinamikai okok miatt lehetetlen, hogy több ausztenit alakuljon ki, mint az egyensúlyi érték lágyított állapotában. Emiatt van az, hogy a hegesztőanyagot 2-4 % ausztenitképző nikkellel túlótvözik, ezáltal megnövelve a keletkező ausztenit mennyiségét. Az ausztenit keletkezése csíráképződéssel, majd annak növekedésével valósul meg diffúzió által. Ha a hűlési sebesség kicsi, akkor a diffúciónak van ideje létrejönni, ezáltal több ausztenit fog kialakulni. Ha a hűlési sebesség nagy, akkor a szubsztitúciósan oldódó elemek, mint amilyen a króm, nikkel vagy a molibdén, egyenlő arányban oszlanak meg a ferrit és az ausztenit fázisok között. A karbon és a nitrogén intersztíciós ötvözők révén nagymértékben az ausztenitben jelennek meg. Mint ahogy már említve volt, ha gyors a hűtés, akkor a ferrit mennyisége megnő és olyan részek alakulnak ki, melyek nitrogénelnyelőként mutatkoznak az ausztenit szigetek között. [1] [5]

Az intermetallikus fáziskiválások megjelenhetnek hegesztéskor mind a varratban, mind a hőhatásövezetben. A kiválások valószínűsége nő, ha az ötvözőtartalmat növeljük, ez főleg érvényes a szuperduplex acélokra. A kiválások leggyakrabban a ferrit szemcsék határán, vagy a ferrit/ausztenit fázishatáron észlelhetők. Nagyobb mennyiségben jelennek meg a kiválások a varratfémbe, mint a hőhatásövezetbe. Ez a varratfém nagyobb ötvözőtartalmával magyarázható. Mindezek mellett a hőhatásövezetre is nagyobb figyelmet kell szánni, ugyanis itt az eredeti állapothoz képest megnő a ferrit mennyisége, valamint kiválások is létrejönnek. A hőhatásövezetet két részre szokták bontani, egy nagyobb hőmérsékletű és egy alacsonyabb hőmérsékletű zónára. A nagy hőmérsékletű részben teljes mértékben ferrit a szövetszerkezet, míg a kis hőmérsékletű zónában megmaradt a duplex acélok jellemző fázisok egyensúlya. Az előzőekhez kapcsolódóan egy hőciklus- diagramot láthatunk az 1.4.1. ábrán.



1.4.1. ábra: Duplex acélra jellemző hegesztési hőciklus diagram [1]

Az I. régióban a gyors hevítés gátat fog szabni az ausztenit és a kiválások oldódásának, viszont ha a hevítés lassú, akkor van idő az ausztenit feloldódására az egyensúlyi szolvusz hőmérsékleten, vagy ennek a közelében. A II. régió a szolvusz feletti tartózkodását mutatja az anyagnak, mely teljesen a ferrites mezőben valósul meg. Kutatók megfigyelés szerint a hőhatásövezetben létrejövő szemcsedurvulás függ az anyagnak az 1200 °C-ról 800 °C-ra való lehülési idejétől. Ezt szokták $\Delta t_{12/8}$ -as időtartamnak nevezni. A III. régió pedig a szolvusz hőmérséklete alatti idő és hőmérséklet kapcsolatát mutatja meg. Az előzőekből tehát láthatjuk, hogy milyen gondosan kell megválasztani a hegesztési paramétereket. Megfelelően lassúnak kell lennie a hűlés sebességének, hogy kellő mennyiségű ausztenit keletkezhesen, de elég gyorsnak is kell lennie, hogy szemcsedurvulás és kiválások ne jöhessenek létre. Duplex acéloknál javasolt a 8-30 másodperc hűtési idő, mely az anyagnak a 800 °C-ról 500 °C-ra való lehülését jelenti.[1]

Korábbi utalásokból már kiderült, hogy a duplex acélok nem terjedhetek volna el ennyire, ha hegesztésük nem lenne megoldható biztonságosan. Bár ezen anyagok jól hegeszthetők, mégis ez nehezebben kivitelezhető, mint ausztenites acélok esetén. Ha hegesztőanyag nélkül végezzük a hegesztést, akkor a varrat 80 %-ban lesz ferrites, mely szívóssági és korróziós gondokat okozhat. Ekkor ajánlott oldóizzítást és gyors lehűtési hőkezelést végezni. Fontos szerepe van a hegesztési salaknak metallurgiai szempontból is, főleg bevont elektródás kézi ívhegesztéskor és fedettívű hegesztéskor. Az, hogy a keletkező salak bázikus, rutilos vagy savas nagyban befolyásolja a varrat hidegszívósságát. Bázikus salak esetén alakul ki nagyobb szívósság. Duplex acéloknál nagyobb figyelmet kell fordítani a gyökvarrat kialakítására, mint ausztenites korrózióálló acélok esetében. Gyökvédő gázként főleg nitrogént vagy nitrogén-hidrogén keveréket szoktak használni. Fontos, hogy el kell kerülni a gyökhígulást. Ez azt jelenti, hogy a gyök nem fog kellő mennyiségű nikkelt tartalmazni, így a szívóssági tulajdonságok romlani fognak. A kevesebb nikkel tartalom pedig

abból adódik, hogy a gyökvarrat összetétele inkább az alapanyagéra hasonlít. Így célszerű csökkenteni az alapanyag hányadát a gyökvarratban, melyet megfelelő nagyságú illesztési hézaggal és nagyobb leélezéssel lehet megvalósítani. Előmelegítés általában nem szükséges duplex acéloknál, maximum akkor, mikor nagy falvastagságról van szó (20mm-nél vastagabb), vagy ha a szerkezet alakváltozásban gátolt, esetleg a pára eltávolítására. De ekkor is maximálisan 150 °C az előmelegítés mértéke. A hegesztés közbeni hőbevitelnek fontos szerepe van duplex acélok hegesztésekor, vagyis a q/v aránynak. Ezt a hőbevitelt igen szűk tartományra kell korlátozni. Az 1.4.1. táblázat adatokat tartalmaz a hőbevitel értékéről különböző hegesztési módszerek esetén. [1] [5]

A hegesztési hőbevitel nagysága	Gyökvarrat, AVI/TIG		Feltöltővarrat, bevont elektródás kézi ívhegesztés	
	q/v [kJ/mm]	Δt_{12-8} [s]	q/v [kJ/mm]	Δt_{12-8} [s]
Kis hőbevitel	0,4 - 0,5	1,8 - 2,05	0,5 - 0,6	3 - 8
Közepes hőbevitel	0,9 - 1,1	3,5 - 4,1	0,9 - 1,3	7 - 11
Nagy hőbevitel	1,9 - 2,5	7 - 9	2,2 - 2,5	13 - 31

1.4.1. táblázat: Hőbevitel értékek különböző hegesztési eljárásoknál [1]

Különösen kismértékű hőbevitelt szabad alkalmazni gyökvarratok esetében. Méginkább korlátozás szükséges a szuperduplex acéloknál, mivel itt kiválásokra kell számítani, így a q/v érték 0,2-1,5 kJ/mm szokott lenni. Többbrétegű hegesztés során pedig a rétegek közötti hőmérséklet maximálisan 150 °C lehet. [1]

1.5. Újabb duplex acélok hegeszthetőségi kérdései

Napjainkban egyre több duplex acél típus kerül forgalomba, melyek tulajdonságait érdemes közelebbről is megismerni több nézőpontból is. Ehhez célszerű különböző vágási, hegesztési, felületkezelési eljárásokat végezni az adott anyagokon, majd a megmunkált darabokat vizsgálati módszerekkel közelebbről tanulmányozni. Érdekes eredményeket mutatnak Sándor Tamás által LDX2101 típusú duplex acélokon végzett hegesztési kísérletek. Ennek során a darabokat volfram elektródás kézi ívhegesztéssel, illetve aktiváló poros volfram elektródás kézi ívhegesztéssel kötötték össze kétféle védőgáz alkalmazásával. A két védőgáz 100% argon, valamint argon+5% nitrogén volt. A hőbevitel 0,4-0,5 kJ/mm értéken volt tartva hegesztés közben. Erre azért volt szükség, mivel a hűlési sebesség növekedésével egyre több ferrit keletkezne, mely korróziós és szívóssági gondokat okozna. Végül a meghegesztett darabokat ausztenit/ferrit arány vizsgálat alá vetették. [2]

A kísérleti munka során 3 mm vastag LDX2101 típusú duplex acél lemezek lettek meghegesztve a fentebb említett technológiákkal. A vizsgálat kiterjedt a védőgáz típusára, a hőbevitel értékére és a hegesztési sebesség hatására is. A beállított áramerősségek 90 A és 150 A voltak, a hegesztési sebességek pedig 13 és 21 cm/ perc. A védőgáz és a gyökvédőgáz is változtatva volt. A beállításokat az 1.5.1. táblázat mutatja.[2]

Sorszám	Védőgáz	Formálógáz	Eljárás	Aram	Fesz.	Heg.seb.	Heg.seb.	Hőbevitel	Alapanyag
				(A)	(V)	(cm/perc)	(mm/s)	(kJ/mm)	
L1	Ar	Ar + 5%N2	TIG	90	9,7	13	2,17	0,403	2101
L2	Ar	Ar + 5%N2	ATIG	90	11,5	13	2,17	0,478	2101
L3	Ar	Ar + 5%N2	TIG	150	11,2	21	3,50	0,480	2101
L4	Ar	Ar + 5%N2	ATIG	150	12,7	21	3,50	0,544	2101
L5	Ar + 5%N2	Ar	TIG	90	10,5	13	2,17	0,436	2101
L6	Ar + 5%N2	Ar	ATIG	90	11,2	13	2,17	0,465	2101
L7	Ar + 5%N2	Ar	TIG	150	10	21	3,50	0,429	2101
L8	Ar + 5%N2	Ar	ATIG	150	10,7	21	3,50	0,459	2101

1.5.1. táblázat: A hegesztési paraméterek beállításai [2]

Az elkészült darabokból csiszolatok készültek, majd ferrittartalom mérés következett. A ferrittartalom mérése mind a korona részen, mind pedig a varrat közepén megtörtént, egyes esetekben pedig a gyökoldalon is. [2]

Az eredményeket tanulmányozva elmondható, hogy kis hőbevitelnél nagy ferrittartalmak jöttek létre argon védőgázos kézi ívhegesztésnél. Ha a védőgáz nitrogént is tartalmazott, akkor a ferrittartalom csökkent ugyan, de nem megfelelő mértékben, így célszerű ilyenkor nagyobb mennyiségű ausztenitképzőt tartalmazó hegesztőanyagot is adagolni a varrathoz. Aktiválópor alkalmazásakor a kialakult ferrittartalmak már kisebbek voltak ugyan, de ez még mindig nem volt megfelelő. Ha az aktiválópor mellé argon+nitrogén gáz keverék volt alkalmazva védőgázként, akkor már az ausztenit mennyisége megfelelőnek mondható. Ez a nitrogén nagyobb mértékű bekeveredésének köszönhető, mely az aktiváló por hatására következett be a fordított Marangoni- hatás miatt. [2]

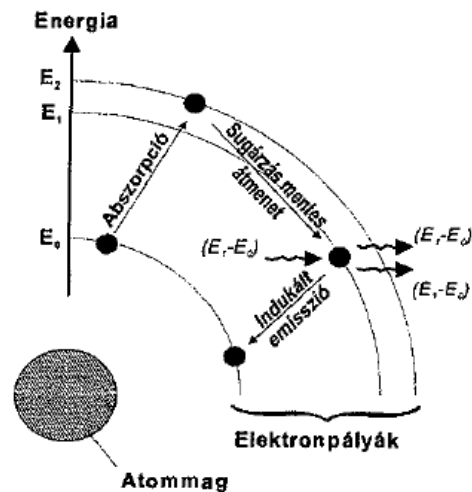
Tehát összefoglalásul elmondható, hogy volfram elektródás kézi ívhegesztéskor kis hőbevitel esetén célszerű ausztenitképzőket tartalmazó hegesztőanyagot adni a varrathoz, mivel ha túl sok a ferrit, az korróziós és szívóssági gondokat szülhet. Aktiválóporos volfram elektródás kézi ívhegesztésnél argon gázzal nem igazán hozható létre a kívánt szövetszerkezet, de nitrogént is tartalmazó védőgázzal már megfelelő ausztenit mennyiség érhető el.[2]

2. Lézersugaras megmunkálások

2.1. A lézerről általánosságban

A LASER szó magyarul „fényerősítés a sugárzás indukált emissziójával” kifejezést jelent. A lézer olyan nagy energiájú monokromatikus sugárzás, melynek a létrejöttéhez indukált emisszió szükséges. Miután a lézer használata biztonságossá vált, a szakemberek figyelme arra irányult, hogy ennek a jelenségnek a gyakorlati hasznát is felfedezzék és bevezethessék a mindennapokba. Így alakult ki, hogy a lézer gyakorlati felhasználása nagyon széles körre tágult napjainkra. Nemcsak a tudományos kutatásokban és orvostechikában, hanem a hírközlési és információs technikában is már nélkülözhetetlen. A lézerrel kialakítható alkatrészek mérete igen széles tartományban mozog, a mikroelektronikától egészen a nagyméretű gépalkatrészekig. A lézernek ilyen mértékű elterjedését annak kedvező tulajdonságai tették lehetővé, mint például a bonyolult alkatrészek kialakítása, érintkezésmentes megmunkálás vagy a nagy energia koncentráció. A lézersugár haszna főleg abban is rejlik, hogy vele hegesztést, vágást, felületkezelést és anyagleválasztást is lehet végezni, mindezt modern CNC vezérlés alkalmazásával is. Dr. Bauer Ferenc a Hegesztési eljárások című könyvében megfogalmazza a lézersugaras hegesztés elvét. Ennek során egy olyan berendezést használunk, mellyel nagy energiasűrűséget tudunk létrehozni azáltal, hogy a lézersugarat kis átmérőjű foltba koncentráljuk különböző optikai rendszerekkel. [3] [4]

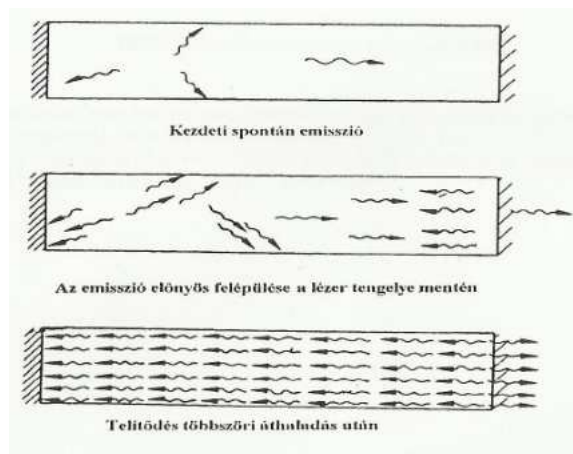
Ha a lézertechnológiával foglalkozunk, akkor célszerű tisztázni néhány fogalmat, melyek igen fontosak. Ilyen az abszorpció, az indukált emisszió és a populáció-inverzió. Az abszorpció során az atommag körül keringő elektron energiát nyel el, ezáltal egy magasabb energiaszintre kerül. Alapállapotba úgy tud visszajutni, hogy fotont sugároz ki. Az indukált emissziót egy foton ütközése váltja ki, viszont ez a foton nem fog elnyelődni, hanem hatására egy másik foton fog kilépni a gerjesztett anyagból. Ehhez viszont arra van szükség, hogy egy foton 50 %-nál nagyobb valószínűséggel ütközzön a gerjesztett részecskével. Tehát a részecskék több mint 50 %-nak gerjesztett állapotban kell lennie, hogy ez meg tudjon valósulni. Ezt az állapotot nevezzük populáció-inverziónak. Az abszorpció és indukált emisszió folyamatát a 2.1.1. ábrán láthatjuk. [5]



2.1.1. ábra: Az abszorpció és az indukált emisszió folyamata [5]

A lézereket többféle módon is tudjuk csoportosítani. Üzem mód szerint megkülönböztetünk folytonos és impulzus üzemet, az aktív anyag szerint pedig gáz, folyadék és szilárd lézereket. A folyamatos működésű (CW) lézereknél a kisugárzás mértéke megegyezik a gerjesztő forrásból érkező energia bevitellel, ekkor a teljesítmény folyamatosan rendelkezésre áll. Szilárdtest lézereknél a gerjesztést villanólámpákkal, intenzív fényforrásokkal hozzák létre. Az impulzusosan létrejövő gerjesztéskor a kialakult sugár is impulzus jellegű lesz, ezeket hívjuk impulzuslézereknek. Tehát folytonos esetben az energiaszintek között előfordulhatnak átmenetek, ezáltal széles hullámhossztartományt lefedő sugárzást lehet kialakítani. Szelektív sugárforrásnál viszont keskeny sávú sugárzás van, ekkor az energia átmenet csak 1-2 energiaszintre korlátozódik. [3] [4] [5]

A lézer sugárforrást rezonátornak nevezzük. Ebben atomokon, molekulákon, ionokon inverziót valósítunk meg a gerjesztés energiaszintjén. Az alapállapotba való visszajutás a meghatározott hullámhosszúságú sugárzás kibocsátása után következik be, közben pedig újabb indukált foton jön létre. A kiváltott foton energiája és fázisa megegyezik az első fotonéval, ezért van a lézernek koherens tulajdonsága. Az lézerfény erősödésének folyamatát a 2.1.2. ábra mutatja.[3]



2.1.2. ábra: A lézerfény erősödésének folyamata [3]

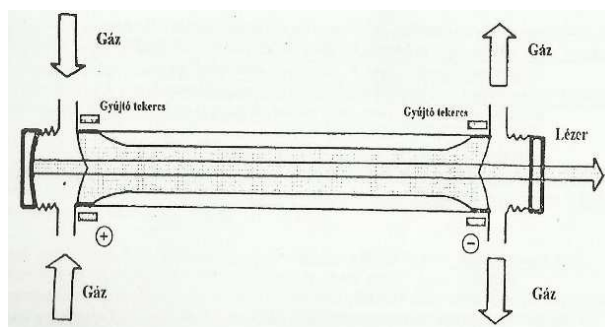
A lézerfénynek számos fontos tulajdonsága van, ezek közül talán a három legfontosabb, hogy monokromatikus, kis divergenciájú, illetve térben és időben koherens. A monokromatikusság azt jelenti, hogy a lézerfény egyszínű, azonos hullámhosszúságú. Kis divergencia alatt a párhuzamos, nem széttartó nyalábot értjük. Ha a hullámok azonos fázisban és térbeli, időbeli kezdő helyzethez kötötten haladnak, akkor azt mondjuk, hogy térben és időben koherensek. Azt, hogy a lézerfénynek milyen a hullámhossza az határozza meg, hogy milyen az energiaszintek közti különbség és milyen az optikai üreg rezonancia hullámhossza. Vagyis a lézer anyaga és a rezonátor együttesen. A jellemző hullámhossz nagyban befolyásolja a fókuszáláskor létrehozható minimális átmérőt, valamint az abszorpció mértékét. A lézerfény divergenciája, vagyis szóródása igen kicsi, csak néhány milliradián. Ez az oka annak, hogy nagy pontosságú megmunkálásoknál olyan előszeretettel alkalmazzák a lézert, mivel a kilépő fény nem sugároz minden irányba. A divergencia mértéke függ a rezonátor méretétől és optikájától, vagyis a lézertükröktől. A síktükrök kisebb divergenciát okoznak, mint a görbe tükrök. Ha a divergencia kicsi, akkor az optikai elemek méretét csökkenteni lehet, valamint a lézersugár intenzitása nagy messzeségben is érzékelhető. Térbeli koherencia a sugár haladási irányára merőleges síkban lévő fázisösszefüggést mutatja. Az időbeli koherencia viszont a terjedés irányában megjelenő fázisösszefüggést adja meg. Tehát ha azonos hullámhosszúságú fotonokról van szó, akkor a haladási irányukra merőleges síkon úgy haladnak keresztül, hogy megegyező lesz a periódusuk, haladási irányuk és hullámhelyzetük. [3] [5]

Nagyon fontos jellemzője még a lézernek a teljesítménye is, mely a fénysugár egységnyi időre vonatkoztatott munkavégző képessége. A teljesítmény fogja meghatározni, hogy felületkezelést, vágást vagy hegesztést tudunk végezni a gépen. A teljesítményt a

gerjesztés módja és erőssége, a gerjesztési energia elnyelődési sebessége, a lézerátmenet fajtája és a lézeranyag mennyisége határozza meg. A teljesítmény sűrűsége alatt a megmunkálandó felületre besugárzott teljesítménynek és a felületnek a hányadosát értjük. Ennek kiszámításához szükség van a lézersugár keresztmetszetére, melyet a sugár rádiuszából tudunk meghatározni. Annak a kör keresztmetszetnek a sugarát vesszük ilyenkor figyelembe, ahol a lézer teljesítményének 86 %-a van jelen. Elmondhatjuk, hogy a lézersugár nagy előnye, hogy fókuszálása után nagy teljesítménysűrűségek valósíthatók meg vele. [5] [3]

2.2. Fontosabb lézer típusok

A gépészetben lézerátmenetek közül csak néhányat használnak, mint például szilárdtestlézerek esetében rubint és neodímiumot (Nd), gázlézereknél szén-dioxid lézert. Legjobban az iparban a CO_2 gázlézerek vannak elterjedve. Kedvező tulajdonságaik, hogy nagy teljesítményűek és hullámhosszuk nagy. Anyagmegmunkálásokra 5 kW-ig használják őket. Annál nagyobb az adott lézer teljesítménye, minél nagyobb a gerjesztett anyag térfogata, így a CO_2 lézerek hosszú rezonátorcsövet igényelnek. Ennek a hosszát viszont nem lehet a végtelenségig növelni, ezt többször is megtörik a helytakarékosság végett, a törési helyekre pedig reflektáló tükröket állítanak be. A nagyobb teljesítményű lézereknél a beindítás során legelőször vákuumot kell létesíteni a gázrendszerben, majd ezután következik a lézergázzal való feltöltés. A CO_2 gázhoz még héliumot és nitrogént is szoktak hozzáadagolni. A nitrogén szerepe, hogy a CO_2 molekulákat gerjesztett állapotban tartsák. Ha a CO_2 molekula egy alacsonyabb energiaszintre jut vissza, akkor fotont fog kibocsátani, viszont még ekkor sem kerül alapállapotba, mivel annál egy kicsivel nagyobb lesz az energiája. Ha a következőkben ismét hatásosan szeretnénk gerjeszteni a molekulát, akkor ezt a maradék energiát is le kell adnia. Ezért szükségesek a hélium atomok, mivel ezek ütköznek a CO_2 molekulákkal, ezáltal a többlet energiájukat elnyelik. Közben hő keletkezik, melyet el kell vonni nagy teljesítményű hőcserélő berendezésekkel. A nagyobb teljesítményű CO_2 lézerek legfontosabb elemei a rezonátor, a gázhűtő és a gázt keringető szivattyú. Megkülönböztetünk hosszarámlású rezonátorcső kialakítást, ahol a lézer optikai tengelye megegyezik a gáz áramlási irányával, valamint keresztarámlásút, ahol a gáz áramlása merőleges a tengelyre. A 2.2.1. ábrán egy axiális áramlású szén-dioxid lézer rezonátorát láthatjuk. [5] [3]

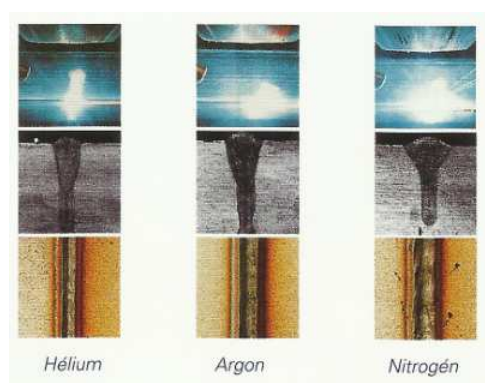


2.2.1. ábra: Axialis áramlású szén-dioxid rezonátor felépítése [3]

A rezonátor gázzal már esett szó az előző bekezdésben Lézersugaras vágás során vágógázt, hegesztés során védőgázt célszerű használni. Vágógázként a Messer ajánlása alapján ötvöztelen acélok lézersugaras vágásához 3.0 minőségű oxigént vagy 3.5 minőségű Oxycut nevű gázt használnak. Magas ötvöztetésű acéloknál autogén vágáshoz nitrogént, valamint argont is alkalmaznak. Hegesztéskor főleg héliumot és argont szoktak felhasználni, melyekhez aktív adalékanyagokat tesznek hozzá a feladattól függően. A 2.2.1. táblázatban a vágógázokról kapunk néhány információt ugyancsak a Messer ajánlásával. A 2.2.2. ábrán pedig a különböző vágógázokat tudjuk összehasonlítani. [8]

Vágógáz tisztasága		Lézersugaras vágás		
Gázfajta	Tisztaság	Anyag	Vágás-gáz	
Argon	4,6		Oxigén	Nitrogén
Oxigén-Oxycut	3,0-3,5	ötvöztelen acél	X	-
Nitrogén-Nitrocut	5	magasan ötvöztött	(X)	X
		alumínium	(X)	X

2.2.1. táblázat: Leggyakoribb vágógázok (X=kiválóan alkalmas, (X)= feltételesen alkalmas) [8]



2.2.2. ábra: Vágógázok összehasonlítása [8]

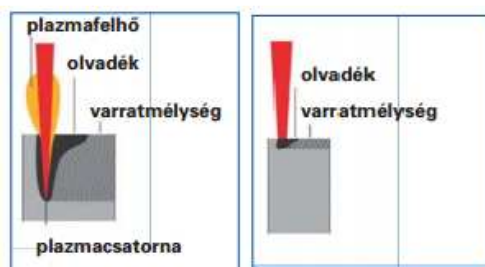
A szilárdtest lézerek kisméretűek, valamint kompakt kialakításúak. Szilárdtest lézerek közül a Nd:YAG lézert nagyobb termelékenységű megmunkálásoknál alkalmazzák, mivel sokáig lehetséges vele dolgozni túlmelegedés valamint teljesítménycsökkenés nélkül.

Csúcsteljesítménye elérheti a 10 kW-ot is, de mivel impulzus üzemmódban van használva, így névleges teljesítménye kisebb, mint a CO_2 lézernek. Mivel a hullámhossza 1064 nm, így ez lehetővé teszi, hogy a lézersugarat optikai kábelben keresztül lehessen vezetni. Divergenciája 3 milliradián, hatásfoka 1-4 % körül van. A tükrök kivételével a rezonátor a rezonátorházban helyezkedik el, mely vízűtéssel rendelkezik. [5]

Ha a kétféle lézertípust szeretnénk összehasonlítani teljesítmény szempontjából, akkor azt mondhatjuk, hogy a szilárdtest lézerek nagyobb teljesítménnyel rendelkeznek. Ez azért van, mivel ezeknél egységnyi térfogatban sokkal több gerjeszthető elem van, mint gázlézereknél. Ha a gázlézerek teljesítményét akarjuk növelni, akkor nagyobb térfogatú gázkeverék gerjesztését kell létrehozni úgy, hogy közben áramoltatjuk azt.[3]

2.3. Lézersugaras hegesztés általános jellemzői

A lézersugaras hegesztést mechanizmusa szerint két csoportba sorolhatjuk, hővezetési hegesztés és mélyhegesztés. A hővezetési hegesztésnél a varrat elérhető mélysége kicsi, valamint széles hőhatásövezettel rendelkezik. Az energia egy hányada elnyelődik a felületen és megolvasztja azt. A későbbi energia besugárzás hatására az olvadék elpárolog és létrejön a plazma állapot. A mélyebb beolvadású hegesztéskor viszont egy plazmacsatorna jön létre, ezt megolvadt anyag vesz körül. A plazmacsatornának nagyon fontos szerepe van, ugyanis emiatt tud a lézer energiája a lentebbi rétegekhez is eljutni, ezáltal létrehozva a mély varratot. Egész vastagságban létrejön a varrat a plazmacsatorna továbbhaladása, valamint a megolvadt anyag dermedése után. A mélyvarratos, valamint a hővezetési hegesztés elvét a 2.3.1. ábra mutatja.[5]



2.3.1. ábra: A mélyhegesztés (balra) és a hővezetési hegesztés (jobbra) szemléltetése [7]

A lézeres hegesztésnek számos előnye van más hegesztési technológiákkal szemben. Keskeny és mély varratokat lehet vele kivitelezni, illetve jól szabályozható a varrat geometriája. Vastag lemezeket lehet hegeszteni vele hegesztőanyag nélkül is. Nem szükséges

kétoldali hozzáférés, valamint a hegesztendő alkatrészek nem szenvednek hőkárosodást, ugyanis a hőhatásövezet igen keskeny. Nem jön létre szemcsedurvulás, így a szövetszerkezet is kedvező tulajdonságokkal fog rendelkezni. Nincs szükség előzetes lemez előkészítésre vagy leélezésre. Nincsen mechanikai érintkezés és nem érzékeny a hegesztési helyzetekre. A lézeres technológiával nagy olvadáskülönbséggel rendelkező anyagok hegesztése is megoldott. Rövid impulzus idővel olyan gyors hevítési sebességet lehet létrehozni, hogy mindkét anyag megolvadjon. A nagyon gyors impulzus hatására nincs idő, hogy az egyik anyag lecseppenjen, azonnal létrejön a dermedés illetve a hegesztett kötés. Hátránya viszont, hogy az előgyártmányt igen kis tűrési mezővel kell előállítani, amely költséges. A kiadásokat még tovább fokozza, hogy igen drága a technológia beruházása és üzemeltetése is. [5]

Lézerrel számos anyagtípus megmunkálható, mint például ötvözetlen, gyengén vagy erősen ötvözött acélok, öntöttvasak, alumínium és ötvözetei, réz és ötvözetei, ezüst, arany, nikkel és ötvözetei, titán, molibdén, volfram és még rengeteg más anyag is. [4]

3. A hegesztési kísérletek elvégzése

3.1. A kísérleti terv ismertetése

A tényleges gyakorlati munka elkezdése előtt célszerű kísérleti tervet készíteni, mely tartalmazza a későbbiekben elvégzett munka vázlatát. Ez a kísérletben felhasznált anyagokat, a munkafolyamat menetét és az elkészített minták későbbi vizsgálati módjait jelenti. Az ilyen jellegű előzőleges terveztet azért célszerű elvégezni, mivel így lehet logikusan átgondolni, hogy milyen előzetes próbatestet célszerű darabolni, hogy az alkalmas legyen az későbbi vizsgálati módszerekhez és vizsgáló berendezéshez. Többszörös mérlegelés után a rendelkezésre álló lemeztáblákból 45 x 80 milliméter nagyságú lemezdarabokat vágtunk ki lézersugaras vágással, melyeket párosával hegesztettünk össze különböző védőgázok és védőgáz keverékek felhasználásával lézersugaras hegesztéssel. A kísérletben az LDX 2304-es (1.4362 számjelű) típusú lean duplex acélt használtam fel. Ennek az acélnek a tulajdonságait a 3.1.1. táblázat tartalmazza.

Outokumpu Steel Name	International Steel No		Chemical Composition, % by wt Typical Values						National steel designations, suspended by EN			
	EN	ASTM	C	N	Cr	Ni	Mo	Others	BS	DIN	NF	SS
LDX 2101*	1.4152	S32101	0.03	0.22	21.5	1.5	0.3	5Mn	-	-	-	-
2304	1.4362	S32304	0.02	0.10	23	4.8	0.3	-	-	1.4460	Z3 CN 23-04 Az	2327
LDX 2404*	1.4662	S82441	0.02	0.27	24	3.6	1.6	3Mn	-	-	-	-
2205	1.4462	S32205	0.02	0.17	22	5.7	3.1	-	318S13	1.4462	Z3 CND 22-05 Az	2377

3.1.1. táblázat: Az 1.4362 típusú lean duplex acél tulajdonságai [11]

A kísérleti terv célkitűzése, hogy az előbbieken bemutatott duplex acélt különböző védőgázokkal és védőgáz keverékekkel meghegesszük. Ezek után a varrat tulajdonságait kell megvizsgálni, hogy a különböző védőgázok hatására milyen jellegzetességei lesznek a keletkező varratoknak. Például hogyan változik a varrat geometriai mérete vagy a ferrit-ausztenit viszony a varratban.

Mivel egy kísérletről van szó, így a megmunkálás során számolni kell azzal, hogy nem megfelelő darabok, selejtek is keletkezhetnek. A próbálkozások miatt érdemes több próbatestet kívágni, mint ami első elgondolásra szükséges lenne. Első közelítésben 40 darab mintát vágunk ki, de a későbbiekben még továbbiakra is szükség volt.

Miután az anyag típusa és a minták mérete tisztázódott, a gázok összetétele került át gondolásra. Dolgozatomban az argonnak és a nitrogénnek a hatásait vizsgáltam, hogy azok miként befolyásolják a kialakult varrat tulajdonságait. Öt féle védőgázzal és védőgáz keverékkel próbáltam meg a lézersugaras hegesztést, melyek a következők voltak:

- a,** 100% Ar
- b,** 95% Ar + 5% N₂
- c,** 90% Ar + 10% N₂
- d,** 86% Ar + 14% N₂
- e,** 100% N₂

Munkám során nem csak a védőgázok varratra gyakorolt hatását szerettem volna megismerni, hanem a lézersugaras technológia egyedi vonásait is próbáltam felfedezni. Ennek érdekében a hegesztést kétféle felépítésű lézersugaras gépen is elvégeztem. Az egyik egy Trumpf TLF 5000 Turbo típusú szén-dioxid lézer volt, míg a másik egy Rofin DY 027 típusú YAG lézer. Ezzel is szerettem volna színesíteni dolgozatomat, megismerve a két gép közötti különbséget a keletkező varrat oldaláról. Így mindkét gépen, 5-5 féle védőgáz felhasználásával készítettem el a varratokat. Mindkét gépen a teljesítmény 2500 W-ra lett beállítva az összehasonlíthatóság kedvéért, valamint a többi paraméter beállításánál is arra kellett törekedni, hogy közel megegyezzenek.

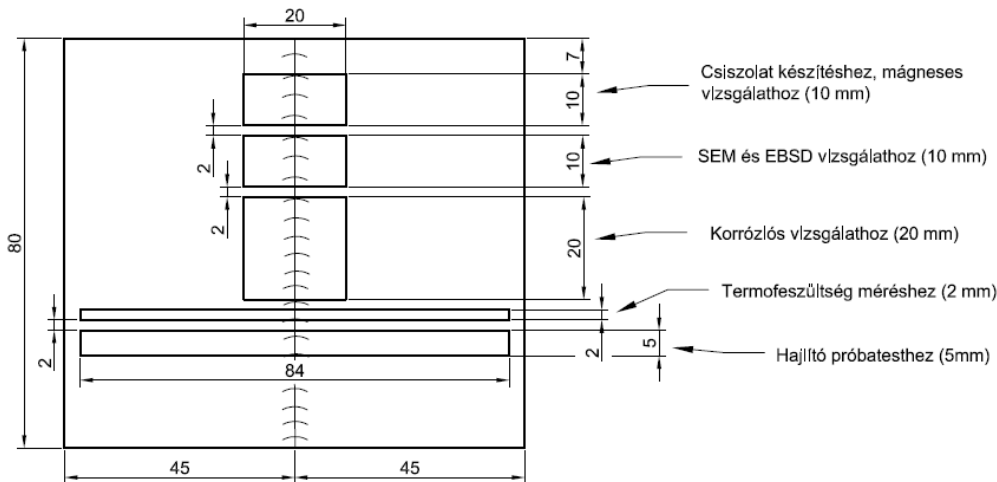
Miután a fentebbi bekezdésekben leírtak tisztázásra kerültek, ki kellett gondolni, hogy a kész varratokon milyen vizsgálatokat fogok végezni. Ekkor cél volt, hogy a varratnak és ezáltal az alapanyagnak is minél több tulajdonságát ismerjem meg az utólagos vizsgálatok során. Minél sokszínűbbek a vizsgálati módszerek, annál több oldalról lehet információt szerezni az alapanyagról, az elkészült varratról és a lézersugaras hegesztési technológiáról, mely a későbbi ipari gyakorlatban igen hasznos lehet. A hegesztés után a következő vizsgálatokat szeretném elvégezni:

Vizsgálatok:

- a hegesztett próbatestekből keresztcsiszolat készítése
- a csiszolatok mikroszkópi vizsgálata
- a varrat alakjának a vizsgálata
- ferrittartalom és egyéb fázisok mérése a varratban és az alapfémekben is ferritscope segítségével, a ferrittartalom változásának vizsgálata az alapanyaghoz képest
- a csiszolatokon abszolút szondás örvényáramú mágneses mérés elvégzése
- SEM és EBSD vizsgálatok elvégzése a próbatesteken: mikroszkópi képek készítése a varratról, valamint ugyanezeneken a mintákon EBSD vizsgálat a fázisanalízis érdekében a varratban és a hőhatásövezetben is
- Termofeszültség mérése a mintákon
- Hajlítási próba végzése, a varratnak a hajlító igénybevétellel szembeni ellenállásának a tanulmányozása
- 24 órás korróziós vizsgálat elvégzése a varrat pontkorróziós és rés-korróziós hajlamának a megismerése céljából

Ha már tudjuk, hogy milyen vizsgálatokat szeretnénk megvalósítani, akkor ezt követően azt kell feltérképezni, hogy az egyes vizsgálati módszerekhez milyen méretű minták szükségesek. A minták mérete pedig meg fogja szabni, hogy mekkora próbatesteket kell majd vágni a lemeztáblákból. A csiszolathoz használható mintadarab méretét a csiszolatkészítő öntőforma fogja meghatározni. Emiatt a mintát 10 x 20 milliméteresnek választottam, mint ahogy az a 3.1.1. ábrán is látszódik. A beöntött csiszolat emellett még alkalmas a mágneses vizsgálatok elvégzésére is, így nem kell újabb mintát készíteni hozzá. Az elektronmikroszkópos vizsgálatokhoz viszont újabb minta szükséges, mivel a csiszolatot a szigetelő gyanta foglalt miatt nem lehet behelyezni a készülékbe. A mintatartó méreteiből kiindulva ennek a darabnak a szélességét is 20 milliméternek, hosszát 10 milliméternek választottam. A termofeszültség méréshez egy 2 milliméter hosszúságú és 90 milliméter szélességű mintát hagytam, mivel a mérő készülékbe ilyen méretű darabok rögzíthetők megfelelően. Mivel célom még az is, hogy megismerjem, miként reagálnak az elkészített varratok a hajlító igénybevétellel szemben, így az ehhez szükséges minta méretét 5 x 90 milliméteresnek határoztam meg. Végül a korróziós vizsgálatához kellett kitalálni, hogy mekkora mintát hagyjak, amin megfelelően el lehet végezni az anyagnak a korróziós mérését. Ennek a mintának a méretét 20 x 20 milliméteresnek választottam. Összesítve, hogy az

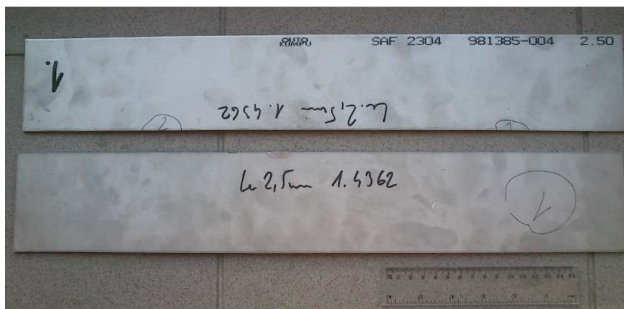
3.1.1. ábra mutatja meg.



3.1.1. ábra: A minták kivágásának módja

3.2. A hegesztés végrehajtása

A gyakorlati munka tényleges első lépéseként a meglévő lemeztáblákat kellett feldarabolni a próbatestek méretére. A raktárban lévő lemeztáblák mérete 500x100 milliméter volt. A 3.2.1. ábrán a darabolatlan lemezeket láthatjuk.



3.2.1. ábra: A darabolatlan lemeztábla

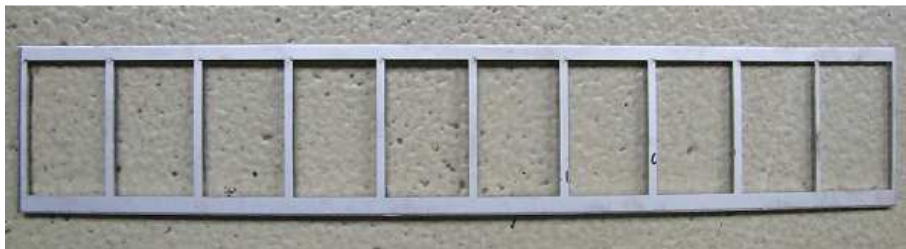
A vágás a Trumpf TLF 5000 Turbo típusú lézersugaras megmunkáló gépen lett elvégezve. A gép mind vágásra, mind pedig hegesztésre is alkalmas. Mivel vágásról van szó, így a munka kezdete előtt felszereltük a vágó fejet a gépre, valamint a fejen lévő vezetékeket a megfelelő csatlakozási pontokra be kellett kötni. Figyelni kellett, hogy a vágógáz és a vízhűtés vezetéke jó helyre legyen csatlakoztatva. Vágógázként nitrogént használtunk, 14 bár nyomással. Az alkalmazott teljesítmény 1900 Watt volt. Az előtolási sebesség 1600 mm/percre , míg a frekvencia 2000 Hz-re értékre lett beállítva. A vágás folyamatát a 3.2.2. ábrán láthatjuk.



3.2.2. ábra: A vágás folyamata

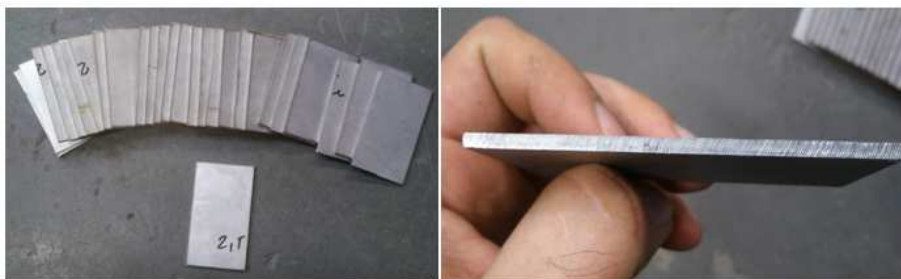
A lemeztáblának a munkatérbe való pontos elhelyezését a lézeres gép fej részén található célzó lézer segítségével lehetett megtenni. A piros célzó lézerrel a lemeztábla peremén haladtunk végig, majd ha a perem nem egyezett a lézer haladási útvonalával, akkor a lemezt a megfelelő irányba kellett elmozdítani. Ezáltal elérhető volt, hogy a lemez szélei a lézersugaras gép X és Y tengelyével álljanak párhuzamosan.

A lemeztábla 100 milliméter szélessége miatt a 45x80 milliméteres próbatestek könnyedén kivághatóak voltak teljes körbevágással, néhány millimétert hagyva 2 próbatest között. Egy lemeztáblából 10 mintát lehetett kivágni a 3.2.3. ábrán mutatott módon.



3.2.3. ábra: A kivágott lemeztábla

A hegesztés elvégzése előtt célszerű a próbatestek 80 milliméter hosszúságú oldalait párhuzamosra munkálni, lemarni, lecsiszolni. Ez azért szükséges, mivel a vágás során nem biztos, hogy a felület minősége megfelelő lesz a darabok szoros összeillesztéséhez, illetve a keletkezett sorja eltávolítása is szükséges. Ha ezt nem tennénk meg, akkor a hegesztő készülékbe való behelyezéskor a két összehegesztendő próbatest érintkező oldalai nem lennének megfelelően összeilleszthetők, esetenként a sorja feltartaná a lemezeket. A próbatestek szoros összeillesztése lézersugaras hegesztés esetén elengedhetetlen. A párhuzamosra mart próbatestek képét a 3.2.4. ábra mutatja.



3.2.4. ábra: Oldalukon párhuzamosra mart próbatestek

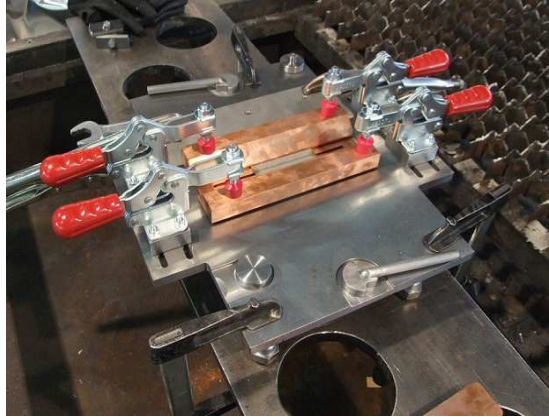
A két lemez végét a készülékbe való behelyezés előtt érdemes egymáshoz rögzíteni valamilyen hegesztési technológiával, például volfram elektródás védőgázos kézi ívhegesztéssel. Ezáltal biztosítható, hogy a lemezek ne mozduljanak el a készülékben, a hegesztést pontosan és biztonságosan el lehessen végezni. A darabok két végén történő összefűzését a tanszéki laborban lévő volfram elektródás védőgázos kézi ívhegesztő géppel végeztem el, argon védőgáz felhasználásával, 45 A-es áramerősséggel. Az összefűzés során törekedtem rá, hogy a varratok a daraboknak minél jobban a szélén helyezkedjenek el, hogy a lézersugaras hegesztés elvégzése után a hasznos varratrész minél hosszabb legyen. Ezáltal a varraton többféle kísérlet is elvégezhető annak tulajdonságai megismerése végett. Az összefűzött próbatesteknek a képét a 3.2.5. ábra szemlélteti.



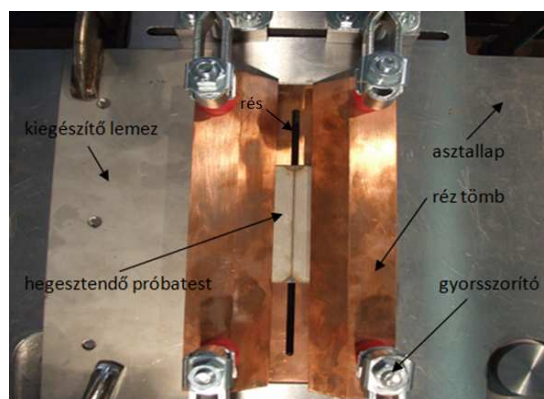
3.2.5. ábra: Az összefűzött próbatestek képe

Miután mindez elkészült, szükség van még a próbatesteket megfelelően rögzítő befogó készülékre. A készüléknek igen pontosnak kell lennie, hiszen a varrat szélessége csupán néhány milliméter lesz, így egy kismértékű eltérés a próbatestek befogása során komoly problémát okozhat. Ha a befogás nem pontosan valósítható meg, akkor az is előfordulhat, hogy a varrat nem a két összefűzött lemez találkozásánál alakul ki, hanem attól eltérő helyzetben. Természetesen a pontosság ugyanúgy vonatkozik az elkészített próbatestekre is, ezért volt szükség az előzőekben említett párhuzamosra marásra is. Valamint a mintáknak megfelelően fel kell feküdniük a leszorító készülék asztalára is, ezáltal nem lehet bennük

ferdeség. Így összefűzéskor is figyelni kellett, hogy a darabok ne melegedjenek túl a hegesztés alatt, mivel ekkor a hűlés során deformáció lephetett volna fel, mely V alakban meggörbíti a darabokat. A hegesztés folyamán használt készüléknek az oldalnézetét a 3.2.6. ábra, míg a felülnézetét a 3.2.7. ábra szemlélteti, leszorított próbatestekkel együtt.



3.2.6. ábra: A hegesztőkészülék oldalnézete

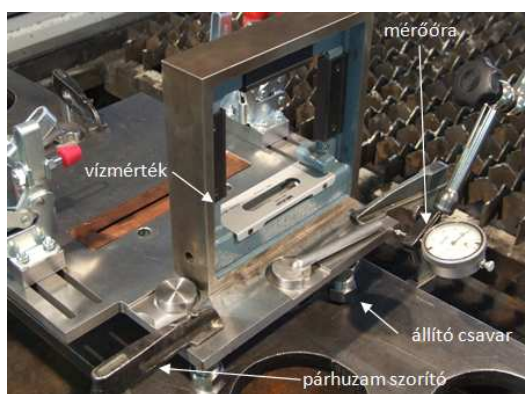


3.2.7. ábra: A hegesztő készülék felülnézete

A leszorító készülék 150 x 150 milliméter méretű próbatest leszorítására lett megtervezve, így az általam használt és már összefűzött, 90 x 80 milliméter kiterjedésű próbatestek megfelelő rögzítéséhez kiegészítő lemezt kellett használni. Ezt a lemezt pillanatszorítóval rögzítettük a leszorító készülék asztallapjára. Közben figyelni kellett, hogy a lemez oldala párhuzamos legyen az asztallapon lévő hosszúkás alakú réssel. Ez azért fontos, mivel így biztosítható, hogy a varrat a megfelelő helyen alakuljon ki a próbatesteken. Pontosan ott, ahol a két összefűzött lemez össze van illesztve. Ha a kiegészítő lemez ferdén lenne rögzítve, akkor a mellé helyezett, összefűzött darab is ferdén fog elhelyezkedni az asztalon. Azért lesz az is ferde, mivel a próbatestek rögzítése úgy történik, hogy a darabokat ennek a kiegészítő lemeznek a széléhez ütköztetjük fel, majd felülről ráhelyezzük a két réz

tömböt, majd azokat biztosítjuk a gyorsszorítókkal. Tehát a kiegészítő lemez nagyban meghatározza a varrat pontosságát.

Mielőtt a próbatesteket behelyezzük és rögzítjük a készülékben, azelőtt a készüléket ki kell egyensúlyozni X, Y és Z irányban is. A leszorítót azért kell vízszintes síkba állítani, mivel csak ekkor biztosítható, hogy a lézer folyamatosan fókuszban maradjon a hegesztés során, az anyag meg tudjon olvadni, vagyis a hegesztési varrat létre tudjon jönni. A készülék vízszintesbe állítását vízmérték segítségével lehetett megoldani, melyet az asztallapra helyeztünk. Ha valamelyik irányban lejtés volt tapasztalható, akkor a készülék lábán lévő csavar állításával a problémát ki lehetett javítani. Miután a Z irányú beállítás elkészült, az X és Y irány jött. Ezt a lézersugaras gép fej részére szerelt mérőórával lehetett megtenni. A lézeres gépet egyenes vonal mentén mozgattuk az X tengely irányában, miközben a hozzá rögzített mérőóra is vele együtt haladt. Az óra csúcsát hozzáértettük a készülék egyik oldalához vízszintes irányban, így a készülék mentén történő mozgatás során az óra megmutatta, hogy az X tengelytől milyen mértékben tér el a készülék. A következő körben kicsit állítottunk a készülék elhelyezkedésén, ekkor a mérőóra már kisebb mértékben tért el a nullától, mint előzőleg. Pár mérés után sikerült a készüléket megfelelően beállítani az X tengelyhez. Mivel a készülék oldalai merőlegesek voltak, így az Y tengellyel is párhuzamos lett a leszorító másik oldala. Vagyis sikerült elérni a vízmérték és a mérőóra használatával azt, hogy a készülék szélei párhuzamosan álljanak a munkatérben a gép X, Y és Z tengelyével. Mindezt követően a készüléket párhuzamszorítókkal erősen rögzítettük a gép munkatérében úgy, hogy az a sokszori próbatest csere során se mozduljon el. A kiegyensúlyozás során használt vízmérték és mérőóra fényképét a mérés pillanatában a 3.2.8. ábra mutatja.



3.2.8. ábra: A hegesztőkészülék kiegyensúlyozása

Mint ahogy az már említve volt, a próbatestek behelyezése a készülékbe úgy történik, hogy a mintákat felütköztetjük a kiegészítő lemez széléhez, majd nehezekként rátesszük a két darab réz tömböt. A réz tömböknek nem csak nehezek szerepük van, hanem nagymértékben

szerepet játszik a hőelvonásban is. Ha a réz tömböket megfelelően ráfektetjük a próbatestekre két oldalról, figyelve arra, hogy közöttük a hegesztő fej és a gázfúvóka ne akadjon meg, akkor a hegesztett próbatestek nem fognak a kelletténél jobban felmelegedni. Ha ezzel megvagyunk, akkor a négy darab gyorsszorítóval kell rögzíteni a réz tömböket, hogy ne mozduljanak el, illetve szoros legyen a kontaktus a tömbök és a próbatest között a kellő hőátadás végett.

Mivel hegesztésről van szó, így az előzőekben felhelyezett vágófejet ki kell cserélni a hegesztő fejre. Ismét át kell kötni a vízhűtés csatlakozóit, illetve a gázvezetékét a vágógázzól ki kell cserélni a védőgázra. A kísérlet során használt hegesztő fejet a gázfúvókával együtt a 3.2.9. ábra szemlélteti.



3.2.9. ábra: A hegesztőfej a gázfúvókával

A hegesztés során többféle gázkeveréket is kipróbálok a védőgáz gyanánt, így szükség van egy gázkeverőre, mellyel a különböző gázkeverék kombinációk előállíthatóak. A hegesztés során használt Witt-Gasetechnik KM 20-3 DI típusú gázkeverő előlapja és hátoldala a 3.2.10. ábrán látható.



3.2.10. ábra: A gázkeverő

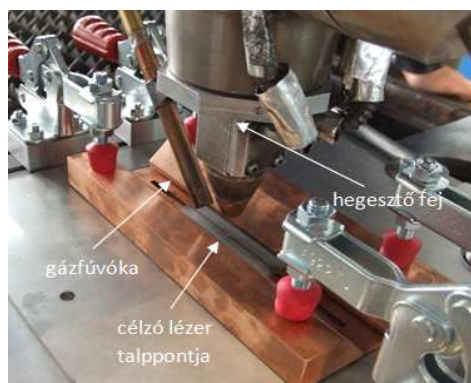
A gázkeverő három féle gáz összekeverésére alkalmas, az én esetemben viszont csak kétféle gázt keverünk össze. Az előlapon látható bal oldali három tekerőgomb segítségével lehet beállítani a kívánt gáz mennyiségét százalékos értékben. A jobb oldali gomb pedig a térfogatáram megadására alkalmas. Maximálisan 27 liter/perc adható meg. A hátlapon lehet csatlakoztatni a gázkeverőt az argon és nitrogén gázpalackokhoz a jobb oldali

csatlakozókkal, a bal oldalin keresztül pedig a gázkeverék jön ki a beállított térfogatárammal. Ezt a bal oldali csatlakozót kell a lézersugaras gép gázbevezetőjéhez csatolni. Ha például 90 % argon és 10 % nitrogént tartalmazó gázkeverékkel szeretnénk hegeszteni, akkor az argon tekerőgombját 90-re, a nitrogénét pedig 10-re kell tekerni figyelve arra, hogy a két gáz összege mindig 100 %-ot adjon. Végezetül a lézert vezérlő programot kell elkészíteni, melyben be tudjuk állítani, hogy milyen pályán haladjon a hegesztőfej, illetve milyen hegesztési paraméterekkel történjen a hegesztés. A szén-dioxid lézer programozó pultjának képét a 3.2.11. ábra mutatja.



3.2.11. ábra: A szén-dioxid lézer programozó pultja

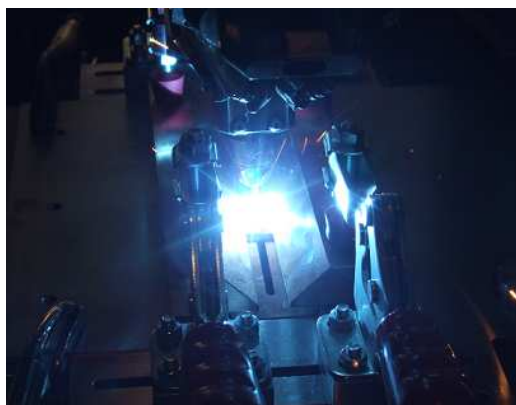
Program segítségével elkészítettük az útvonalat, melyen a hegesztő fej mozogni fog. Az elkészítendő varrat hossza megegyezik a próbalemezek hosszával, vagyis 80 milliméter. Viszont érdemes befutó és kifutó úthosszt is beleszámolni a hegesztőfej úthosszába. Ez körülbelül plusz 10 millimétert jelent a lemez elején és a lemez végén is. Tehát a lézer a lemez előtt 10 milliméterrel fog elindulni és 10 milliméterrel fog a lemez után megállni. Ez azért szükséges, mivel így a lemez elején és végén is jobb varratminőséget kaphatunk. Van idő a lézer teljesítményének felépülni a varrat elején, valamint a varrat végén a fúvókából kiáramló védőgáz még egy kis ideig tudja védeni az éppen hűlő varratot. A gázfúvóka pozíciójának a beállítását úgy volt célszerű elvégezni, hogy a fúvóka csövén felülről keresztül nézve, pont a középpontban lássuk a célzó lézer piros pontját. Ezáltal biztosítható, hogy a gáz közvetlenül az éppen készülő varratra fog áramolni. A hegesztő fejről és a gázfúvókáról készült képet a 3.2.12. ábrán láthatjuk.



3.2.12. ábra: A hegesztőfej

Miután a pályavezetéssel elkészültünk, a gázfúvókát beállítottuk és már a hegesztendő próbatestet is előzőlegesen rögzítettük a hegesztő készülékben, jöhetnek a hegesztési paraméterek megadásai. Mivel célom, hogy a maximális 5 kW-os szén-dioxid lézerrel készített varratokat össze tudjam hasonlítani a maximális 2,5 kW-os YAG lézerrel készült varratokkal, így a hegesztési teljesítményt 2,5 kW-ra választottam. Az elképzelésem az volt a munkafolyamatot illetően, hogy első lépésben tiszta argon használatával megfelelő varratot készítünk a CO₂ lézeren. Addig állítgatjuk a paramétereket, míg külső ránézésre, szemrevételezéssel egy szép varratgeometriát kapunk. Ezt követően a többi gázkeverékkel is megpróbáljuk a hegesztést, a tiszta argonnak megfelelő paraméterekkel. Így össze lehet hasonlítani a varratokat, hogy a nitrogén hozzákeverése miként befolyásolja a varrat minőségét. Természetesen, ha a kialakult varrat minősége nem megfelelő az azonos paraméterek alkalmazása miatt (például nem olvad át a gyök, túlságosan széles lesz a gyök oldal, kormos lesz a koronaoldal, túl lassú vagy túl gyors az előtolási sebesség, stb...), a használt paramétereken lehet változtatni a tökéletesebb varrat érdekében.

Az első lépésben 100 % argont kötöttünk rá a lézersugaras gép gázbevezetésére. A teljesítmény 2500 W-ra lett beállítva, ahogy az egész kísérlet folyamán minden esetben. Az előtolási sebességet 1760 mm/perc értékre választottuk. Mivel 2,5 milliméter vastag saválló lemez nem volt még hegesztve a gépen, így vastagabb lemez hegesztéséhez szükséges előtolási sebességből visszszámoltam, hogy 2,5 milliméter vastagságú lemezhez mekkora előtolási sebesség tartozhat. Ez egy elég durván közelítő megoldás volt, mivel az általam alkalmazott anyag igencsak eltért az eddigiekben használtaktól, de legalább kiindulási értéknek megfelelt. A védőgáz mennyiségét kezdésnek 20 liter/perc értéknek adtuk meg. Mindezek beállítása után kezdődhetett a hegesztés, melyről a 3.2.13. ábra mutat képet.



3.2.13. ábra: A hegesztés folyamata

3.3. A szén-dioxid lézeren készített darabok szemrevételezése

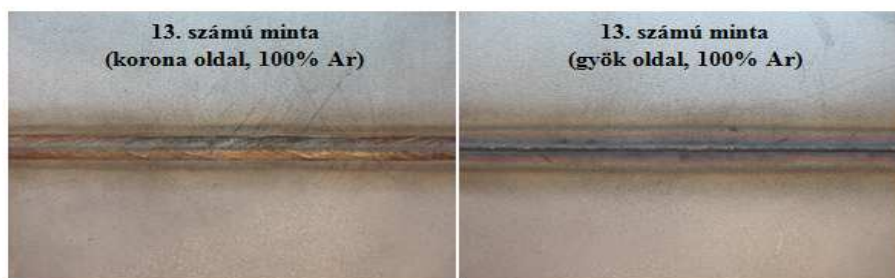
A szén-dioxid lézeren végzett összes kísérleteknek a hegesztéstechnológiai tényezőit a 3.3.1. táblázat tartalmazza.

CO2 lézer						
Minta sorszáma	P [W]	f [Hz]	v [mm/perc]	Ar [%]	N2 [%]	q [liter/perc]
1	2500	9000	1760	100	0	20
2	2500	9000	1200	100	0	20
3	2500	9000	900	100	0	20
4	2500	9000	900	0	100	20
5	2500	50 000	900	0	100	35
6	2500	50 000	900	0	100	35
7	2500	50 000	900	0	100	35
8	2500	50 000	900	100	0	20
9	2500	50 000	900	100	0	20
10	2500	50 000	900	100	0	35
11	2500	50 000	900	100	0	35
12	2500	50 000	800	100	0	35
13	2500	50 000	800	100	0	35
14	2500	50 000	800	100	0	27
15	2500	50 000	800	86	14	27
16	2500	50 000	700	86	14	27
17	2500	50 000	700	86	14	27
18	2500	50 000	700	90	10	27
19	2500	50 000	700	95	5	27

3.3.1. táblázat: A szén-dioxid lézeren végzett kísérletek hegesztéstechnológiai tényezői

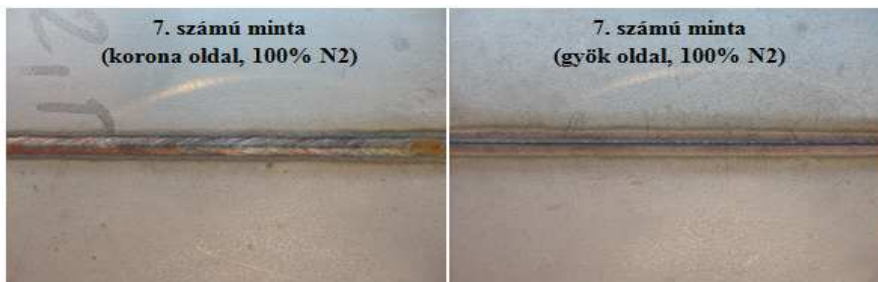
Az 1. számú varrat esetében azt tapasztaltam a hegesztés elvégzése után, hogy a gyök oldal egyáltalán nem olvadt át, vagyis az előtolási sebesség túl nagy volt. Így azt csökkenteni kellett. A másik lehetőség az lett volna a beolvadás növelésére, ha a lézer teljesítményét növeltem volna, viszont ahogy már említettem fentebb, ugyanazon teljesítmény értékkel szerettem volna megvalósítani az összes hegesztési varratot mindkét lézersugaras gépnél az összehasonlítás érdekében. A további minták esetében fokozatosan csökkentettem az előtolás mértékét, így a 9. számú mintánál már 900 mm/perc volt ez az érték. Megfelelő beolvadás

még így sem jött létre, ráadásul a varrat teteje igen kormos lett. Ez valószínűleg a nem megfelelő mennyiségű védőgáz miatt alakult ki, oxigén jutott az éppen hűlő varrathoz. Ekkor megnöveltem a védőgáz mennyiségét 35 liter/perc értékre. Hatására a varrat teteje nem lett kormos, valamint az átolvadás is megtörtént szinte teljes mértékben. Ezt követően az előtolást még egy kicsit lentebb vettem, így 800 mm/perces értékkel már ránézésre szép varratot kaptunk a 13. számú mintánál. Látható, hogy a védőgáz mennyiségének is milyen fontos szerepe van hegesztés során. A 13. számú minta képét 3.3.1. ábra szemlélteti.



3.3.1. ábra: A 13. számú minta fényképei

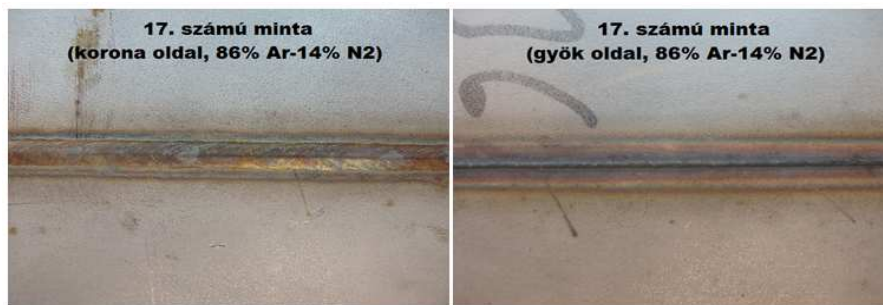
Másodikként a 100 % nitrogént kötöttük be védőgázként. 900 mm/perc hegesztési sebességgel történt az első próbálkozás, 20 liter/perc védőgáz mennyiség mellett. Mivel nem volt tökéletes a beolvadás, valamint a varrat teteje kicsit oxidos lett, így a gáz mennyiségét itt is meg kellett növelni 35 liter/percre. Ennek hatására a 7. számú minta koron és gyök oldala megfelelő lett szemrevételezés alapján. Képét a 3.3.2. ábra mutatja.



3.3.2. ábra: A 7. számú minta fényképei

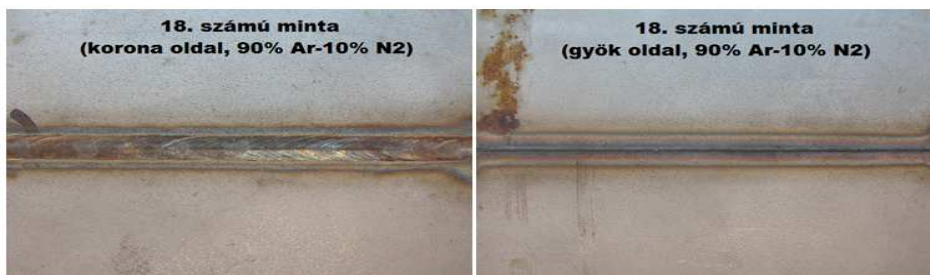
A 100% argon és 100% nitrogén után jöhettek a gázkeverékek, így a gázkeverő bekötése elengedhetetlen volt. A gázkeverőbe a már fentebb említett módon bekötöttem az argon és nitrogén palackokat a megfelelő csatlakozási helyekre, majd a keverő kivezetését összekötöttem a lézersugaras géppel. Először 14 % nitrogént kevertem az argon mellé 800 mm/perces hegesztési sebességnél és 27 liter/perces védőgáz mennyiségnél. Az átolvadás majdnem teljes volt, illetve a varrat koron oldala is megfelelő lett. A sebességet 700

mm/percre csökkentve a gyök oldal is teljesen átolvadt a 17. számú minta esetében. Ennek a képét a 3.3.3. ábrán láthatjuk.



3.3.3. ábra: A 17. számú minta fényképe

10 % nitrogén és 90 % argon védőgáz mellett készült 18. számú varratot a 3.3.4. ábra mutatja. A védőgáz mennyisége itt is 27 liter/ perc volt, az előtolás mértéke pedig 700 mm/perc.



3.3.4. ábra: A 18. számú minta fényképe

Végül az 5% nitrogént és 95% argont tartalmazó védőgáz keverék következett a 19. számú mintán. A hegesztés elvégzése után azt tapasztaltam, hogy a darab nem olvadt át rendesen, valamint a koron oldal ismét kormos lett. Ebben az esetben is valószínűleg a védőgáz mennyisége volt kevés, de mivel a kísérletben használt gázkeverő maximális kimenő gáz térfogatárama 27 liter/perc volt, így a gáz mennyiségét nem tudtam tovább növelni, mely valószínűleg megoldotta volna a problémát. A 19. számú mintát a 3.3.5. ábra mutatja.



3.3.5. ábra: A 19. számú minta fényképe

Összefoglalásul a 3.3.2. táblázat megmutatja, hogy melyek voltak egy-egy gázkeverék alkalmazása alatt a szemrevételezés alapján legmegfelelőbb varratoknak a számai és hegesztéstechnológiai tényezői.

Gázkeverék összetétele	Szemrevételezés alapján legmegfelelőbb varrat száma a CO ₂ lézernél	A varrat hegesztéstechnológiai tényezői a CO ₂ lézernél	
		Hegesztési sebesség [mm/perc]	Gáz mennyiség [liter/perc]
100 % Ar	13.	800	35
86 % Ar + 14 % N ₂	17.	700	27
90 % Ar + 10 % N ₂	18.	700	27
95 % Ar + 5 % N ₂	19.	700	27
100 % N ₂	7.	900	35

3.3.2. táblázat: Szemrevételezés alapján a megfelelő varratok sorszámai a szén-dioxid lézernél

3.4. A szén-dioxid lézeren készített darabok szemrevételezése

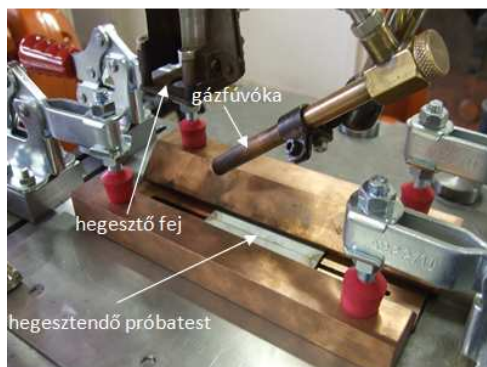
Miután minden szükséges varrat elkészült a Trumpf TLF 5000 Turbo típusú szén-dioxid lézersugaras megmunkáló gépen, következhetett a másik lézersugaras gép is. A YAG lézeren történő munka során is ugyanaz volt a célom, mint az előző esetben. Szerettem volna megismerni, hogy miként befolyásolják a hegesztési varratnak a tulajdonságait a különböző védőgáz keverékek. Azért, hogy össze tudjam hasonlítani a hegesztési paramétereket a két gép esetén, a YAG lézeren megismételtem azon hegesztési paraméter sorokat, amelyeknél a szén-dioxid lézeren szemrevételezésre a legjobb minőségű varratokat kaptam. Így ki fog derülni, hogy miben különbözik egymástól a két gép. A YAG-lézersugaras gépet a 3.4.1. ábrán láthatjuk.



3.4.1. ábra: A YAG-lézersugaras gép képe

A hegesztő készüléknek az elhelyezése hasonló módon történt itt is, mint az előző esetben. Vízmértékkel kiegyensúlyoztuk vízszintes síkban. A gép hegesztő fején lévő célzó lézert végigfutattuk a készülék élein, így az X és Y irányban is helyesen lett beállítva. A programozó pulton be lett állítva a hegesztő fej pályája, ugyanolyan ráfutás és lefutás lett beállítva, mint a másik lézer esetében volt. A gázkeverőt is csatlakoztatni kellett a

gázpalackokhoz illetve a YAG lézer gázbevezető csatlakozójához. A 100% argon és 100% nitrogén alkalmazásának esetében itt sem kötöttük be a keverőt, hanem közvetlenül a gázpalackokról történt a gázellátás. A gázfúvókát hasonló módon kellett pozícionálni, mint előtte. A fúvókát most is próbáltam minél közelebb helyezni a varrathoz, hogy a kiáramló gáz minél jobban védje az éppen készülő varratot, de mégis ne lógjon bele a lézersugár útjába, valamint turbulens áramlások ne jöjjenek létre. A YAG-lézer hegesztőfejét és gázfúvókáját a 3.4.2. ábra szemlélteti.



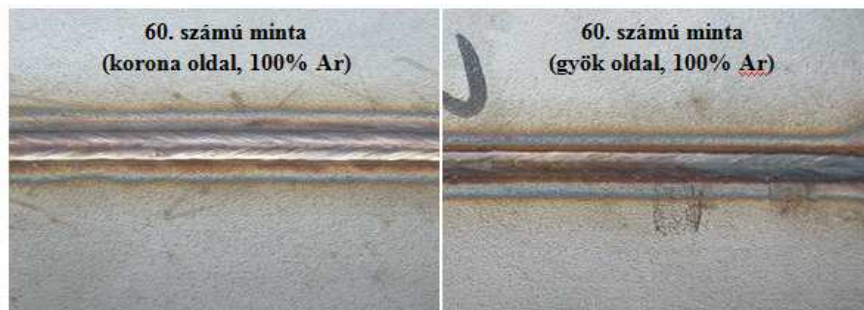
3.4.2. ábra: A YAG-lézer hegesztőfeje és gázfúvókája

Ha a hegesztendő darabok befogása és rögzítése is megtörtént, akkor a hegesztési paraméterek kell beállítani. Most is 100% argonnal kezdtem a kísérletet és az összes hegesztési varratnál 2500 W teljesítményt állítottunk be. A YAG lézeren végzett hegesztéseknek a hegesztéstechnológiai tényezőit a 3.4.1. táblázat mutatja.

YAG lézer						
Minta sorszáma	P [W]	f [Hz]	v [mm/perc]	Ar [%]	N2 [%]	q [liter/perc]
35	2500	50 000	900	100	0	35
36	2500	50 000	1800	100	0	35
37	2500	50 000	2500	100	0	35
38	2500	50 000	2800	100	0	35
39	2500	50 000	2800	100	0	35
40	2500	50 000	1200	100	0	20
41	2500	50 000	900	0	100	20
42	2500	50 000	3000	0	100	20
43	2500	50 000	2800	0	100	20
44	2500	50 000	2600	0	100	20
45	2500	50 000	700	86	14	27
46	2500	50 000	2600	86	14	27
47	2500	50 000	2900	86	14	27
48	2500	50 000	2400	86	14	27
49	2500	50 000	2400	86	14	27
50	2500	50 000	700	90	10	27
51	2500	50 000	2600	90	10	27
52	2500	50 000	2600	90	10	27
53	2500	50 000	700	95	5	27
54	2500	50 000	2600	95	5	27
55	2500	50 000	2400	95	5	27
56	2500	50 000	2300	95	5	27
57	2500	50 000	2200	95	5	27
58	2500	50 000	800	100	0	27
59	2500	50 000	900	0	100	35
60	2500	50 000	800	100	0	35

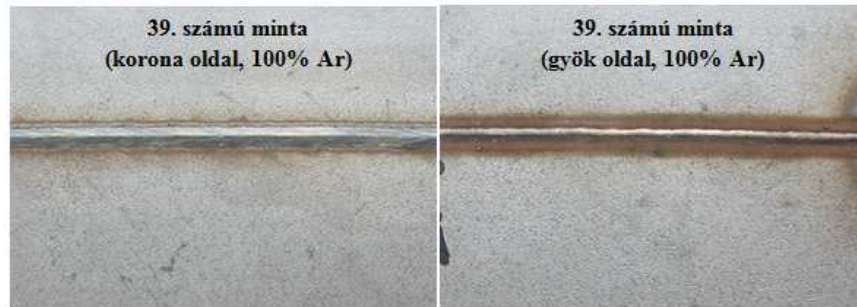
3.4.1. táblázat: A YAG-lézeren végzett kísérletek hegesztéstechnológiai tényezői

A 100% argonos hegesztések során kipróbáltam a szén-dioxid lézernél alkalmazott paramétereket. Ott, az optimális paraméterű 13. számú varratnál az előtolási sebesség 800 mm/perc volt, a gáz mennyisége pedig 35 liter/perc. Így a 60. számú mintát a YAG lézeren ezen paraméterekkel készítettem el, képét a 3.4.3. ábra mutatja.



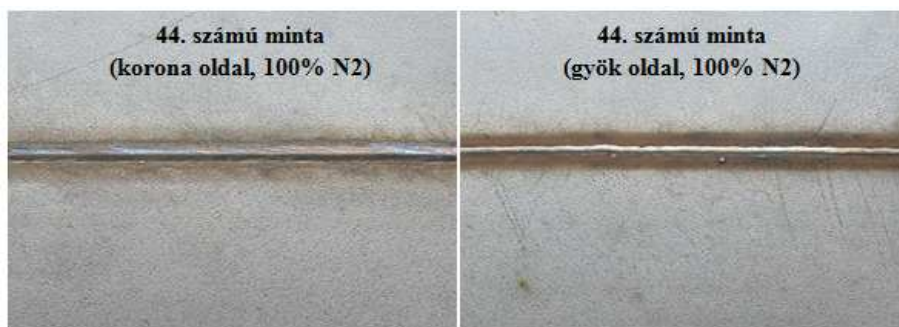
3.4.3. ábra: A 60. számú minta fényképe

Látható, hogy a hőbevitel túlzott volt, a gyök mérete nagy lett, a korona oldal kráteres, vagyis az előtolási sebesség nem megfelelő, növelni kell azt. Ezt követően fokoztam az előtolási sebességet 1800 mm/percre, majd 2500 mm/percre. Legvégül a varrat 2800 mm/perces hegesztési sebességnél lett optimális, ekkor már a gyök mérete is elfogadható volt és a korona oldal sem volt oxidos. A 39. számú varrat képe az 3.4.4. ábrán látható.



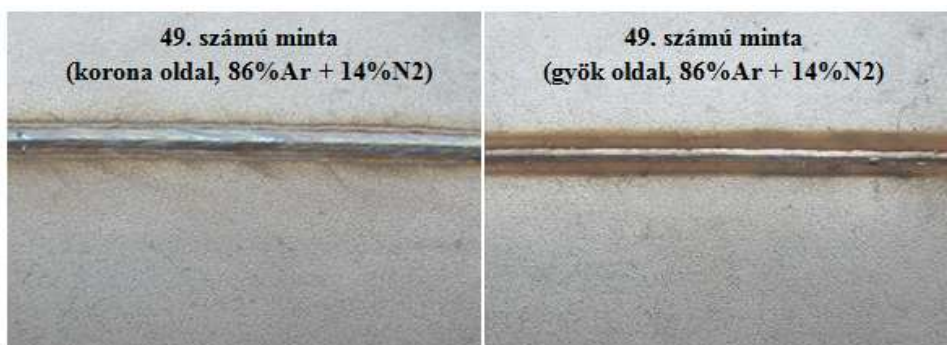
3.4.4. ábra: A 39. minta fényképe

Ezt követően a 100% nitrogén következt védőgáz gyanánt. Az 59. számú mintát a 7. számú minta paramétereivel hegesztettük meg, mivel a 7. számú minta rendelkezett az optimális paraméterekkel 100 % nitrogén esetén a szén-dioxid lézernél. Ebben az esetben is a hegesztési sebesség lassúnak bizonyult, ugyanazok a hibák jelentkeztek, mint az előbb. A gyök mérete nagy volt, a korona oldal túlzott mértékben kráteres lett. A 42. számú mintánál már felvettük a sebességet 3000 mm/percre, ekkor viszont már nem volt teljes az átolvadás. Így az optimális varrat a 44. számú minta lett, ahol 2600 mm/perces előtolás volt alkalmazva és 20 liter/ perces gáz térfogatáram. A 44. számú mintát a 3.4.5. ábra szemlélteti.



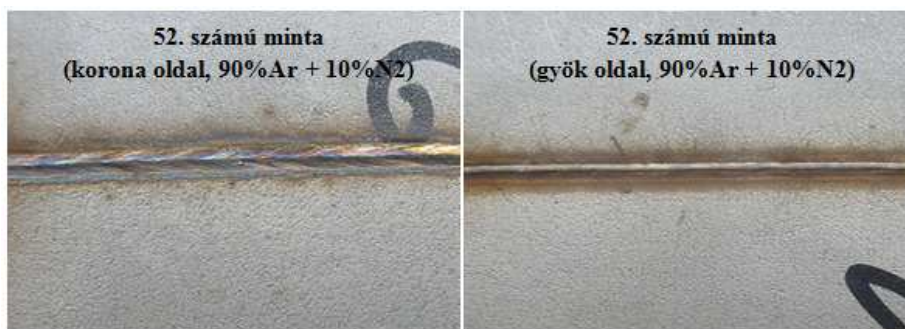
3.4.5. ábra: A 44. számú minta fényképe

A gázkeverékek alkalmazása során a gázkeverőt ismét bekötöttem a gép gázrendszerébe. 14 % nitrogén és 86 % argon beállítása után a 17. minta paramétereivel hegesztve, ismételten túlzott méretű gyököt kaptam. Így a 45. számú minta ismét nem volt megfelelő. Az optimális paramétereket a 49. számú minta adta, ahol 27 liter/perces gázmennyiség mellett, 2400 mm/perces volt a hegesztési sebesség. A 49. számú minta képét a 3.4.6. ábra mutatja.



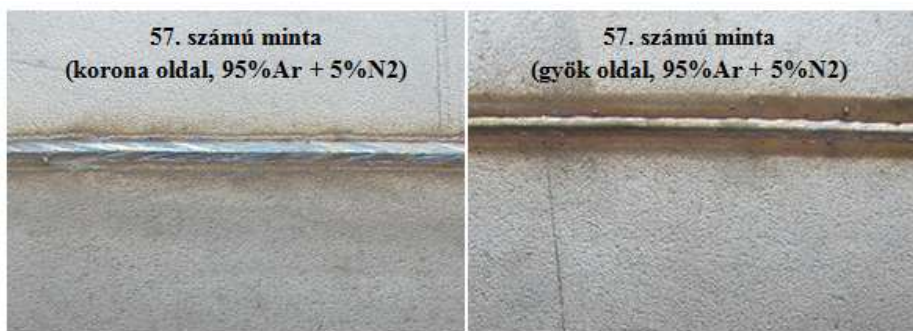
3.4.6. ábra: A 49. számú minta fényképe

10 % nitrogént és 90 % argont tartalmazó gázkeveréknél is növelni kellett az előtolás mértékét 2600 mm/percre, mivel az 50. minta nem volt megfelelő sem a koronaoldal sem pedig a gyökoldal szempontjából. A megfelelő, 52. számú varrat képét a 3.4.7. ábrán láthatjuk.



3.4.7. ábra: Az 52. számú minta fényképe

Végül az 5% nitrogént és 95 % argont tartalmazó keverék következett. Az 53. számú mintát a 19. számú minta paramétereivel hegesztettük meg. Itt meglepő módon nem keletkezett korom a korona oldali részen. Az átolvadás is teljes mértékben létrejött, sőt, itt is a túlzott mértékű gyök volt jellemző, így az előtolást fokozni kellett. A legszebb varratot 2200 mm/perces hegesztési sebességnél kaptam, 27 liter/perces védőgáz mennyiségnél. A varrat sorszáma 57. lett, képét a 3.4.8. ábra mutatja.



3.4.8. ábra: Az 57. számú minta fényképe

A YAG-lézernél is készíthető egy táblázat, melyben össze vannak foglalva, hogy egy-egy gázkeverék esetén mely sorszámu varratok voltak szemrevételezés alapján a legjobb minőségűek. Ezeket az adatokat a 3.4.2. táblázat tartalmazza.

Gázkeverék összetétele	Szemrevételezés alapján legmegfelelőbb varrat száma a YAG-lézernél	A varrat hegesztéstechnológiai tényezői a YAG-lézernél	
		Hegesztési sebesség [mm/perc]	Gáz mennyiség [liter/perc]
100 % Ar	39.	2800	35
86 % Ar + 14 % N2	49.	2400	27
90 % Ar + 10 % N2	52.	2600	27
95 % Ar + 5 % N2	57.	2200	27
100 % N2	44.	2600	20

3.4.2. táblázat: Szemrevételezés alapján a megfelelő varratok sorszámai a YAG-lézernél

3.5. A hegesztett minták utólagos mérési módszerei

Mielőtt az összehegesztett próbatesteket további darabolások alá vetném, a varrat ferrit tartalmát Fischer Ferritscope FMP30 típusú ferritscope-pal mértem meg. A felszerelés egy mérő készülékből és egy hozzá csatlakoztatott szondából áll. A készülék bekapcsolása után a szondát a varratra kell helyezni, majd egy kicsit várni és a készülék kiírja, hogy az adott pontban mekkora a ferrit százalékos értéke. Így egy gyors mérési lehetőségről van szó ferrittartalom tekintetében. A ferritscope-ról készített képet a 3.5.1. ábra mutatja.



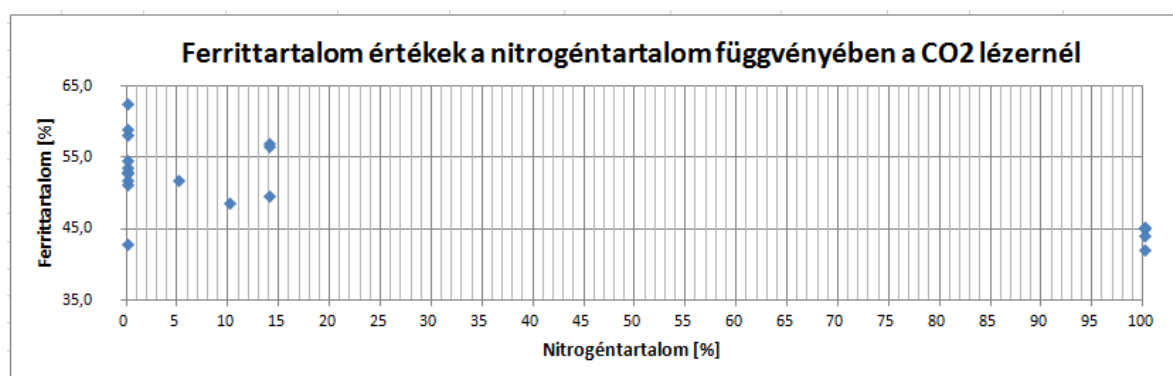
3.5.1. ábra: A ferrittartalom mérésre alkalmas Ferritscope

Minden elkészített varratnál meg szerettem volna mérni a ferrit tartalmat, hogy választ kapjak, ferrit tartalom szempontjából miként befolyásolják a varratot a különböző védőgáz keverékek. Ennek érdekében három pontban mértem a korona oldalon a ferrit mennyiségét és három pontban a gyök oldalon is. Ezek elhelyezkedése a varrat hossza mentén a következők voltak mind korona oldalon, mind pedig gyök oldalon: kb. 10 milliméterre a varrat eleje után (a táblázatban jelölve: korona oldal bal és gyök oldal jobb) ; kb. 10 milliméterre a varrat vége előtt (a táblázatban jelölve: korona oldal jobb és gyök oldal bal); illetve a varrat közepén (a táblázatban jelölve: korona oldal közép és gyök oldal közép), tehát mindkét végtől kb. 45-45 milliméterre. Mivel szerettem volna pontos méréseket készíteni, így egy pontban három mérést végeztem egymás után, a mérőfej elmozdítása nélkül. Vagyis egy varrat esetében 9 mérést végeztem a korona oldalon és 9 mérést a gyök oldalon. Miután végeztem a mérésekkel, az egy pontban lévő mérési pontokat átlagoltam. A szén-dioxid lézeren készített varratok ferritscope-os, már átlagolt mérési eredményeit a 3.5.1. táblázat szemlélteti.

Ferrittartalom mérése ferritscope segítségével a CO ₂ lézeren készített mintákon						
Minta száma	Korona oldal bal [%]	Korona oldal közép [%]	Korona oldal jobb [%]	Gyök oldal bal [%]	Gyök oldal közép [%]	Gyök oldal jobb [%]
1.	41,3	42,8	40,2	37,5	34,1	34,6
2.	56,7	51,3	64,0	35,0	36,1	37,1
3.	46,2	52,8	52,5	39,1	35,6	35,4
4.	45,3	45,3	45,0	41,6	41,9	40,9
5.	42,9	42,0	39,0	40,5	38,3	41,4
6.	48,3	45,1	46,8	48,6	39,8	42,1
7.	45,0	44,0	43,7	36,6	32,7	37,1
8.	50,3	51,8	51,3	38,1	39,6	39,6
9.	57,7	53,6	57,4	35,8	43,7	41,2
10.	56,9	58,2	59,3	39,3	35,0	44,0
11.	55,3	52,9	52,2	37,8	37,7	37,3
12.	54,8	59,0	53,1	38,6	36,4	37,7
13.	63,9	62,5	70,1	42,9	34,6	38,5
14.	56,4	54,6	51,2	40,0	38,4	34,8
15.	50,3	49,5	51,6	41,0	39,0	35,7
16.	56,8	56,9	58,1	46,4	41,6	45,7
17.	51,8	56,7	51,7	36,4	33,2	36,2
18.	53,3	48,7	51,8	34,4	34,1	36,8
19.	55,0	51,9	53,0	35,5	37,1	39,8

3.5.1. táblázat: A ferrit értékek a szén-dioxid lézeren készített varratoknál

Az átláthatóság érdekében a korona oldali ferrittartalmat ábrázoltam a nitrogéntartalom függvényében, melyet a 3.5.2. ábra mutat.



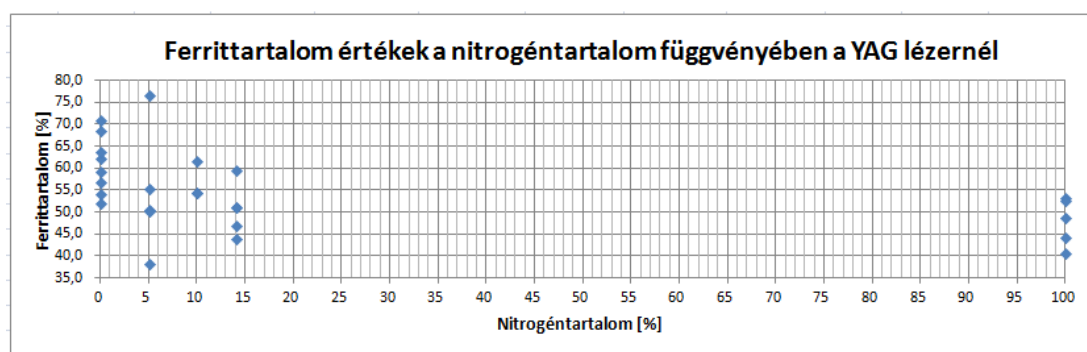
3.5.2. ábra: A ferrittartalom ábrázolása a nitrogéntartalom függvényében a CO₂ lézeren

Hasonló módon, mint a 3.5.1. táblázat volt, a YAG-lézeren készített varratok ferritscope-os méréseiből is lehet táblázatot készíteni. Ezen értékeket, melyek ismételt átlagolt eredmények, a 3.5.2. táblázat mutatja.

Ferrittartalom mérése ferritscope segítségével a YAG-lézeren készített mintákon						
Minta száma	Korona oldal bal [%]	Korona oldal közép [%]	Korona oldal jobb [%]	Gyök oldal bal [%]	Gyök oldal közép [%]	Gyök oldal jobb [%]
35.	57,0	54,2	69,5	63,7	46,8	48,7
36.	47,1	62,3	56,4	42,4	45,6	42,6
37.	48,1	59,2	64,3	38,7	45,7	52,2
38.	43,8	52,2	45,9	35,5	37,8	36,5
39.	57,3	57,1	46,2	35,3	36,1	37,0
40.	79,1	68,7	81,4	49,8	58,4	43,7
41.	56,9	53,3	55,2	57,7	47,0	50,1
42.	43,3	48,9	44,5	37,0	35,2	47,2
43.	42,3	40,7	47,2	50,5	34,2	36,6
44.	44,4	44,5	44,5	37,7	39,5	36,8
45.	49,9	51,3	46,0	41,6	48,7	46,1
46.	49,9	47,2	57,7	44,9	34,7	35,9
47.	42,3	59,6	41,0	35,8	36,3	35,7
48.	57,7	51,2	47,4	51,7	38,7	39,5
49.	40,3	44,0	44,8	48,7	41,0	37,4
50.	58,2	61,8	66,3	48,8	52,2	44,5
51.	56,3	54,5	64,0	39,4	47,3	44,3
52.	46,3	54,6	46,9	41,0	37,1	35,7
53.	62,4	76,8	60,7	46,1	51,4	54,1
54.	38,7	50,7	49,2	36,2	34,8	44,2
55.	44,1	55,5	56,6	38,8	36,4	37,0
56.	42,0	38,5	39,6	35,8	38,0	40,4
57.	58,2	50,3	60,7	45,0	37,7	36,8
58.	56,9	71,1	59,2	45,3	56,6	49,9
59.	51,9	52,7	67,0	41,9	50,7	43,1
60.	73,6	63,8	63,1	49,4	53,6	42,1

3.5.2. táblázat: A ferrit értékek a YAG-lézeren készített varratoknál

Ismét készíthetünk egy szemléltető grafikont, mely a ferrittartalmat mutatja a nitrogéntartalom függvényében a YAG lézeren a 3.5.3. ábrán.



3.5.3. ábra: A ferrittartalom ábrázolása a nitrogéntartalom függvényében a YAG lézeren

Emlékeztetőül célszerű egy összefoglaló táblázatot készíteni, mely tartalmazza a minták csoportosítását aszerint, hogy melyik lézersugaras gépen és melyik gázkeverékkel lett elvégezve a hegesztés. Így a ferritscope-os mérési eredmények is jobban áttekinthetőek lesznek. Ezt az összefoglalást a 3.5.3. táblázat mutatja, ahol az összes általam készített

hegesztési varrat száma szerepel, pirossal kiemelve a szemrevételezés alapján legmegfelelőbb varratokat.

Gázkeverék összetétele	A CO2 lézerrel készített minták száma	A YAG lézerrel készített minták száma
100 % Ar	1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13 , 14	35, 36, 37, 38, 39 , 40, 58, 60
86 % Ar + 14 % N2	15, 16, 17	45, 46, 47, 48, 49
90 % Ar + 10 % N2	18	50, 51, 52
95 % Ar + 5 % N2	19	53, 54, 55, 56, 57
100 % N2	4, 5, 6, 7	41, 42, 43, 44 , 59

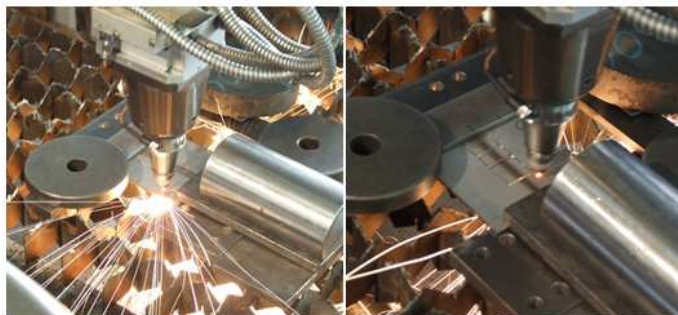
3.5.3. táblázat: A két lézerrel készített összes varrat összefoglaló táblázata

A kísérlet elvégzése előtt arra számítottam, hogy a nitrogén védőgáz használatával a ferrit mennyisége alacsonyabb lesz, mint az argon gáz használata során, hiszen a nitrogén erős ausztenit képző. A ferritscope-os mérési eredmények ezt a megállapítást alátámasztották. A könnyebb áttekinthetőség érdekében csak a szemrevételezés alapján legmegfelelőbb darabokat emelném ki külön (a 3.5.3. táblázatban piros számokkal jelölt mintákat), de természetesen a többi mérési eredmény is hasonló megállapításokat tükröz. Az alapanyag ferrit tartalma 15 mérési pont átlagát számítva 43,3 %-ra adódott. Ha megvizsgáljuk a tiszta argon védőgázos hegesztési varratot a CO2 lézer esetén, vagyis a 13. számú minta méréseit, akkor láthatjuk, hogy a ferrit tartalom igen magas: a korona oldalon 63,9%; 62,5% és 70,1% adódott, ami jóval magasabb, mint az alapanyag értéke. Ha viszont fokozatosan csökkentjük az argon mennyiségét a védőgázban és mellette növeljük a nitrogén mennyiségét ez a ferrit érték csökkenni fog. Már 14% nitrogén hozzá keverésével is csökken a ferrit mennyisége: a korona oldalon 51,8%; 56,7% és 51,7% ferrit lesz, mely már kevesebb, mint a 100% argon esetén, viszont még nem közelíti meg az alapanyag értékét. Legvégül, ha 100% nitrogént alkalmazunk, akkor a következő értékek adódnak: a korona oldalon 45%; 44% és 43,7% ferritit kapunk, ami már szinte megegyezik az alapanyag ferrit tartalmával. Mindezen megállapításokat a 3.5.2 ábrán látható grafikonról is leolvashatjuk.

Mindez azért fontos, mivel egy duplex hegesztett szerkezet csak akkor tud megfelelően üzemelni, ha a varrat tulajdonságai hasonlóak az alapanyagéval. Tehát duplex acélok hegesztésénél célszerű az alapanyag ferrit tartalmát megcélózni a varrat esetén is, mivel csak így biztosítható, hogy a varrat jó szilárdsággal, megfelelő szívóssággal és korrózióállósággal fog rendelkezni. Ha a ferrit tartalom nagymértékben megnő a varratban, akkor a fentebb említett tulajdonságok aránya felborul, az ausztenit mennyisége kritikusan lecsökken, nem lesz megfelelő a varrat, a hegesztett szerkezet nem tud biztonságosan üzemelni.

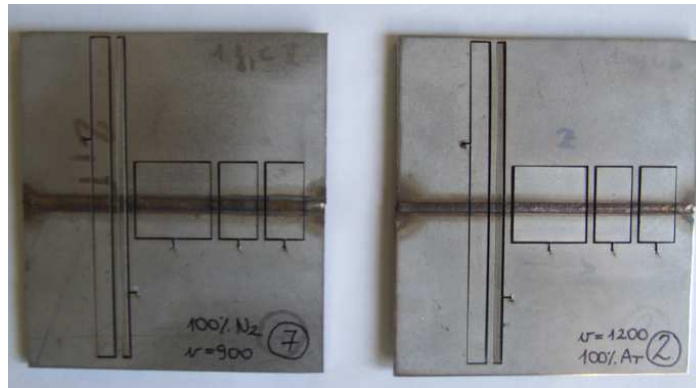
Ha megvizsgáljuk a YAG lézerre készített minták ferrittartalom méréseit is, akkor kicsit eltérő értékeket kapunk, mint az előző esetben. 100% argonnál, vagyis a 39. számú mintánál a ferrit tartalmak a következők: a korona oldalon 57,3%; 57,1% és 46,2%. Vagyis kis mértékben kisebb értékeket kaptam, mint előző esetben. Ha itt is növeljük a nitrogén tartalmát, akkor a varrat ferrit tartalma csökkenni fog. 100% nitrogén alkalmazásakor, vagyis a 44. számú minta esetén ismét közel az alapanyag ferrit értékeit kaptam, melyek a következők voltak: 44,4%; 44,5%; 44,5%. Ezen adatokat a 3.5.3. ábrán lévő grafikon is mutatja. Miután a varratok ferritscop-os mérésével elkészültem, a próbatestek feldarabolása következett a 3.1.1. ábra alapján. A kísérleti hegesztések során sok próbatestet készítettem, közel 60 varratot. Mivel mindegyik varrat további vizsgálatára a nagy darabszám miatt nem volt lehetőségem, illetve nagyon sok időt vett volna igénybe, így a vizsgálati minták számát le kellett szűkítenem. Ennek alapján 18 darab mintát választottam ki. Ezek nagy része a szemrevételezés alapján megfelelő próbatestek voltak, valamint olyan darabok, melyek ugyan látszatra sem feleltek meg a követelményeknek (pl.: nem volt megfelelő az átolvadás), de a későbbi szemléltetés során hasznos információkat adhatnak. A kiválasztott 18 darab próbatest száma a következő volt: 2, 4, 7, 9, 13, 17, 18, 19, 39, 44, 45, 49, 50, 52, 53, 57, 59 és 60. Vagyis a továbbiakban csak ezen mintákról lesz szó, mint az utólagos vizsgálatok szempontjából legtöbb információt adó varratokról.

Tehát az előzőekben felsorolt 18 darab kész hegesztési varratból egy csiszolathoz, egy elektronmikroszkópos mintához, egy korróziós próbatesthez, egy termofeszültség méréshez és egy hajlításhoz alkalmas mintát vágunk ki a szén-dioxid lézer segítségével. A minták vágását a lézersugaras gépen a 3.5.4. ábra szemlélteti



3.5.4. ábra: A kísérleti minták kivágása

A vágást úgy kellett kivitelezni, hogy a kivágott minták ne essenek ki a próbatestből, így minimális hidat állítottunk be a vágás folyamán, mely megtartja a mintát a darabon belül. Ezután a minták kézi erővel kihajlíthatók a próbatestből. A feldarabolt próbatesteket mutatja a 3.5.5. ábra.



3.5.5. ábra: A kivágott próbatestek

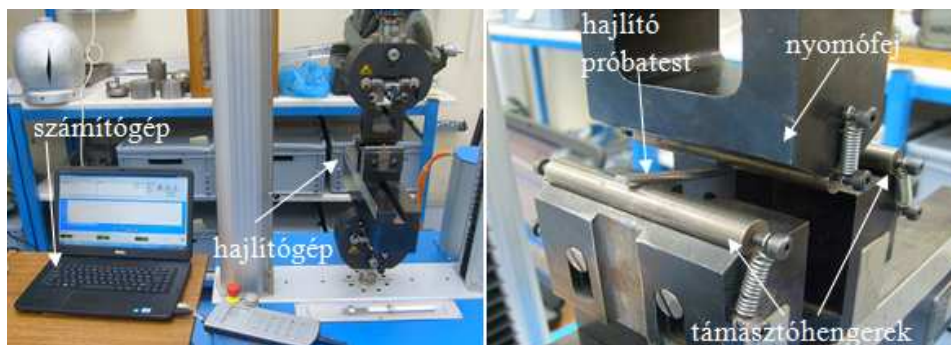
Első lépésként a hajlítási próbát végeztem el. Az ehhez felhasznált minta mérete 2,5x84x5 milliméter méretű volt, ahogy az a 3.1.1. ábrán is látszódik. A hajlítás során a mintát úgy kellett behelyezni, hogy a varrat korona része a húzott oldalon legyen, vagyis a nyomófej felől legyen a gyök oldal. Mielőtt a mintákat behelyeztem volna a hajtógépbe, a gyök dudort le kellett munkálni, hogy a nyomófej megfelelően fel tudjon feküdni a gyök oldalra. Ehhez a mintákat satuba fogtam be és kézi reszelő segítségével eltávolítottam a gyök dudort. A hajlítási próbatesteket a mérés előtt a 3.5.6. ábra mutatja.



3.5.6. ábra: A hajlítási próbatestek

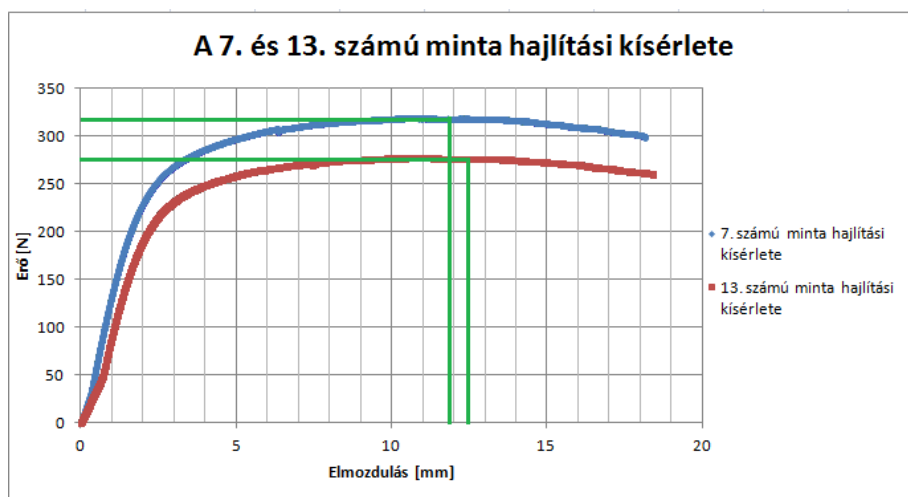
A hajlítást egy Hegewald & Peschke Inspekt 20-1 típusú szakítógépen végeztem el, melyre felszereltem a hajlító fejet és a támasztóhengereket. Így már alkalmas volt a gép a hajítás elvégzéséhez. A mérés elkezdése előtt néhány dolgot be kellett állítani a szakítógéphez kötött számítógépen. A hajlítás sebessége 2mm/perc értékre választottam, mivel így biztosítható a kvázi statikus hajlítás. A mérés akkor indul el, mikor az erő 5 N-t eléri, ekkortól regisztrálja a program az adatokat, vagyis az erőt, az időt és az elmozdulást. A mérés indulása után a nyomófej 18 millimétert mozdul el lefelé. Azért állítottam be ekkora értéket, mivel kb. 19 milliméternél már felfekszik a minta a támasztóhengereknél lévő élekre, amely megkezdődik a mérési eredmények. A mérés akkor áll meg, ha a nyomófej elmozdulása

eléri a 18 millimétert, vagy ha 80 %-os erőleesés következik be. Miután mindezt beállítottam, rá kellett helyezni a mérési mintát a támasztóhengerekre. Ezt követően a nyomófejet addig mozgattam lefelé a mozgató gombok segítségével, míg az majdnem érintette a minta felszínét. Közben figyelni kellett rá, hogy a varrat pontosan középen, vagyis a nyomófej alatt legyen, gyök oldallal felfelé. Mindez végeztével elindítottam a mérést. A mérés során készült képeket a 3.5.7. ábra mutatja.



3.5.7. ábra: A hajlító gép fényképe

A mérés végeztével, miután a nyomófej 18 millimétert elmozdult, a mérési adatokat lementettem. Ezután a daraboknak a cseréje következett, majd indult a mérés előlről. Minden egyes darabnál utólagosan elkészítettem az elmozdulás-erő grafikont. Szemléltetésként a 7. és 44. számú mintáknál az erő alakulását az elmozdulás függvényében a 3.5.8. ábra mutatja.



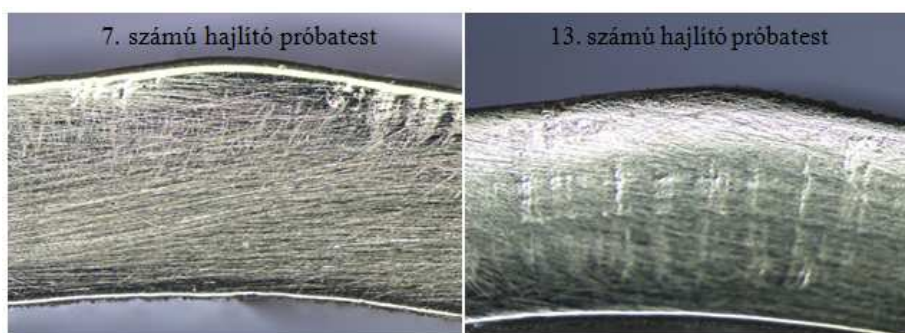
3.5.8. ábra: A hajlítási kísérlet eredményei

A hajlított minták egy részét a 3.5.9. ábra szemlélteti. Látható, hogy a nyomófej 18 milliméteres elmozdulásának hatására a hajlítási szög 27° lett az egyik oldalon, összességében pedig 54° .



3.5.9. ábra: A hajlított minták fényképei

Azért, hogy megbizonyosodjak róla, hogy a varrat korona oldalán nem keletkezett-e repedés, sztereo mikroszkóp alatt vizsgáltam meg minden mintát. A 18 darab hajlító próbatest közül a 7. és 13. számúnak a varratról készült képét a 3.5.10. ábrán láthatjuk.



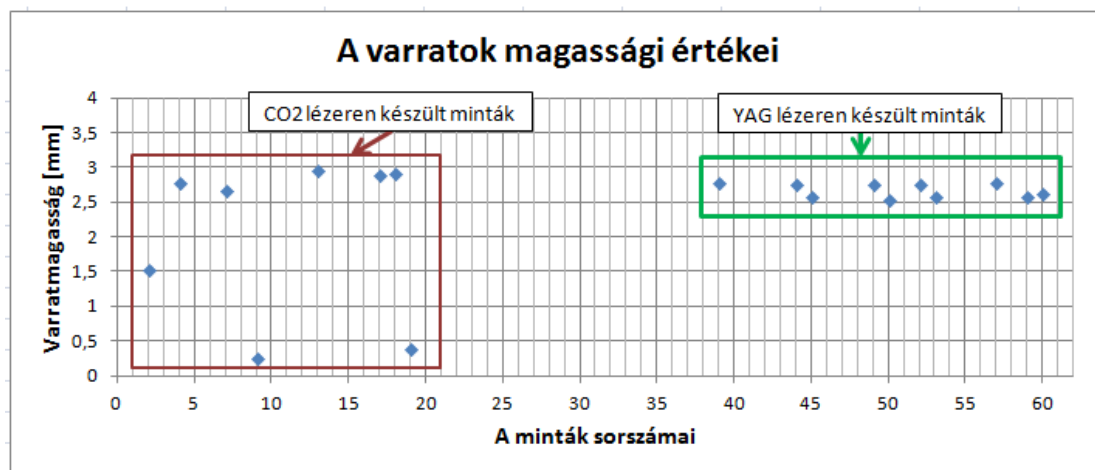
3.5.10. ábra: A hajlított minták mikroszkópi képei

A 3.5.10. ábra jól mutatja, hogy ilyen mértékű hajlítás esetén nem lépett fel repedés a korona oldalon. Ugyanez elmondható a többi mintáról is. Mivel diplomamunkámban ugyanezzel a témával foglalkozom, mint a TDK munkámban, így további célkitűzéseimben szeretném ezeket a hajlított próbatesteket tovább vizsgálni. Ennek során a hajlítás mértékét növelném 90° -ra, 135° -ra majd 180° -ra. Minden hajlítási szög esetén megvizsgálnám a korona oldalakat mikroszkóp alatt, hogy bekövetkezett-e repedés az előző hajlítás óta. A következő lépésként a csiszolatok elkészítése következett. A varratokból kivágott $2,5 \times 10 \times 20$ milliméteres darabokat csiszolópapíron kellett megcsiszolni, egyre finomabb csiszoló szemcsék alkalmazásával. Miután mind a 18 minta elkészült, a polírozás következett, majd a varrat felületének a megmarása. A marás során többféle marószert is kipróbáltam, ugyanis nem mindegyik volt alkalmas a feladatra. A nehézséget az okozta, hogy korrózióálló acélról van szó, mely igencsak ellenáll a savaknak. A Beraha I. típusú marószerezrel nem sikerült a megfelelő mértékű marást elérni, viszont a Kalling II. marószerezrel már alkalmas volt, hogy további mikroszkópi képeket tudjak készíteni a varratokról. A makro képek elkészítéséhez sztereomikroszkópot használtam. A makro kép elkészítése főleg a varrat geometriájáról ad

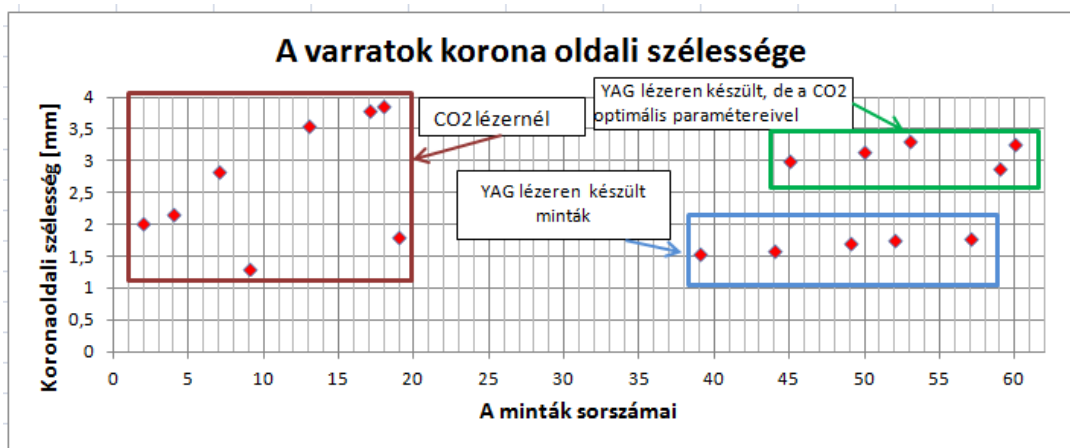
felvilágosítást, mely fontos lehet, ha meg szeretnénk vizsgálni, hogy megtörtént-e az alapanyag teljes átolvadása, illetve a koronának és a gyöknek megfelelő-e a mérete. A képkészítő program segítségével lehetőség van arra, hogy a varrat geometriáját meghatározzam a varrat beméretezésének a segítségével. Vagyis a varrat magasságát, a korona és gyök oldal szélességét. A varrat geometriáról készült adatokat a 3.5.4. táblázat mutatja. A varratok magasságát, korona oldali és gyök oldali szélességét a 3.5.11. ábra, 3.5.12. ábra és a 3.5.13. ábra szemlélteti.

A varratok geometriai adatai			
Minta száma	Varrat magassága [mm]	Korona oldal szélessége [mm]	Gyök oldal szélessége [mm]
2.	1,52	2,02	0,42
4.	2,79	2,17	1,03
7.	2,68	2,84	0,72
9.	0,25	1,31	0
13.	2,96	3,56	0,96
17.	3,79	2,89	0,99
18.	2,92	3,86	1,01
19.	0,39	1,82	0
39.	2,79	1,55	1,04
44.	2,77	1,59	0,88
45.	2,59	3,01	2,51
49.	2,76	1,72	0,92
50.	2,54	3,15	2,58
52.	2,75	1,77	0,88
53.	2,59	3,33	2,69
57.	2,78	1,78	1,08
59.	2,59	2,9	2,26
60.	3,27	2,61	2,37

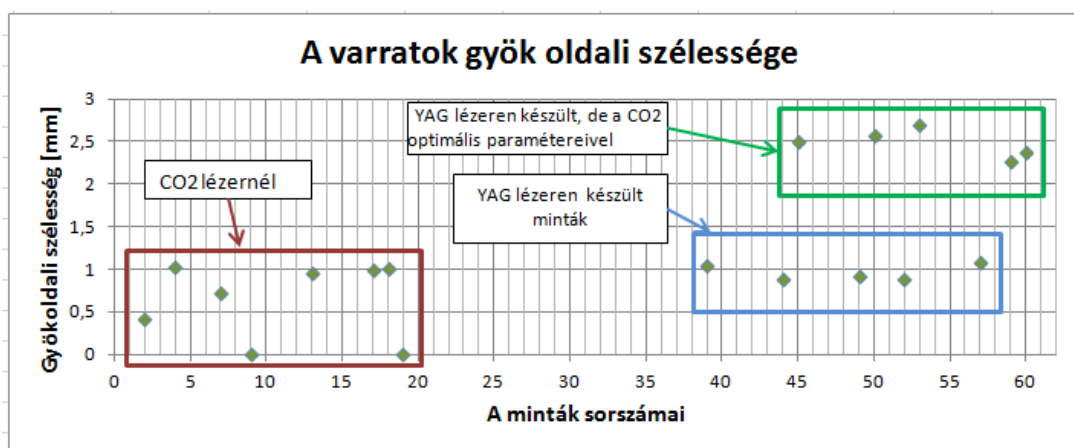
3.5.4. táblázat: A varratok geometriai adatai



3.5.11. ábra: A varratok magassági értékei



3.5.12. ábra: A varratok korona oldali szélessége

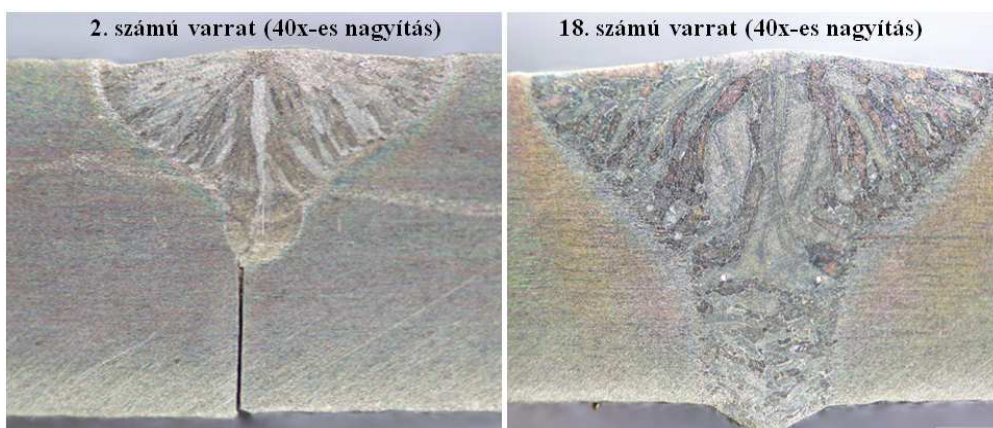


3.5.13. ábra: A varratok gyök oldali szélessége

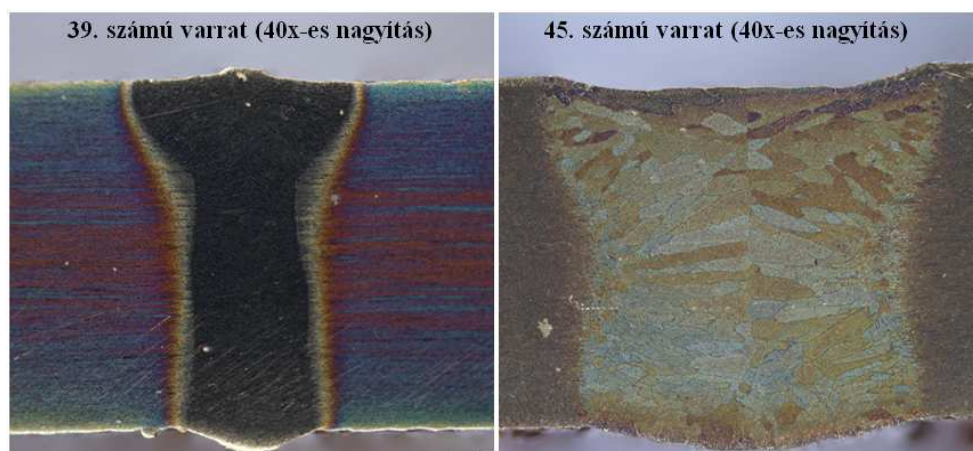
Láthatjuk, hogy a varratok nagy részének a magassága 2,5 mm fölött van kicsivel, a korona és gyök dudor miatt (2,5-3 milliméter között vannak). Viszont a 2., 9. és 19. számú mintáknál a varrat magassága igen kicsi, itt nem történt meg az alapanyagnak a teljes mértékű átolvadása. A varratok korona oldali szélességét vizsgálva láthatóvá válik, hogy azon mintáknál, melyek a YAG lézernél lettek meghegesztve a CO2 lézernél készült optimális varratok paramétereivel, igen szélesre adódott ez a korona méret (2,9-3,3 milliméter között vannak). A CO2 lézernél készült daraboknál viszont nagyobb a szórás. Itt a korona oldal szélessége 2,1-4 milliméter közé tehető (leszámítva a 2., 9. és 19. mintát). A gyök oldal esetén a YAG lézernél készült optimális varratoknál, vagyis a 39., 49., 52., 57. és 44. mintáknál a gyök oldal szélessége közel azonos, 0,8-1,2 milliméter közé tehető. A CO2 lézernél is hasonló a helyzet, itt a 4., 7., 13., 17. és 18. számú varratok gyökoldali mérete 0,7-1,1 között van (eltekintve ismét a 2., 9. és 19. számú mintáktól). Tehát összefoglalásul elmondhatjuk, hogy míg a varratok korona oldalának a méretei igencsak szórtak a CO2 lézernél, addig a gyök

méretek kisebb szórást mutattak ugyancsak a CO₂ lézernél. A YAG lézernél viszont mind a korona oldalnál, mind pedig a gyök oldalnál közel azonosak voltak a méretbeli szórások.

Miután a varratok geometriai méreteit meghatároztam a program segítségével, mind a 18 varratról készítettem makro fényképeket, többféle felbontásban is. A képeken jól látszódnak a varratalakok. A 3.5.14. ábra a 2. és 18. számú, míg a 3.5.15. ábra a 39. és 45. számú varratokat mutatja.



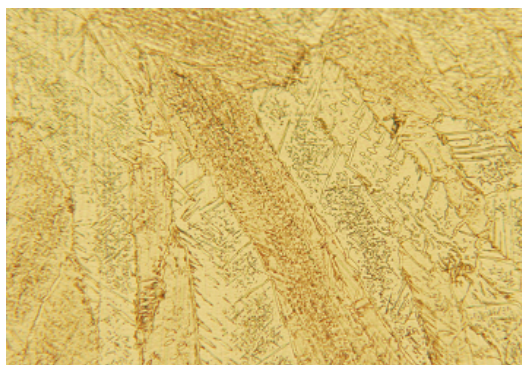
3.5.14. ábra: A 2. és 18. számú varratok mikroszkópi képei



3.5.15. ábra: A 39. és 45. számú varratok mikroszkópi képei

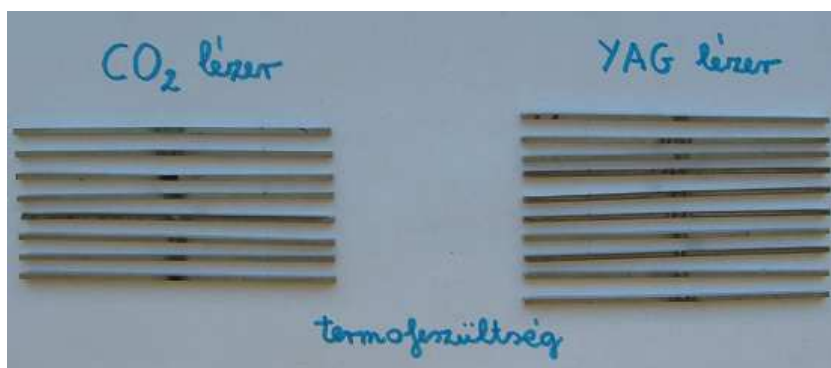
A 2. számú varrat képén jól látszódik, hogy az átolvadás nem volt megfelelő, mivel az előtolási sebesség hegesztés során túl nagy volt. A 18. számú varrat esetén az alkalmazott védőgáz 90 % Ar és 10% N₂ volt, az átolvadás mértéke megfelelő. A 39. számú minta 100% Ar védőgáz használatával készült a YAG lézeren, jól megfigyelhető az Y alakú varrat. A 45. számú varrat is a YAG lézeren készült. Az előtolási sebesség túl kicsit volt, nagymértékű hőbevitel következett be. Ez az oka annak, hogy a korona oldal nem domború, mint a többi esetben, hanem homorú. Miután a varrat geometriát mutató képeket elkészítettem, érdemes

nagyobb nagyítású fényképeket is készíteni, mely a szövetszerkezetet még aprólékosabban mutatja. A 3.5.16. ábra a 18. számú, 10 % N₂ gázt tartalmazó védőgázzal meghegesztett minta képét szemlélteti, 100x-os nagyításban.



3.5.16. ábra: A 18. számú varrat mikrociszolati képe

A 3.5.16. ábrán megfigyelhető a kialakult ferrites-ausztenites szövetszerkezet. A világosabb rész az ausztenit, a sötétebb barnás rész pedig a ferrit. Jól látható, hogy a sötétebb területek összege körülbelül megegyezik a világosabb területek összegével, vagyis a szövetszerkezet nagyjából egyforma mennyiségben tartalmaz ferritet és ausztenitet. Az előbbi állítást a ferritscope-os mérés is alátámasztja, mely szerint a ferrit tartalom kb. 51 % a 18. számú varrat korona oldali részénél. A következő mérési módszer a termofeszültség mérés volt. Ehhez a méréshez 2,5x2x84 milliméter méretű mintákat vágtam ki mind a 18 darab próbatestből a darabolása során. A kivágott mintáknak a képét a 3.5.17. ábra mutatja.



3.5.17. ábra: A termofeszültség méréshez kivágott minták

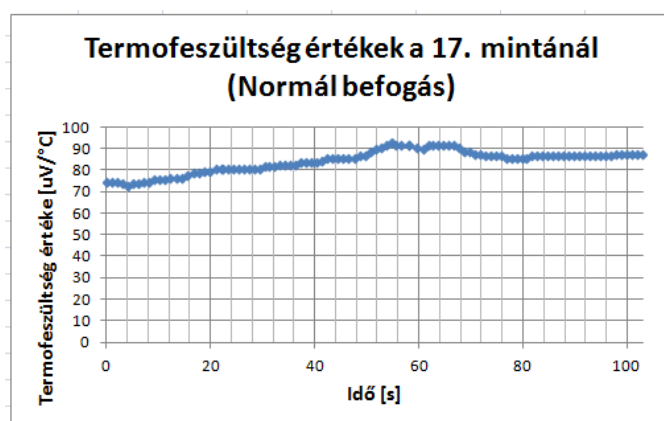
A mérést egy TRIVOLT PK120 típusú termofeszültség mérő segítségével végeztem el. A mérés során kíváncsi voltam rá, hogy a mért termofeszültségek és a minta egyéb tulajdonságai között - mint például az, hogy milyen védőgázzal lett meghegesztve, mennyi a ferrittartalma – milyen összefüggéseket lehet felfedezni. Ahogy láthattuk a ferritscop-os

mérési eredményekből, az alkalmazott védőgáz összetétele nagyban meghatározta, hogy mennyi ferrit alakul ki az anyagban. Tehát a vizsgálattal azt szeretném megnézni, hogy felfedezhető-e kapcsolat a termofeszültség értéke és a ferrittartalom között, vagy ezen két mennyiség között az én esetemben nincsen korreláció. A méréshez használt berendezés fényképét a 3.5.18. ábrán láthatjuk.



3.5.18. ábra: A termofeszültség mérő berendezés

A mérés során a mérendő darabokat a készülékhez tartozó két réz tömbre kellett ráfektetni, majd a csavarokkal le kellett szorítani. Ezt követően elindítottam a mérést a vizsgáló berendezéshez kötött számítógép használatával. A mérést kb. 1-1,5 percre végeztem, ekkorra a termofeszültség értéke stabilizálódott, egy adott értékre állt be. Ezt követően leállítottam a mérést, majd a behelyezett mintát megfordítottam és így is lemértem a termofeszültség értékét. A számítógép a mérés indításán és lezárásán kívül még regisztrálja a termofeszültség értékeket az idő függvényében. Például a 17. számú minta mérésénél regisztrált adatokat a 3.5.19. ábra szemlélteti.



3.5.19. ábra: A termofeszültség mérésének lefutása az idő függvényében a 17. számú varratnál

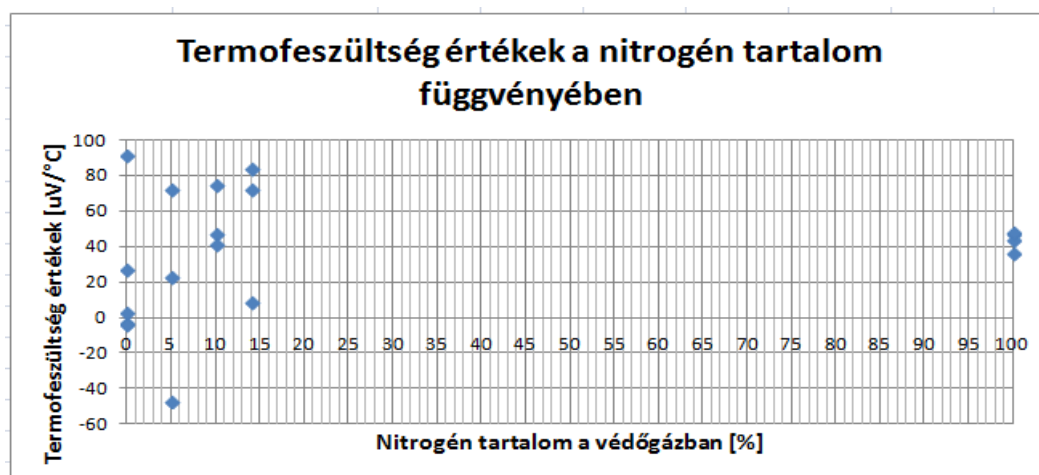
A diagram jól mutatja, hogy a kezdeti ingadozás után, kb. 80 s után már beállt a termofeszültség értéke, így azt le lehet olvasni a diagramon. Ez a 17. számú minta esetén 88 µ

V/°C. Az egyes mintáknál mért termofeszültség értékeket normál befogásnál és fordított befogásnál a 3.5.5. táblázat mutatja.

Minta száma	Termofeszültség érték [uV/°C] (Normál befogás)	Termofeszültség érték [uV/°C] (Fordított befogás)	Minta száma	Termofeszültség érték [uV/°C] (Normál befogás)	Termofeszültség érték [uV/°C] (Fordított befogás)
Alapanyag	-106	-94	60	91	98
2	-3	-7	45	72	69
9	27	36	50	75	80
13	3	4	53	72	82
17	84	84	59	44	53
18	47	40	39	-4	-1
19	-47	-47	49	9	7
4	47	37	52	41	40
7	36	36	57	23	20
			44	48	50

3.5.5. táblázat: A 18 darab mintánál mért termofeszültség értékek

A termofeszültség értékek jobb átláthatóság érdekében érdemes szemléltető diagramot készíteni, mely a termofeszültséget ábrázolja a nitrogéntartalom függvényében. Ezt a diagramot a 3.5.20. ábra mutatja, ahol 0, 5, 10, 14 és 100 % nitrogén mennyiségeknél ábrázoltam a termofeszültség értékét.



3.5.20. ábra: Termofeszültség értékek a nitrogén tartalom függvényében

A diagramból leolvasható, hogy a termofeszültség értékek normál befogás esetén egy-egy nitrogéntartalomnál igencsak szóródnak, kivéve a 100% nitrogéntartalom esetén mért mintákat (hasonló mértékű szóródást kaphatunk, ha a fordított befogásnál mért termofeszültség értékeket ábrázoljuk a nitrogéntartalom függvényében). 100% nitrogéntartalomnál a szóródás 36 és 48 uV/°C között van, ami viszonylag kicsi, viszont a többi gázkeverék kombinációnál már olyan nagymértékű, hogy pontos információ nem nyerhető ki belőle. Így a termofeszültség mérése a vizsgálatom szerint nem lehet

közvetlenül következtetni a minták ferrittartalmára, vagyis a két mennyiség között nincs korreláció.

4. Összefoglalás

Összefoglalásul elmondhatom, hogy a lézersugaras technológia alkalmazását duplex acélokon részletesen megismertem dolgozatom elkészítése során. Nemcsak az utólagos vizsgálatok adtak számomra hasznos tapasztalatokat, hanem közvetlenül a hegesztés során is merültek fel olyan problémák, melyeket a helyszínen kellett megoldani. Ilyen gond volt például a varrat tetejének kormossága, melyet a védőgáz mennyiségének növelésével tudtunk kiküszöbölni. Ez fontos információt adott számomra, hogy mennyire fontos lehet lézersugaras hegesztés során a védőgáz mennyisége.

Az utólagos ferritscope-os mérés során kiderült, hogy a védőgázban lévő nitrogéntartalom hogyan befolyásolja a varrat szövetszerkezetét. 100% argon esetén a ferrittartalom igen magasra adódott az alapanyagéhoz képest, viszont a nitrogén fokozatos hozzákeverése csökkentette ez az értéket. Így 100% nitrogén alkalmazásakor már csaknem az alapanyagével megegyező ferrittartalom alakult ki a varratban, aminek a fontosságát a dolgozatomban részletesen le is írtam. Így a védőgázok összehasonlítása során elmondhatom, hogy a nitrogén alkalmazása növelte a varrat ausztenit tartalmát, visszaállítva ezzel az alapanyagban megszokott fázisarányt.

A varrat geometriáról is fontos információkat kaptam a mikroszkópi mérések során, mely a két lézersugaras gép összehasonlításánál sokat számít. A CO₂ lézer esetén kisebb hegesztési sebességek voltak megfelelőek a varrat geometriáját tekintve. Ha a YAG lézernél alkalmaztam ugyanezeket a hegesztéstechnológiai tényezőket, teljesen más varrat geometriát kaptam. Túl nagy lett a varrat gyök oldali része, a korona oldal pedig nem domború, hanem homorú, kráteres alakú lett. Ha viszont a hegesztés sebességet kb. a háromszorosára növeltük, akkor a varrat alakja ismét megfelelő lett szemrevételezés alapján. Így a két gép összehasonlítása során megállapítható, hogy a YAG lézernél sokkal nagyobb hegesztési sebességek érhetők el, mint a CO₂ lézernél.

A hajlítási próba során megbizonyosodhattam arról, hogy a kísérletben alkalmazott hajítási mérték hatására még nem keletkezik repedés a varrat húzott, vagyis korona oldalán.

Bár dolgozatomban a termofeszültség mérés során nem sikerült kapcsolatot teremteni a védőgáz típusok vagy a ferrittartalom és a termofeszültségi érték között, de további mérések

elvégezése után lehetséges, hogy valamilyen egyéb kapcsolat felfedezhető lesz, mely további segítséget adhat a hegesztett varratok tulajdonságainak a megismerésében.

Bár a TDK dolgozat terjedelme nem engedte meg, hogy egyéb méréseket is végezzek, de további célkitűzéseim közé tartozik, hogy a 3.1. fejezetben tárgyalt egyéb mérési kísérleteket diplomamunkámban elvégezzem. Vagyis szeretném a mintákat mágneses és korróziós mérés alá vetni, valamint elektronmikroszkópon megvizsgálni. Remélem, hogy ezek a további mérések még több információt fognak szolgáltatni a duplex acélok lézersugaras hegesztéséről, melyek az ipar számára is hasznosak lesznek.

5. Felhasznált irodalom

- [1] Bödök Károly: Az ötvözetlen, gyengén és erősen ötvözött acélok korrózióállósága, különös tekintettel azok hegeszthetőségére, Budapest, Corweld, 1997.
- [2] Sándor Tamás: Korszerű duplex korrózióálló acélok hegeszthetőségi kérdései, 25. Jubileumi Hegesztési Konferencia, Budapest, 2010.
- [3] Dr. Takács János, Sklánitz Antal, Dr. Lipovszky György: Teljesítménylezerek, Oktatási segédlet, Budapest, 1993.
- [4] Dr. Bauer Ferenc: Hegesztési eljárások, Tankönyvkiadó, Budapest, 1992.
- [5] Dr. Szunyogh László: Hegesztés és rokon technológiák, Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 2007.
- [6] http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0036_AFSZIA_lezeres_feluletmodositas_modellezese/a_lezersugr_jellemzse.html
- [7] http://www.messer.hu/Infotar/Prospektusok/Hegesztes_es_vagas/Lezergazok_2011.pdf
- [8] Messer: Lézerhegesztés és lézervágás (technológia és gáz-kiválasztás), katalógus
- [9] Dr. Gáti József: Hegesztési zsebkönyv, Cokom Mérnökiroda Kft., Miskolc, 2003.
- [10] ESAB Hírek: Új „lean” duplex acélok és hegeszthetőségük, ESAB Kft., 2010. #1
- [11] Outokumpu katalógus:
<http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Outokumpu-duplex-ldx-grade-2404-data-sheet.pdf>