



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki kar

Anyagtudomány és Technológia tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia

Teimer Zsombor

Gépészmérnöki szak BSc, 5. félév

Ultranagy szilárdságú acélok MAG-hegesztett kötéseinek makroszkópos vizsgálata

Konzulensek:

Dr. habil. Májlínger Kornél

egyetemi docens

Budapest, 2023

Nyilatkozatok

Elfogadási nyilatkozat

Ezen dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Tudományos Diákköri Konferenciára előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a célkitűzésekben megfogalmazottaknak maradéktalanul eleget tesz. Ezen dolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2023. 11. 06.

.....
konzulens

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, Teimer Zsombor (BMCSNY), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023.11.06.

.....
hallgató

Tartalomjegyzék

1. Köszönetnyilvánítás	4
2. A dolgozatban előforduló jelölések, mértékegységek	5
3. Összefoglalás	6
4. Summary	7
5. Irodalmi bevezető.....	8
5.1. Az acélok csoportosítása	8
5.1.1. Az acélok csoportosítása kémiai összetételük szerint	8
5.1.2. Az acélok csoportosítása felhasználásuk szerint.....	9
5.1.3. Az acélok szilárdságának fejlődése.....	11
5.1.4. A nagyszilárdságú acélok felhasználása.....	13
5.2. Az acélok hegesztése	15
5.2.1. A különböző hegesztési eljárások csoportosítása erő- és hőigény szerint	15
5.2.2. Huzalelektrodás, védőgázos ívhegesztés.....	17
5.2.3. Ultranagy szilárdságú acélok huzalelektrodás ívhegesztése	19
6. Az általam elvégzett vizsgálatok	21
6.1. A próbadarabok hegesztett kötéseinek kialakítása	21
6.2. A hegesztett kötésekből a minták kijelölése, kimunkálása, a csiszolatok elkészítése	22
6.3. A varratokból készített metallográfiai csiszolatok kiértékelése	23
6.3.1. Keménységmérés	24
6.4. Az eredmények összehasonlítása a várt adatokkal	28
6.4.1. Lehetséges további kutatási irányok	29
7. Irodalomjegyzék	30
8. Ábrajegyzék	31
9. Mellékletek	33

1. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. habil. Májlinger Kornélnak a témában való útbaigazítást és a rengeteg hasznos tanácsot, segédletet, melyekkel segített kialakítani a dolgozat témáját, és hozzásegített a témában való elmélyüléshez.

Köszönöm az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek a rendelkezésemre bocsátott eszközöket, a Tanszék munkatársainak a számomra nyújtott segítséget.

Köszönettel tartozom az AGMI Anyagvizsgáló és Minőségellenőrző ZRt. -nek, hogy használhattam a cég metallográfiai laborját a dolgozat megírásához szükséges mérések elvégzéséhez, a cég munkatársainak a hasznos tanácsaikért.

2. A dolgozatban előforduló jelölések, mértékegységek

Az alábbi táblázat a dolgozatban gyakrabban előforduló jelöléseket, azok magyar jelentését, illetve amennyiben fizikai mennyiségek, azok mértékegységét tartalmazza.

Jelölés	Jelentés	Mértékegység
t%	tömegszázalék	%
p	nyomás	Pa
m	méter	méter
s	út	m
t	idő	másodperc
E_{ív, lin}	lineáris ívenergia	kJ/mm
V_{hegesztés}	hegesztési sebesség	mm/perc
U	feszültség	V
I	áramerősség	A

3. Összefoglalás

Az acélgyártás kialakulása óta egyre nagyobb mennyiségben kezdtek el acélt használni gépek, eszközök készítéséhez, valamint az épített környezetünkben is megjelent ez az alapanyag. A növekvő igények (szilárdsági, merevségi stb.) miatt az acélok szilárdsága robbanásszerű fejlődésnek indult a második világháború után.

Ennek köszönhetően manapság az ultranagy szilárdságú acélok segítségével olyan szerkezeteket építhetünk meg olyan mechanikai tulajdonságokkal, melyek 50-80 évvel ezelőtt megvalósíthatatlanok lettek volna, például több száz tonna maximális emelőkapacitású autódarukig, tervezett gyűrődőzónával és nagy merevségű utascellával gyártott gépjárművek.

Az acéllemezek egyik jellegzetes kötési módja a hegesztett kötés kialakítása. Dolgozatomban SSAB gyártmányú Docol 1500M és Docol 1700M martenzites, termomechanikusan hengerelt ultranagy szilárdságú acélok hegesztett kötéseinek vizsgálatát hajtottam végre, szemrevételezéssel és metallográfiai csiszolaton végzett keménységméréssel.

4. Summary

Since the beginning of the steel industry, steel usage is on the rise to be used to produce machines, tools and it has introduced itself to our built environment. The rising demands for strength, stiffness etc. has made steel producing companies to make huge developments in the strength of their product range after the second world war.

In consequence, nowadays with the contribution of ultra-high strength steels we are able to produce structures with such mechanical properties, which were impossible to do 50-80 years ago, for example, mobile cranes with hundreds of metric tons of lifting capacity or vehicles with specifically engineered crumple zones and high-rigidity passenger safety cell.

One of the typical joining method of steel plates is welding. In my paper I performed macroscopic examination of welded joints of Docol 1500M and Docol 1700M martensitic, thermomechanically rolled ultra high-strength steels, produced by SSAB, by visual testing and hardness testing done on metallographic specimens.

5. Irodalmi bevezető

Dolgozatom első részében az acélok és a hegesztés terén végzett irodalomkutatásom eredményeit fogom bemutatni, részben szakirodalomra, részben a saját ismereteimre támaszkodva, nagyobb hangsúlyt fektetve a dolgozat témáját tekintve relevánsabb részekre, úgymint az ultranagy szilárdságú acélok, valamint az huzalelektrodás aktív védőgázos ívhegesztés.

5.1. Az acélok csoportosítása

Acéloknak azokat a vas-szén ötvözeteket nevezzük, amelyekben legfeljebb 2,1 t% szén található meg. Ezeket az ötvözeteket számos mód alapján csoportosíthatjuk, az alábbiakban ezek közül mutatom be a fontosabbakat.

5.1.1. Az acélok csoportosítása kémiai összetételük szerint

Az acélok egyik lehetséges csoportosítási módja a vegyi összetétel szerint történő csoportosítás. Itt két nagy csoportot különböztetünk meg, az egyik az ötvözetlen acélok, a másik pedig az ötvözött acélok. Előbbi esetén a szénen kívül más, az acélgyártás során szándékosan hozzáadott ötvözőt nem tartalmaz az acél, míg az utóbbi nagy csoporton belül három kisebb csoportot tudunk megkülönböztetni. Ezek az összes ötvözőtartalom szerinti növekvő sorrendben:

- gyengén ötvözött – itt a teljes ötvözőtartalom kevesebb, mint 5 t%,
- közepesen ötvözött – ebben az esetben a teljes ötvözőtartalom 5 és 10 t% közötti,
- erősen ötvözött acélokról pedig akkor beszélünk, amikor a teljes ötvözőtartalom meghaladja a 10 t%-ot.

Ezeket a csoportokat a jelölésük is elkülöníti. Az ötvözetlen acélok esetén C-vel kezdődik a jelölés, ez utal arra, hogy a mangántartalom nem haladja meg az 1 t%-ot[1], és csak a szén mennyisége van beállítva és szavatolva, például C45. Itt a „45” a széntartalom tömegszázalékban kifejezett mennyiségének a százszorosa. Ötvözött acélok esetén 10 t% összes ötvözőtartalomig az első szám megadja a széntartalom tömegszázalékban kifejezett mennyiségének százszorosát, utána az ötvözőelemek vegyjelei következnek, végül pedig ezen elemeknek a tömegszázalékos mennyisége az ötvözetben, a megfelelő szorzótényezővel felszorozva. Ezeket a szorzótényezőket az 1. táblázat tartalmazza. Egy ilyen acél például a

28Cr4, ahol „28” a széntartalom tömegszázalékban kifejezett értékének százszorosát adja meg, „Cr4” pedig megmutatja, hogy az ötvözet krómtartalmának középértéke 1 t%. Erősen ötvözött acélok esetében a jelölés „X” -szel kezdődik, ezzel utalva az acél erősen ötvözöttségére. Utána következik a széntartalom tömegszázalékban kifejezett mennyiségének százszorosa, majd pedig az egyes ötvözőelemek vegyjelei, majd azok mennyisége tömegszázalékban megadva, kötőjellel elválasztva, mindig t%-ban, csökkenő sorrendben.

1. táblázat – Az acélok egyes ötvözőinek szorzótényezői, acéloknál

Az ötvöző vegyjele	Szorótényező
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
C, Ce, N, P, S	100
B	1000

5.1.2. Az acélok csoportosítása felhasználásuk szerint

Egy másik, szintén gyakran alkalmazott csoportosítási mód az acélok felhasználási módjuk szerinti csoportosítás. Eltérő acélokat igényelnek például a vasúti sínek, a nyomástartó edények, valamint a hidegalakított termékek. A javasolt felhasználási módra utal a jelölésrendszer is, itt az első betű megadja a felhasználási célt, az utána következő számsor pedig az adott felhasználás esetén a legfontosabb jellemző paramétert. Például szerkezeti acélok esetén az „S” betű utal a felhasználási módra (structural), az utána következő számsor pedig a legkisebb vastagságosztályra előírt minimális folyáshatárt mutatja meg, MPa-ban kifejezve [1]. Ezeket a betűjeleket és a hozzájuk tartozó számérték jelentését a 2. táblázat mutatja be.

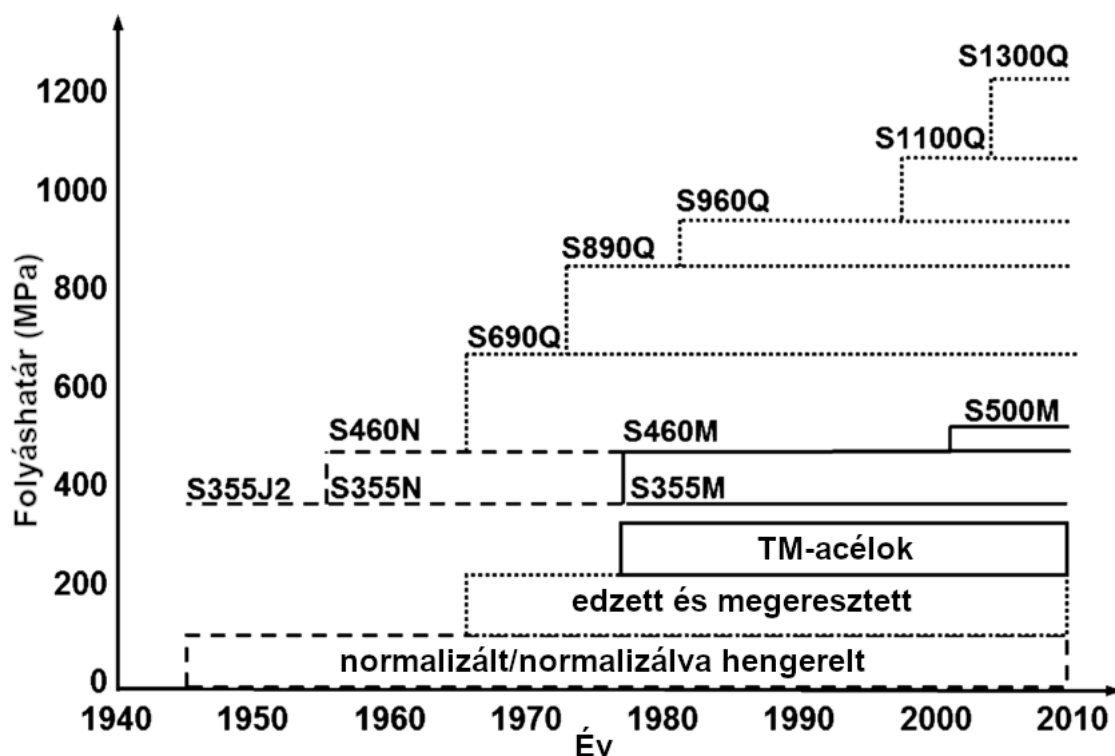
2. táblázat – Az acélok felhasználás szerinti jelölési rendszerének betűjelei és az egyes acéltermékeket jellemző mechanikai tulajdonság számértékei (xxx) [1]

Acélcsoport	Főjel		Fő mechanikai tulajdonságok (kivéve elektrotechnikai acéloknál)
Szerkezeti acélok	S	xxx ¹	A legkisebb vastagságtartományra előírt legkisebb folyáshatár MPa-ban megadva
Nyomástartó berendezések acéljai	P	xxx	
Acélok csővezetékekhez	L	xxx	
Gépacélok	E	xxx	
Betonacélok	B	xxx	A jellemző folyáshatár MPa-ban
Sínacélok és sínek	R	xxx	Előírt legkisebb HBW keménység
Lapos termékek nagyszilárdságú acélból hidegalakításra	H	Cxxx Dxxx Xxxx CTxxx(x) DTxxx(x) XTxxx(x)	C: hidegen hengerelt D: melegen hengerelt X: hengerlési állapot nincs előírva Txxx: előírt szakítószilárdság (MPa) xxx: előírt folyáshatár (MPa)
Lapos termékek hidegalakításra	D	Cxx Dxx Xxx	Cxx: hidegen hengerelt Dxx: melegen hengerelt Xxx: hengerlési állapot nincs előírva
Elektrotechnikai acélok	M	A, D, E, N, S, P	Az előírt mágneses tulajdonságoktól, a szemcsézet irányítottságától és a hőkezelési állapottól függően

¹ Az „xxx” karaktersorozat az egyes acéljelölésekben található számokat jelöli.

5.1.3. Az acélok szilárdságának fejlődése

A második világháború után az acélipar rohamos fejlődésnek indult. Egyre nagyobb szilárdságú acélokat fejlesztettek az acélgyártók. A hatvanas években nemesített acéltermékek, míg a hetvenes évektől kezdve a termomechanikusan hengerelt acéltermékek is megjelentek a piacon.



1. ábra – A nagyszilárdságú acélok fejlődése 1940 után [2]

A normalizált acéloknál a cél a szövetszerkezetre ható negatív irányú változások visszafordítása teljes vagy részleges újrakristályosodással, ezáltal durvaszemcsés acéloknál a szemcseszerkezet finomodása érhető el, ami szilárdságnövekedéssel jár.

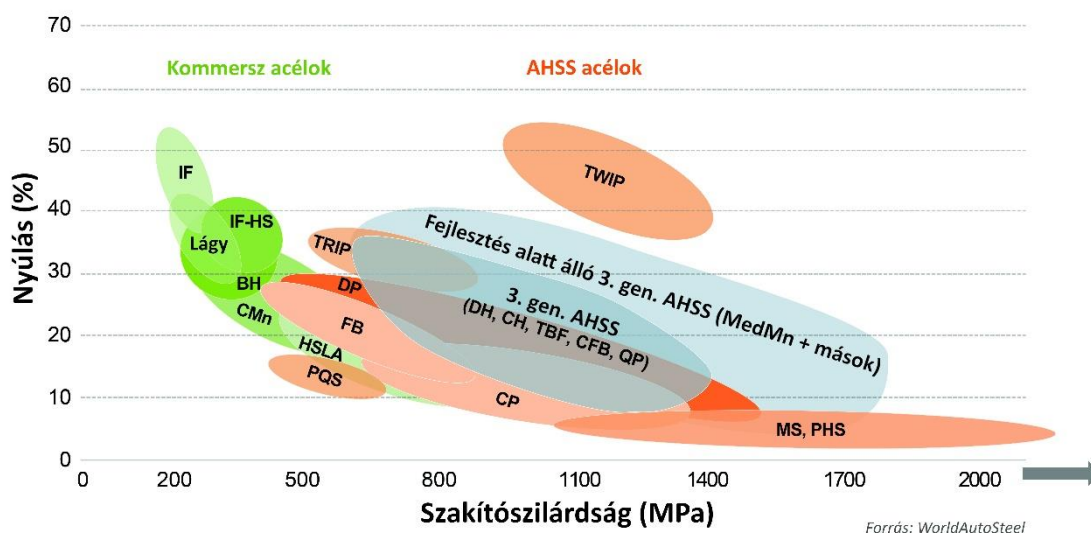
A nemesített, azaz edzett és megeresztett acéloknál a nem diffúziós átalakulás során keletkező martenzit három fő hatásmechanizmus útján idéz elő szilárdságnövekedést[3]:

- erőteljes rácsorzulás az intersztíciós, azaz rácsközi szénatomok miatt,
- megnövekedett diszlokációsűrűség
- az a) pontban leírtak miatti térfogatnövekedés okozta belső feszültségek

A termomechanikus hengerlés során az előalakítást (nagyolást) melegalakítási hőmérsékleten végzik, azonban a készméretre alakítás valamivel kisebb hőmérsékleten

történik. A technológia során két ok miatt növekszik a szilárdság. Az egyik a szemcsefinomodás, mely a kontrollált hőmérsékletű hengerlésnek köszönhető, a másik pedig a mikroötvözés, mely során nitrid- és karbidképző ötvözőket adunk az acélhoz, a nagyobb hőmérsékletű finomszemcsés stabilitás érdekében [3].

Napjainkban már számos típusú nagyszilárdságú acél érhető el a piacon. A hagyományos nagyszilárdságú acélokat, mint például a HSLA – high strength low-alloy (nagy szilárdságú, gyengén ötvözött) acélokat az AHSS – advanced high strength steel (fejlett nagyszilárdságú acél) acéloktól az különbözteti meg, hogy utóbbiak elsősorban többfázisú szövetszerkezettel rendelkeznek, olyan arányban, hogy elérjék a megfelelő szilárdsági tulajdonságaikat. Ezeket szemléletesen az alakíthatósági diagramon, avagy az acélok banándiagramján lehet bemutatni (2. ábra)[4].



2. ábra – Az acélok csoportosítása szakadási nyúlás és szakítószilárdság szerint[4]

A 2. ábra alapján látható, hogy a dolgozat keretein belül vizsgált Docol 1700M és Docol 1500M acélok hol helyezkednek el a többi nagyszilárdságú acélhoz képest. Az acélok adatlapját megtekintve az acéltermék bővebb megnevezése is látható. Ebből megállapítható, hogy a Docol acélok ezen típusai CR, azaz hidegen hengerelt (cold rolled), valamint MS, azaz martenzites acélok, kicsi, 3%-os szakadási nyúlással, melyeket az acélok adatlapján is megtalálunk, ezeket a 3. táblázat tartalmazza. A Docol, mint megnevezés, márka az SSAB Svenskt Stål AB tulajdona, mely Skandinávia egyik meghatározó acélgyártó cége [5].

3. táblázat – A Docol 1700M és Docol 1500M acélok adatlapja alapján az egyes acélok gyártói jelölése, mechanikai tulajdonságai

Megnevezés	Docol 1500M	Docol 1700M
Gyártói jelölés	Docol CR 1220Y1500T-MS	Docol CR 1350Y1700T-MS
Szabvány	VDA 239-100	VDA 239-100
Folyáshatár $R_{p0,2}$ (MPa)	1220-1520	1350-1700
Szakítószilárdság R_m (MPa)	1500-1750	1700-2000
Nyúlás A_{80} (min %)	3	3

5.1.4. A nagyszilárdságú acélok felhasználása

A nagyszilárdságú acélokat tipikusan ott használják fel, ahol a szilárdság növelése a cél, azonban a szerkezet tömege nem növekedhet. A szerkezeti acélok szilárdságának növekedésével megvalósulhatott az egyre nagyobb és nagyobb emelőkapacitású autódaruk fejlesztése[6]. Jó példa erre az SSAB másik termékcsaládja, a Strenx®. Ez a megnevezés nagyszilárdságú szerkezeti acélokat takar, melyet a gyártó cég kifejezetten mobil darukban való felhasználásra is ajánl [7].

Az autóiparban a biztonság, a karosszéria merevségének növelésének és a súly csökkentésének érdekében szintén elkezdtek használni a nagyszilárdságú acélokat. Ezeket az elemeket jellemzően nyújtva-húzással állítják elő a lemezekből. Manapság már a legtöbb személyautó önhordó karosszériával készül, ez azt jelenti, hogy a terheléseket a teljes szerkezet fel tudja venni. Ez önálló elemekből kerül összeszerelésre, melyek közül számos ultranagy szilárdságú acélból készült is megtalálható. Ezekkel optimálisan kialakítható az utascella megfelelő szilárdsága és merevsége, hogy megóvja a járműveket egy esetleges baleset során, valamint megfelelő megtámasztást biztosít a gyűrődőzónáknak, hogy azok elegendő energiát tudjanak elnyelni.



3. ábra – Volvo XC40 típusú személygépkocsiban felhasznált jellemző acéltípusok [8]

Környezetvédelmi szempontból is előnyös nagyszilárdságú acélokat alkalmazni. Mivel ugyanakkora terhelés elviseléséhez egy szerkezetet kisebb keresztmetszetű elemekből meg lehet valósítani, ezáltal a kész szerkezet könnyebb lesz. Ez a súlycsökkenés meg fog mutatkozni a szállítás költségeiben és a szállítás, üzemeltetés során kibocsátott károsanyag-mennyiségben is. A dízelüzemű járművek jelentős szerepet játszanak a nitrózus gázok (NO_x) emissziójában. A tehergépjármű által szállított rakomány súlyának megkétszereződése esetén egy 2003-as, nyugat-virginai tanulmány alapján mintegy 54%-kal megnövekedett a nitrózus gáz-kibocsátás [9]

Az acélgyártás során jelentős mennyiségű fosszilis energiahordozó kerül felhasználásra és ezek mind-mind növelik egy gépjármű vagy acélszerkezet karbonlábnyomát. Erre megoldás lehet újabb, környezetbarátabb acélgyártási eljárások alkalmazása, kidolgozása, mellyel megvalósulhat a zöld acél, mely gyártása karbonsemleges, azaz nem bocsát ki több szén-dioxidot, mint amennyit a légkörből ki lehet vonni, illetve amennyi a szénelnyelőkben² található [10]. Ezt az SSAB 2026-ig vállalta elérni, az acélgyártásban felhasznált kokszt megújuló hidrogénre cserélésével [11].

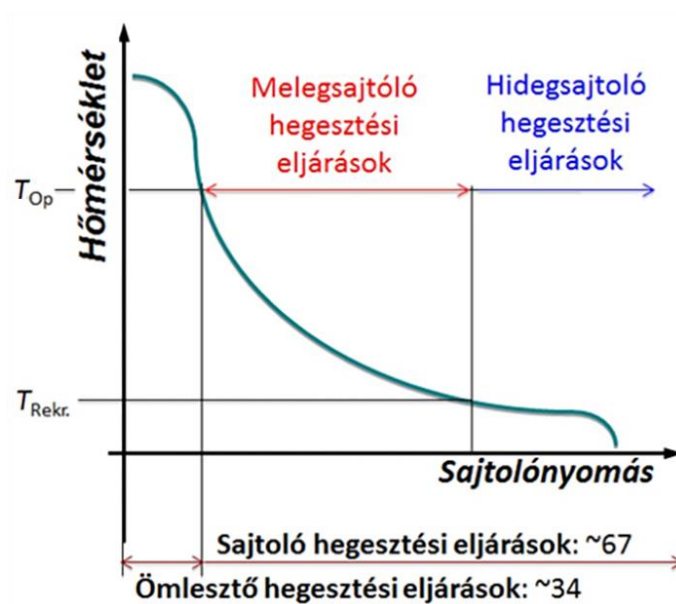
² Szénelnyelő: olyan rendszerek, amelyek kevesebb szén termel, mint amennyit megköt.

5.2. Az acélok hegesztése

A hegesztett kötés egy olyan oldhatatlan, kohéziós kapcsolatot biztosító kötéstípus két vagy több alkatrész között, melynél a kötésben résztvevő alkatrészek eredeti kontúrjai megváltoznak, azok között fémes kapcsolat jön létre. Ehhez nagy mennyiségű energiára van szükség, mely számos forrásból származhat.

5.2.1. A különböző hegesztési eljárások csoportosítása erő- és hőigény szerint

A hegesztett kötés kohéziós kapcsolatát számos módon létre lehet hozni. A két fő mód erre a sajtoló- és az ömlesztőhegesztések. Az első csoport esetén a munkadarabok közti fémes kapcsolatot nagy mértékű, 150-200%-os alakváltozással hozzuk létre, az olvadáspontot nem feltétlen elérve [3]. A második csoport esetén az alkatrészek érintkező felületeinek megolvasztásával, hozaganyag adagolásával vagy anélkül alakul ki a hegesztett kötés. A két fő működési elv egymáshoz viszonyított helyzetét a 4. ábra mutatja be.



4. ábra – A hegesztési eljárások csoportosítása a szükséges hőmérséklet és nyomás függvényében [3]

A sajtoló hegesztések közül a két leggyakoribb az ellenállás-ponthegesztés, valamint a dörzshegesztés. Előbbi esetben az elektródák hozzák létre a hegesztéshez szükséges sajtolóerőt, majd az elektródákon átfolyó áram hatására a munkadarabokban hő fejlődik, ezáltal az anyag könnyebben alakíthatóvá válik, így jobban össze lehet azokat szorítani, míg a

ciklus végén, a hegesztőáram kikapcsolásakor a kialakult ömledék kihűl, megszilárdul és kialakul a hegesztett kötés, az elektródák kinyílnak. Utóbbi esetben jellemzően két forgásszimmetrikus darab kapcsolata valósul meg. Az egyik darabot szilárdan befogjuk, míg a másikat az álló darabnak nekiszorítva forgatni kezdjük. A két munkadarab súrlódása miatt kialakuló hő hatására az érintkező felületek és azok környezetei újrakristályosodási hőmérséklet fölé hevülnek. Az előre beállított forgási idő után a forgatóerő megszűnik, és a két darabot még nagyobb erővel sajtoljuk egymáshoz. Így az álló darab fékezi le a még forgó darabot, így alakul ki a kötés. Ezzel az eljárással akár eltérő fémek is hegeszthetők, akár acél alumíniummal.

Az ömlesztő hegesztési eljárások során valamilyen energiaforrás segítségével a munkadarabok csatlakozó felületeit megolvasztjuk, és a kialakuló hegfürdő kristályosodása útján valósul meg a hegesztett kötés kialakulása.

A fent bemutatott eljárásokhoz az energia számos forrásból származhat, ezek közül a jellegzetesebbek energiaforrásait a 4. táblázat mutatja be.

4. táblázat – Néhány gyakran alkalmazott hegesztési eljárás energiaforrása

Energia jellege	Energia forrása	Hegesztési eljárás megnevezése
Termokémiai	Égéshő	Lánghegesztés
Elektromos	Ívhő	Ívhegesztés
	Ellenálláshő	Ellenállás-hegesztés
Mechanikai	Alakváltozási energia	Sajtolóhegesztés
	Súrlódási energia	Dörzshegesztés

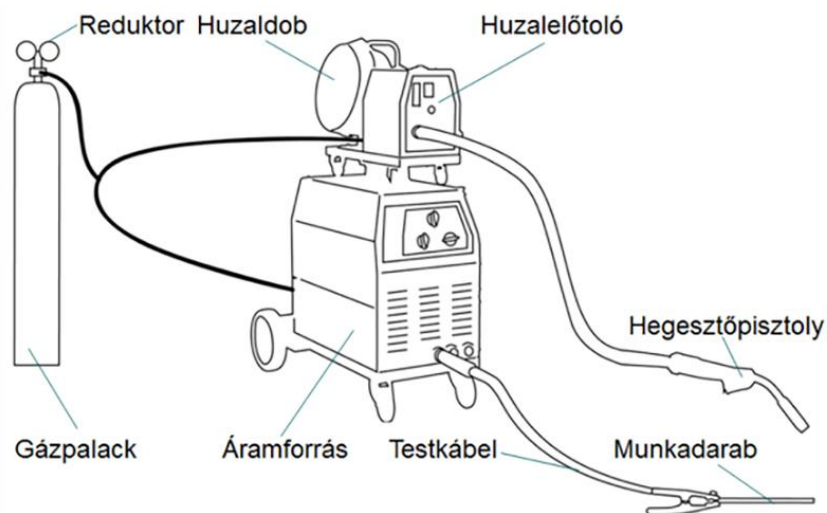
5.2.2. Huzalelektródás, védőgázos ívhegesztés

A huzalelektródás ívhegesztés során a hegesztőáramot a hegesztőtranszformátor vagy -inverter biztosítja. Ezt az egységet áramforrásnak nevezzük. Ez összeköttetésben áll a huzalelőtolóművel, melyben egy vagy több görgőpár továbbítja a hegesztőhuzalt a beállított huzalelőtolási sebességgel. A hegesztőhuzal a munkakábelén át jut el a hegesztőpisztolyhoz, ahol az áramátadón megjelenik a hegesztőáram, majd ez folyik tovább a huzal végére.

A gázpalackban található a védőgáz az eljáráshoz, mely lehet aktív, jellemzően argon és szén-dioxid keveréke, vagy semleges, argon vagy hélium. A két csoportot az különbözteti meg egymástól, hogy az aktív védőgázban az aktív komponens (jellemzően szén-dioxid, oxigén, nitrogén, hidrogén stb.), mely részt vesz metallurgiai folyamatokban a hegfürdővel érintkezve, míg a semleges védőgázban nem található ilyen komponens, így az nem hat ilyen szempontból a hegfürdőre.

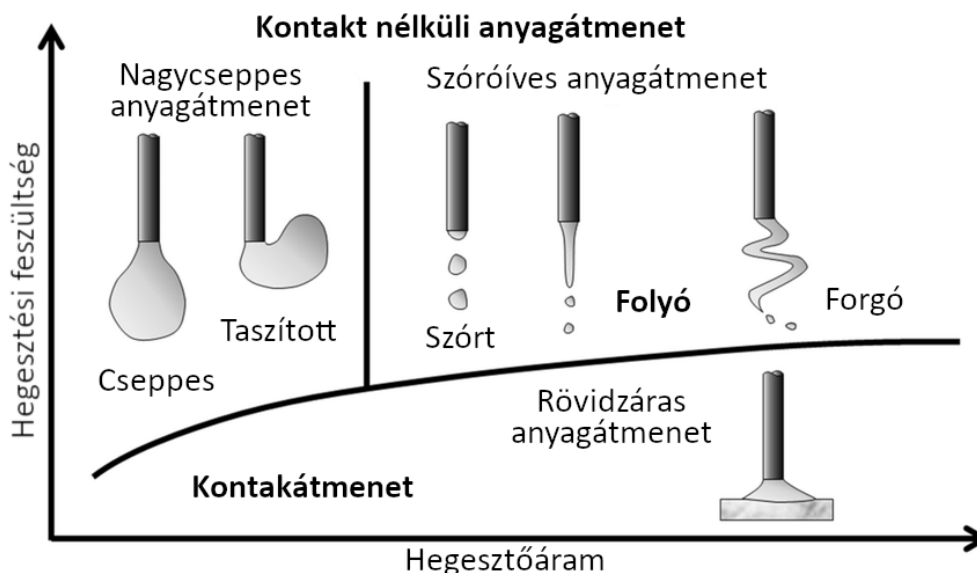
A védőgáz a palackból először a reduktorba jut, ahol beállítható a kívánt térfogatárama a védőgáznak, majd innen a huzalelőtolóművön keresztül bejut a munkakábelben található gázcsőbe, mely eljuttatja azt a hegesztőpisztoly végén található fúvókákhoz. Ezek a fúvókák általában radiális irányban állnak, és a kiáramló védőgázt a gázterelő tereli a hegfürdő felé.

Az elektromos ív kialakulásához két ellentétes pólus szükséges, ezt a testkábel biztosítja. Ezt a hegesztő áramforrás negatív pólusára kell csatlakoztatni, míg a hegesztőhuzalt a pozitív pólusra. A testkábel végén található a testcsipesz, ezzel lehet a munkadarabhoz csatlakoztatni. Egy ilyen elrendezésű huzalelektródás ívhegesztő berendezés vázlata látható az 5. ábraán



5. ábra – A huzalelektrodás ívhegesztés általános elrendezése [3]

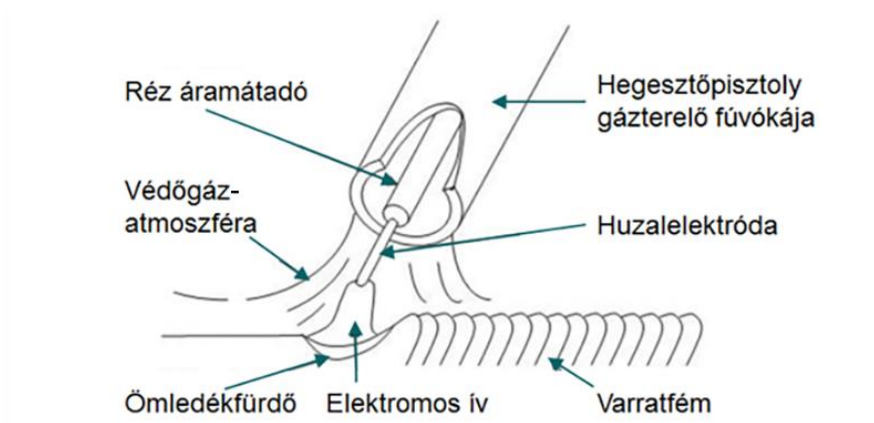
Az eljárás során az ív a hegesztőhuzal és a munkadarab között ég, itt valósul meg az anyagátmenet a folyamatos huzalelőtolásnak köszönhetően. Ez a hegesztőáramtól és a hegesztési feszültségtől függően számos módon létrejöhet. Ezeket a módokat mutatja be a 6. ábra. A dolgozat keretében vizsgált darabok hegesztése során rövidzáras anyagátmenet valósult meg, tekintettel a vékony lemez hegesztéséhez szükséges kis hegesztőáramra.



6. ábra – A huzalelektrodás ívhegesztés során megvalósuló anyagátmenetek [12]

A huzal leolvadása után megvalósul az anyagátmenet, mely kristályosodása létrehozza a varratot. A 7. ábra ennek a vázlatát mutatja be. A hegesztés során az ív hatására kialakul a hegesztett munkadarab(ok)on egy megolvadt zóna, ezt hegfürdőnek vagy ömledékfürdőnek

nevezzük. A védőgáz elsődleges célja, hogy az ívet és ezt az olvadt zónát megvédje az atmoszférától, elzárja azt a környező oxigéntől.



7. ábra – A huzalelektródás ívhegesztés varratképzési módjának vázlata [3]

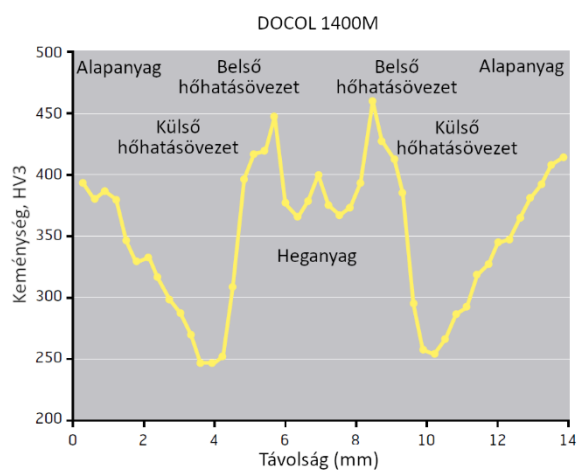
5.2.3. Ultranagy szilárdságú acélok huzalelektródás ívhegesztése

Az ultranagy szilárdságú acélok huzalelektródás ívhegesztése számos kihívást rejt magában. Az egyik ilyen a megfelelő hozaganyag kiválasztása. Míg ultraagy szilárdságú acélból már előállítottak 2400 MPa szakítószilárdságút is, a jelenleg a piacon elérhető legnagyobb szilárdságú hegesztőhuzal „mindössze” 1050 MPa-os folyáshatárral rendelkezik [13], [14]. Ez a legtöbb esetben lehetetlenné teszi, hogy azonos vagy nagyobb szilárdságú hozaganyagot válasszunk a hegesztett kötésünkhöz.

A hegesztés során fellépő hőbevitel miatt az elsődleges hőhatásövezetben a szemcsedurvulás miatt jelentős szilárdságcsökkenés mutatkozik. Ez a varrat keresztmetszetéről készült metallográfiai csiszolaton végzett keménységmérés alapján megállapítható [15]. A 8. ábra példaként Docol 1400M lemezek hegesztett kötésének keménységlefutását mutatja meg. A kötés kialakításának főbb paramétereit a 5. táblázat tartalmazza [15]. A kötések kialakításakor fontos szempont a hőbevitel minimalizálása, mert ezzel csökkenthető a szemcsedurvulás mértéke, ezáltal növelhető a hőhatásövezet szilárdsága, ezáltal az egész kötés szilárdsága is javulni fog.

5. táblázat – Docol 1400M lemezek hegesztett kötésének főbb paraméterei [15]

Lemezvastagság	1 mm
Kötés kialakítása	Tompavarrat, I-gyök
Hőbevitel	0,09 kJ/mm
Hozaganyag	EN ISO 16834 -A- Mn4Ni2CrMo
Védőgáz	Argon – szén-dioxid gázkeverék



8. ábra – Docol 1400M acél hegesztett kötésének keménységértékei a varrat keresztmetszetében [15]

6. Az általam elvégzett vizsgálatok

A keménységmérés a vizsgálat jellege miatt összefüggésben van a vizsgált minta anyagának szilárdsági tulajdonságaival. Mivel egy vizsgálati eljárásra jellemző behatolószerszámot nyomunk bele a minta felszínébe, majd a megtett útból (Rockwell-eljárás) vagy a lenyomat méretéből (Vickers-eljárás, Brinell-eljárás stb.) határozzuk meg a keménységet. A lenyomat elkészültéhez a darabnak képlékenyen kell alakulnia, ezért a keménység közvetetten utal a minta szilárdsági tulajdonságaira.

A fémek hegesztett kötésein végzett keménységmérést az MSZ EN ISO 9015-1:2011 Fémek hegesztett kötéseinek roncsolásos vizsgálatai. Keménységvizsgálat. 1. rész: Ívhegesztéssel készített kötések keménységvizsgálata (ISO 9015-1:2001) szabvány szabályozza, így a dolgozatban vizsgált mintákon a keménységmérést a szabványban meghatározott módon végeztem el.

6.1. A próbadarabok hegesztett kötéseinek kialakítása

A vizsgálat során a változó paraméterem a hegesztőáram volt. A megismételhetőséget és a varratok konzisztens kialakításának érdekében a hegesztést hegesztőautomatával végeztem. Ennek köszönhetően minden hegesztési varrat azonos hegesztési sebességgel készült. Az egyes próbadarabok kialakításához felhasznált lemezeket és a hegesztési paramétereket a 6. táblázat tartalmazza. A hegesztési sebesség minden esetben egységesen 578,75 mm/perc volt, melyet 11 időmérés átlagából és a megtett útból számítottam ki az (1) egyenlet alapján. Itt $v_{\text{hegesztés}}$ a hegesztési sebesség, s a megtett úthossz, míg t az az idő, amely szükséges volt az s táv megtételéhez.

$$v_{\text{hegesztés}} = \frac{s}{t} \quad (1)$$

A hegesztési paramétereiből a ((2) egyenlet alapján a lineáris ívenergia is meghatározható, mely a 2.-5. számú minták esetében 0,0995 kJ/mm-re, a 6.-8. számú minták esetében 0,107 kJ/mm-re adódott. Ebben az egyenletben $E_{iv, lin}$ a lineáris ívenergia, U az ívfeszültség, I a hegesztőáram és $v_{hegesztés}$ a hegesztési sebesség

$$E_{iv,lin} = \frac{U \cdot I}{v_{hegesztés}} \quad (2)$$

6. táblázat – Az egyes próbatestek hegesztése során alkalmazott hegesztési paraméterek

Sorszám	Lemezek típusai	Huzalelő- tolási sebesség (m/perc)	Ívfeszültség (V)	Hegesztőáram (A)
2.	1500M-1500M	1,5	16,0	60
3.	1700M-1700M			
4.	1700M-1700M			
5.	1700M-1500M			
6.	1700M-1700M	1,6	16,2	64
7.	1500M-1500M			
8.	1700M-1500M			

A hegesztett kötések kialakításához Elga MEGAFIL 1100M fémportöltetű hegesztőhuzalt használtam, melynek jellemző szakítószilárdsága 1050 MPa [14].

6.2. A hegesztett kötésekől a minták kijelölése, kimunkálása, a csiszolatok elkészítése

Az elkészült hegesztett kötésekől két helyen jelöltem ki metallográfiai csiszolatokat. Az első, „A” jelű mintát a varrat kezdetétől számított 15 mm-re jelöltem ki, mivel ezen a ponton minden lemezen megvalósult a gyökoldali átolvadás. A második, „B” jelű mintát a varrat kezdetétől 45 mm-re vettem ki.

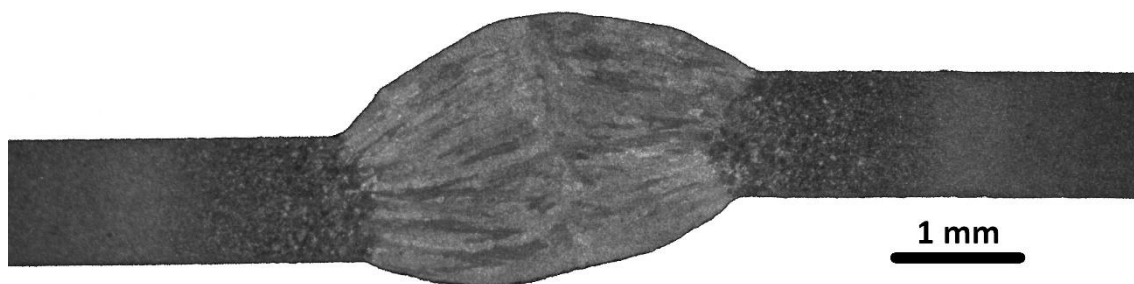
A lemezeket szalagfűrészszel daraboltam, megfelelő hűtés és kenés, mellett, hogy a vágás során fejlődő hő ne módosíthassa a lemezek eredeti, valamint a hegesztés során

kialakult szövetszerkezetet. Ezután a lemezek széleit lemezollóval vágtam rövidebbre, hogy a melegbeágyazó berendezésbe el tudjam a mintákat helyezni.

Miután a melegbeágyazott minták kihültek, csiszolással és polírozással készítettem elő őket, majd a felületet 3 %-os Nital oldattal marattam meg, ezáltal láthatóvá vált a szövetszerkezet.

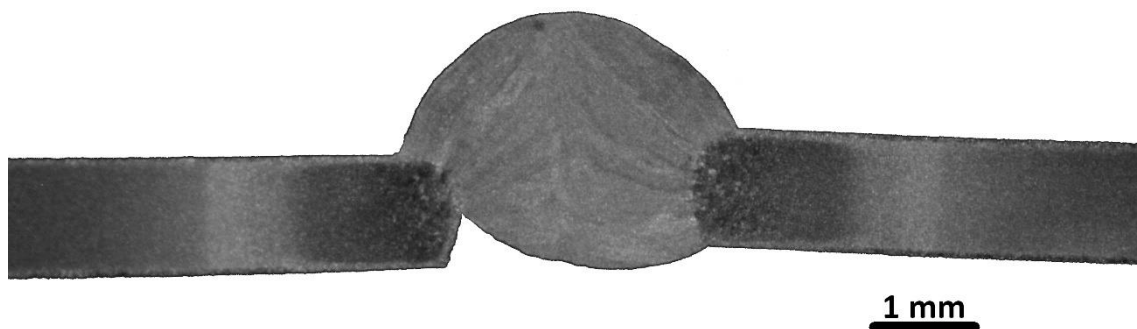
6.3. A varratokból készített metallográfiai csiszolatok kiértékelése

A metallográfiai csiszolatok elkészítése után azokról makrofotókat készítettem, mely segítségével látható a hőhatásövezet elhelyezkedése és az esetlegesen előforduló térfogati jellegű, felületre a minta kimunkálása előtt nem nyitott anyagfolytonossági hiányok, varrathibák. A hegesztési varratok elkészítése során a lemezek leszorítása nem volt elégséges, a hőhatás miatt a lemezek elcsavarodtak, ezáltal éleltolódás is fellépett. Erre példa a 9. ábraán látható 2A jelű csiszolat, itt egészen jelentős mértékű az éleltolódás.



9. ábra – A 2B jelű csiszolatról készült makrofotó

A 10. ábraán látható, 6B jelű mintán gyökoldali átolvadási hiány alakult ki. Ez a helytelen hegesztési munkaszögből adódott, mivel a hegesztőautomata befogókészülékébe nem lehetett elég szorosan rögzíteni a hegesztőpisztolyt és a munkakábel súlya előfordult, hogy kibillentette a hegesztőpisztolyt az optimális hegesztési munkaszögből. Ez további fejlesztési lehetőségeket rejt magában, hogy egy jól és egyszerűen használható befogó legyen kialakítva a hegesztőautomatára.

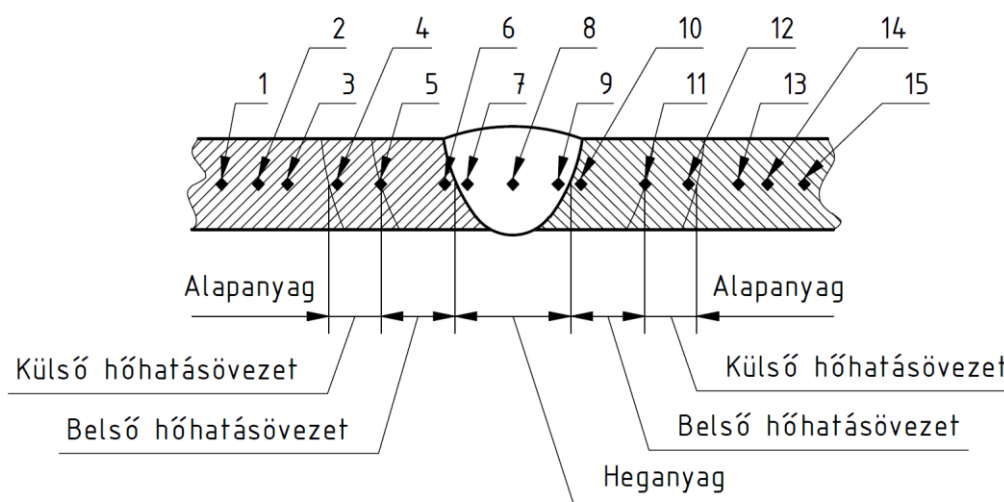


10. ábra – A 6B jelű csiszolatról készített makrofotó

A csiszolatokról készített makrofotók a dokumentum végén, a mellékletek között láthatóak (18. ábra – 29. ábra)

6.3.1. Keménységmérés

A keménységmérést az ISO 9015-1:2011 szabvány szerint végeztem el, egy Zwick 3212 típusú keménységmérő-gépen. HV2 keménységet mértem, mivel így biztosítható volt, hogy a lenyomat a lenyomatátoló-hossz legalább 2,5-szörösére legyen egy másik lenyomattól, valamint a lemez széleitől. A lenyomatok elhelyezkedése az egyes csiszolatokon a **11. ábra** szerinti.

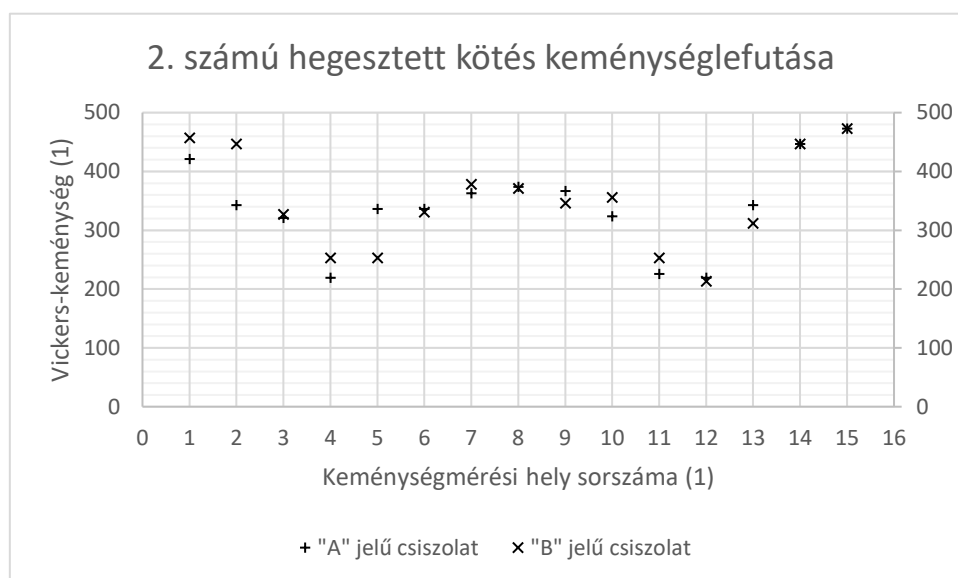


11. ábra – A keménységmérési pontok pozíciója a csiszolatokon

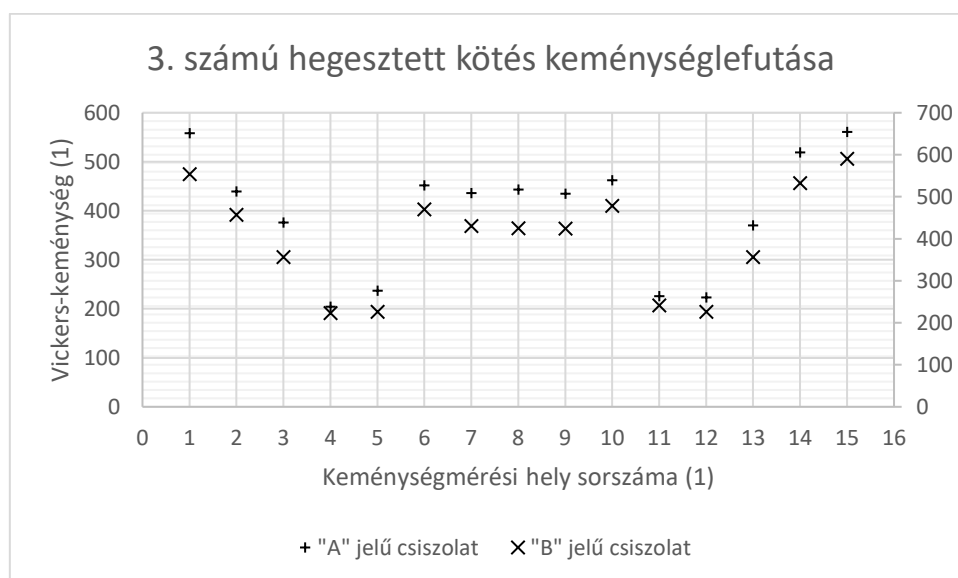
A keménységmérésből kapott adatok segítségével meghatározható az egyes csiszolatokkal jellemzett varratkeresztmetszet keménységlefutása. Ezeket lemezenként közös diagramon ábrázoltam, a szemléletesség kedvéért, mivel így látható a varrat közepének az

elejéhez viszonyított keménysége. A diagramok alapját képező keménységértékek a mellékletek közt, a 8. táblázatban találhatóak.

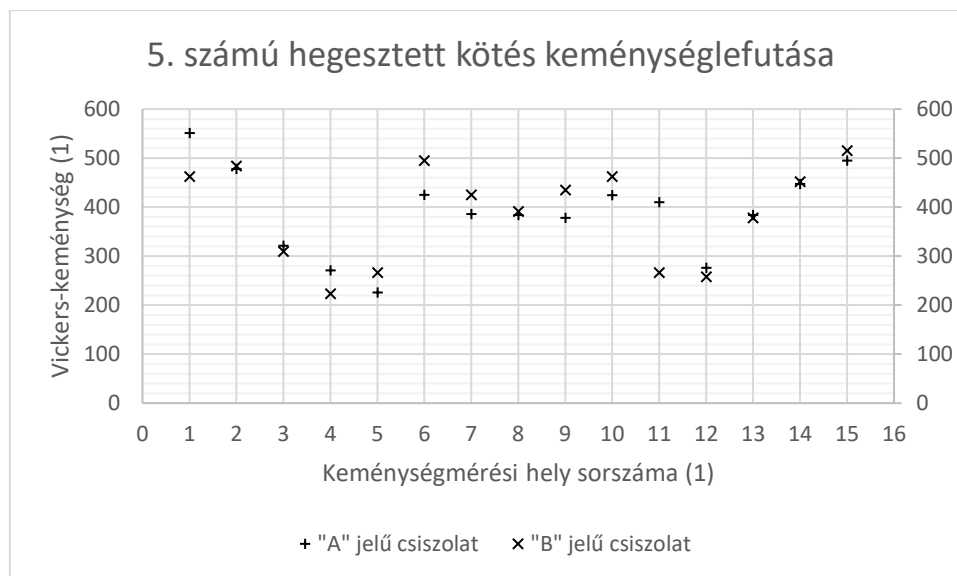
A 12. **ábra**– 14. ábraán látható diagramok a 0,0995 kJ/mm lineáris ívenergiával készült varratok keménységlefutását mutatja be.



12. ábra – A 2. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységlefutások

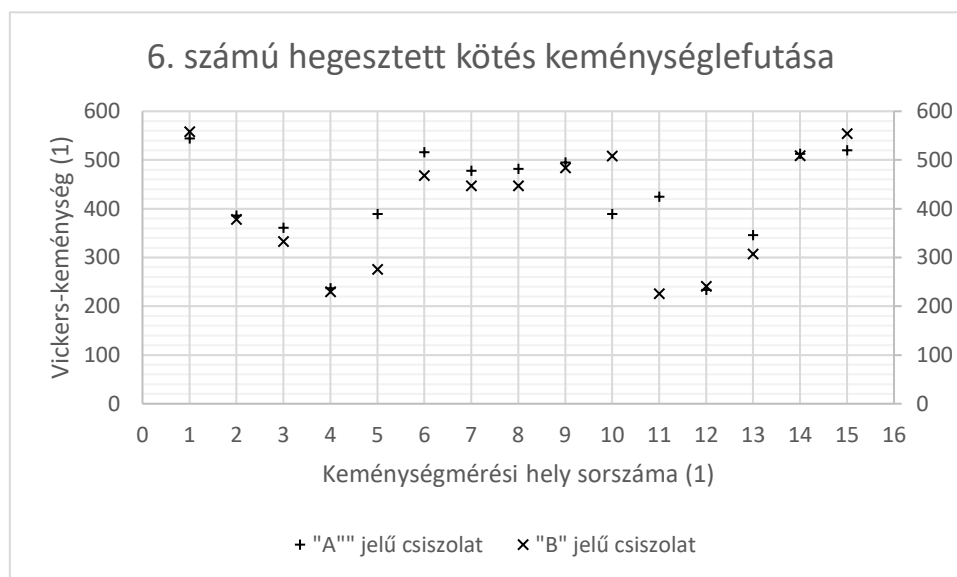


13. ábra – A 3. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységlefutások

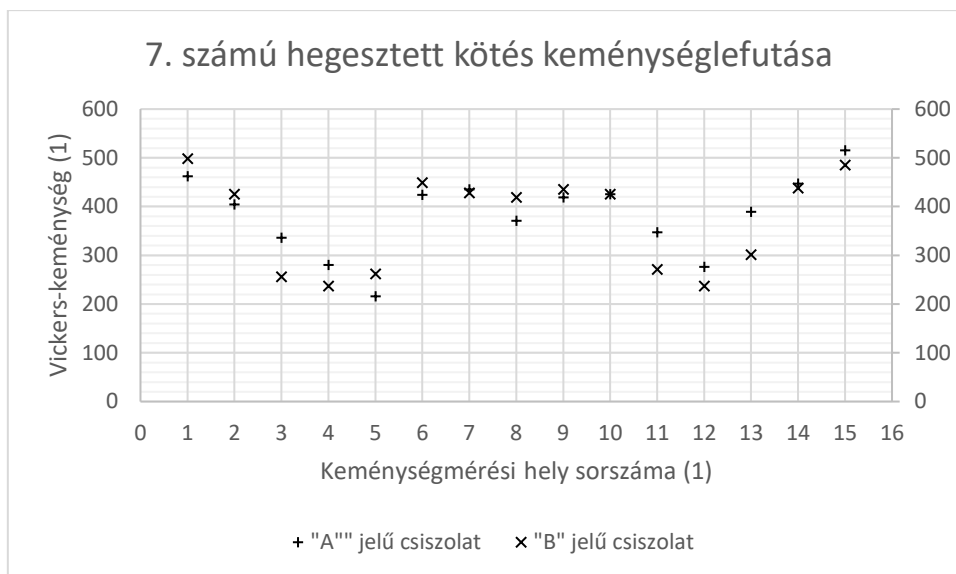


14. ábra – Az 5. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységlefutások

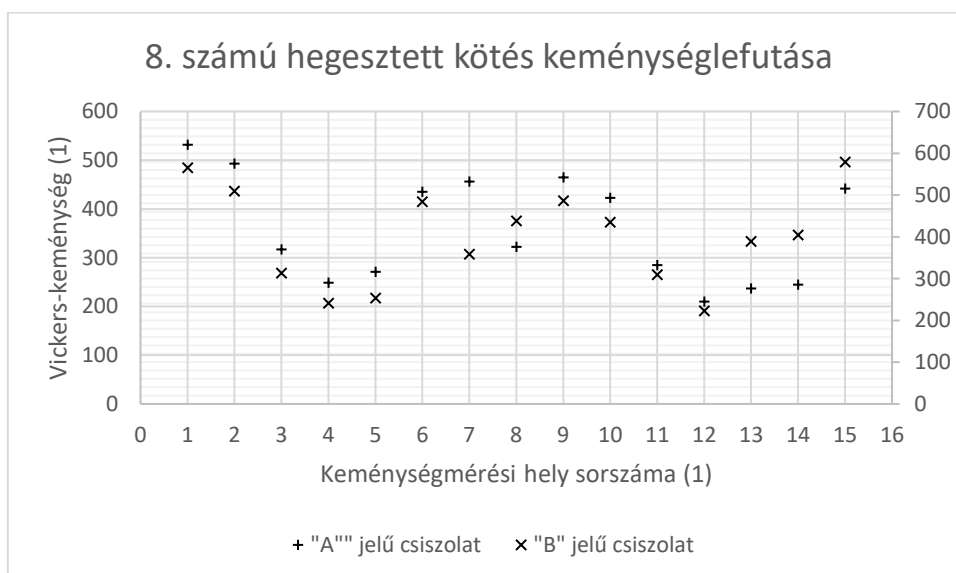
A 15. ábra– 17. ábraán látható diagramok a 0,107 kJ/mm lineáris ívenergiával készült varratok keménységlefutását



15. ábra – A 6. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységlefutások



16. ábra – A 7. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységlefutások



17. ábra – A 8. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységlefutások

6.4. Az eredmények összehasonlítása a várt adatokkal

A dolgozat keretében vizsgált acélok családjába tartozó, Docol 1400M megnevezésű acélra vonatkozó keménységfutas a 8. ábraán látható. Ez alapján várható volt a külső hőhatásövezet jelentős kilágyulása. Az általam mért adatok is ezt igazolják, mind az ugyanolyan típusú lemezek felhasználásával készült, mind pedig a vegyes kötések estében is megfigyelhető ez a jelenség.

Megfigyelhető, a Docol 1700M lemezek hegesztett kötéseiben a heganyag átlagos keménysége nagyobb, mint a Docol 1500M lemezek hegesztett kötéseiben. Ez számszerűen a 7. táblázatban található meg.

7. táblázat – A heganyag átlagos keménységkülönbsége a vizsgált csiszolatokon

Csiszolat jele	Átlagos keménységkülönbség 0,0995 kJ/mm lineáris hőbevitel mellett (HV2)	Átlagos keménységkülönbség 0,107 kJ/mm lineáris hőbevitel mellett (HV2)
A	70	76,7
B	61,3	32

Mivel a teljes varrat minden esetben egy darab folytonos varratként került kivitelezésre, így hegesztés hőbevitel folyamatosan emelte a lemezek hőmérsékletét, ezzel magyarázhatóak a „B” jelű mintákon a kisebb keménységértékek.

A hőhatásövezetek kilágyulása megközelítőleg ugyanakkora mértékű volt, itt a keménységmérések alapján a Docol 1500M lemezek hegesztett kötéseiben 14 HV2-vel nagyobb a keménység.

A vegyes kötések magukon hordozzák mindkét lemeztípus hegesztett kötéseire jellemző tulajdonságokat. Itt a varrat középvonalától az alapanyag felé haladva az egyes lemeztípusokra jellemző keménységértékek figyelhetők meg.

6.4.1. Lehetséges további kutatási irányok

A hegesztett kötés különböző pontjaiban mért keménységek különbségéből ítélve a Docol acélok hegesztési segédletében említett visszalépéses hegesztéssel csökkenthető lenne a teljes varrathosszon mért keménységkülönbség a varrat eleje, közepe és vége között [15].

A z aktív védőgázos, huzalelektrodás ívhegesztés viszonylag magas hőbevitellel jár, ez a lemezek elvetemedését és a hőhatásövezet kilágyulását okozza. Az eljárás egyik újabb fejlesztése a CMT eljárás, mely sokkal kisebb hőbevitellel képes hegesztett kötet kialakítani. A betűszó az angol „cold metal transfer” kifejezésből származik, mely hideg fémátvitelt jelent. Itt a rövidzár létrejöttékor a huzal előtolási iránya megfordul, ezáltal nem alakulnak ki nagy rövidzárlati áramok. Az anyagátmenet ebben a gyakorlatilag árammentes fázisban valósul meg [16].

7. Irodalomjegyzék

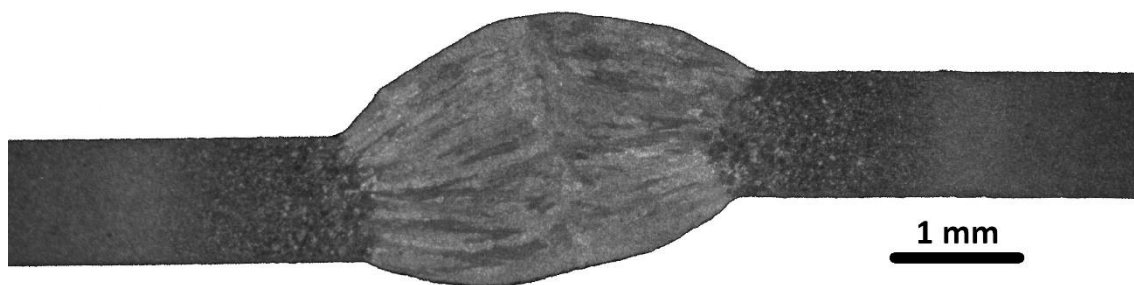
- [1] M. Dr. Tatai-Szabó, *Gépipari táblázatok*. Szombathely: SZIGMA-3000 Bt., 2018.
- [2] M. St. Weglowski és M. Zeman, „Prevention of cold cracking in ultra-high strength steel Weldox 1300”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, köt. 14, sz. 3, o. 417–424, 2014, doi: 10.1016/j.acme.2013.10.010.
- [3] I. Mészáros, *Anyagismeret*. Akadémiai Kiadó, 2019. doi: 10.1556/9789630599566.
- [4] „A New Global Formability Diagram”. Elérés: 2023. október 23. [Online]. Elérhető: <https://ahssinsights.org/blog/a-new-global-formability-diagram/>
- [5] N.-O. Lindfors és P. Kostamo, „BAT examples from the Nordic iron and steel industry ENVIRONMENT”, 2006.
- [6] „More and more powerful cranes. How is this possible?”, UpLoad. Elérés: 2023. október 25. [Online]. Elérhető: <https://www.liebherr.com/en/sgp/products/mobile-and-crawler-cranes/customer-magazine/background/more-and-more-powerful-cranes.html>
- [7] „Strenx® 1100 product group”, Elérés: 2023. október 25. [Online]. Elérhető: <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/strenx/product-offer/1100>
- [8] „New Volvo XC40 makes extensive use of AHSS and boron grades”. Elérés: 2023. október 25. [Online]. Elérhető: https://automotive.arcelormittal.com/news_and_stories/cases/2018VolvoXC40-COTY
- [9] P. Gajendran és N. N. Clark, „Effect of Truck Operating Weight on Heavy-Duty Diesel Emissions”, *Environ Sci Technol*, köt. 37, sz. 18, o. 4309–4317, szept. 2003, doi: 10.1021/es026299y.
- [10] „Mit jelent a karbonsemlegesség?” Elérés: 2023. október 29. [Online]. Elérhető: <https://fataj.hu/2022/09/mit-jelent-a-karbonsemlegesseg/>
- [11] „Fossil freedom is just around the corner!” Elérés: 2023. október 25. [Online]. Elérhető: <https://www.ssab.com/en/fossil-free-steel>
- [12] Y. Ogino, Y. Hirata, és S. Asai, „Discussion of the Effect of Shielding Gas and Conductivity of Vapor Core on Metal Transfer Phenomena in Gas Metal Arc Welding by Numerical Simulation”, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, köt. 40, szept. 2020, doi: 10.1007/s11090-020-10102-1.
- [13] T. Liu, Z. Cao, H. Wang, G. Wu, J. Jin, és W. Cao, „A new 2.4 GPa extra-high strength steel with good ductility and high toughness designed by synergistic strengthening of nano-particles and high-density dislocations”, *Scr Mater*, köt. 178, o. 285–289, márc. 2020, doi: 10.1016/J.SCRIPTAMAT.2019.11.045.
- [14] „Elga MEGAFIL 1100M”, Elérés: 2023. november 4. [Online]. Elérhető: <https://elgawelding.com/product/megafil-1100-m/>
- [15] SSAB, „WELDING OF AHSS/UHSS STEEL - A guide for the automotive industry”. [Online]. Elérhető: www.docol.com

- [16] G. Somoskői, „A CMT eljárás elméleti alapjai és gyakorlati alkalmazási lehetőségei”, 2010.

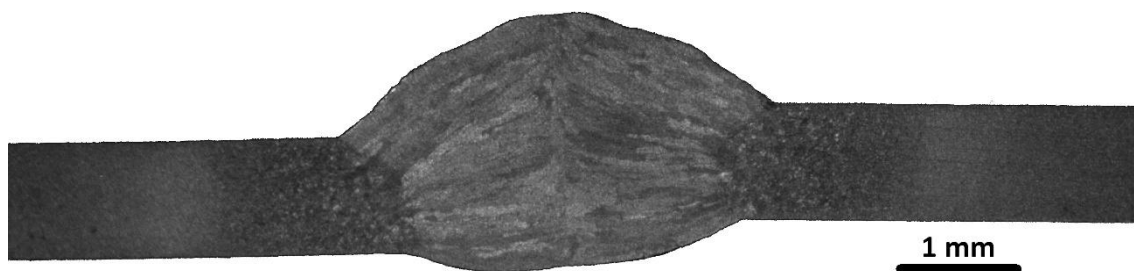
8. Ábrajegyzék

1. ábra – A nagyszilárdságú acélok fejlődése 1940 után [2]	11
2. ábra – Az acélok csoportosítása szakadási nyúlás és szakítószilárdság szerint[4].....	12
3. ábra – Volvo XC40 típusú személygépkocsiban felhasznált jellemző acéltípusok [8]14	
4. ábra – A hegesztési eljárások csoportosítása a szükséges hőmérséklet és nyomás függvényében [3].....	15
5. ábra – A huzalelektrodás ívhegesztés általános elrendezése [3]	18
6. ábra – A huzalelektrodás ívhegesztés során megvalósuló anyagátmenetek [12]	18
7. ábra – A huzalelektrodás ívhegesztés varratképzési módjának vázlata [3].....	19
8. ábra – Docol 1400M acél hegesztett kötésének keménységértékei a varrat keresztmetszetében [15]	20
9. ábra – A 2B jelű csiszolatról készült makrofotó [saját fotó]	23
10. ábra – A 6B jelű csiszolatról készített makrofotó [saját fotó]	24
11. ábra – A keménységmérési pontok pozíciója a csiszolatokon [saját ábra].....	24
12. ábra – A 2. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységfutasok [saját ábra]	25
13. ábra – A 3. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységfutasok [saját ábra]	25
14. ábra – Az 5. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységfutasok [saját ábra]	26
15. ábra – A 6. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységfutasok [saját ábra]	26
16. ábra – A 7. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységfutasok [saját ábra]	27
17. ábra – A 8. számú hegesztett kötésből készített csiszolatokon mért keménységfutasok [saját ábra]	27
18. ábra – A 2A jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	34
19. ábra – A 2B jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	34
20. ábra – A 3A jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	34
21. ábra – A 3B jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	34
22. ábra – Az 5A jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	35
23. ábra – Az 5B jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	35
24. ábra – A 6A jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	35
25. ábra – A 6B jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	35
26. ábra – A 7A jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	36
27. ábra – A 7B jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	36
28. ábra – A 8A jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	36
29. ábra – A 8B jelű csiszolat makrofotója [saját fotó]	36

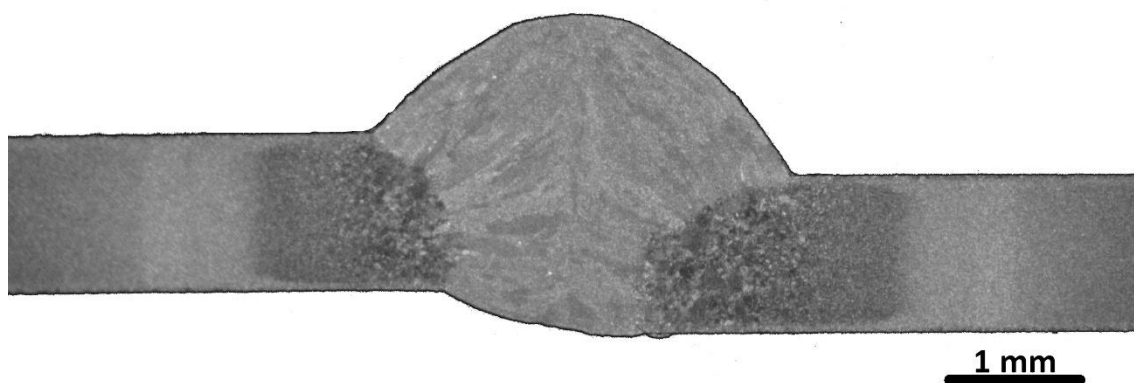
9. Mellékletek



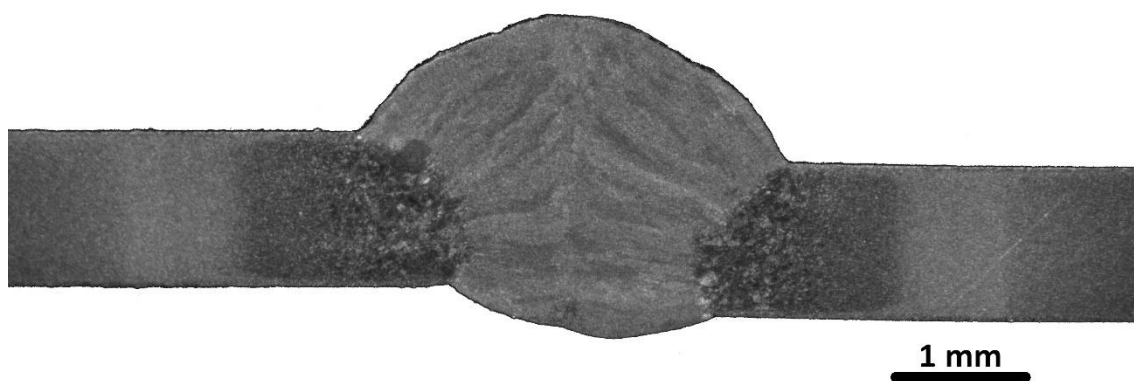
18. ábra – A 2A jelű csiszolat makrofotója



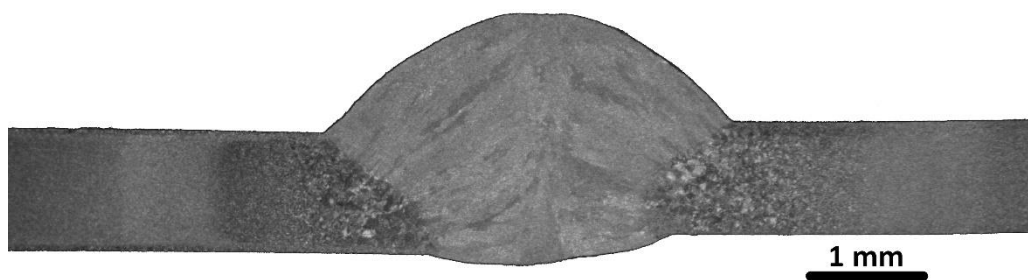
19. ábra – A 2B jelű csiszolat makrofotója



20. ábra – A 3A jelű csiszolat makrofotója



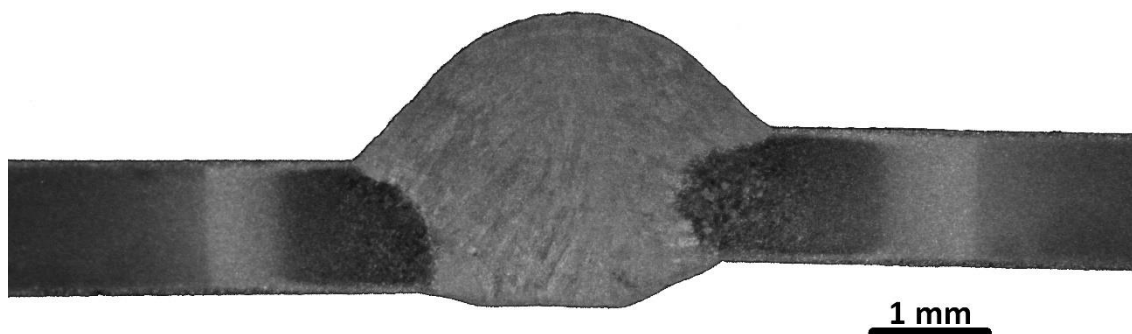
21. ábra – A 3B jelű csiszolat makrofotója



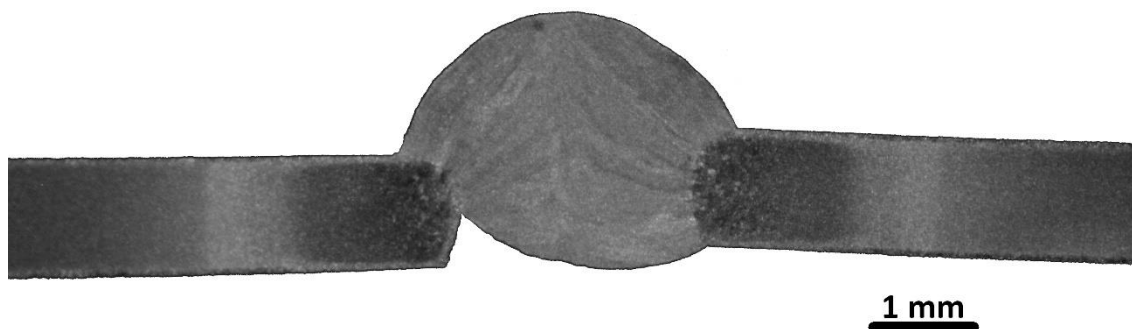
22. ábra – Az 5A jelű csiszolat makrofotója



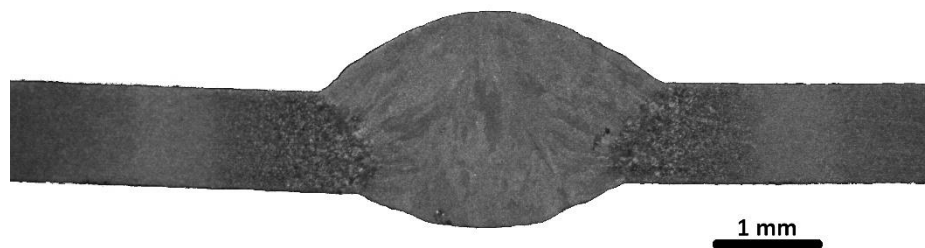
23. ábra – Az 5B jelű csiszolat makrofotója



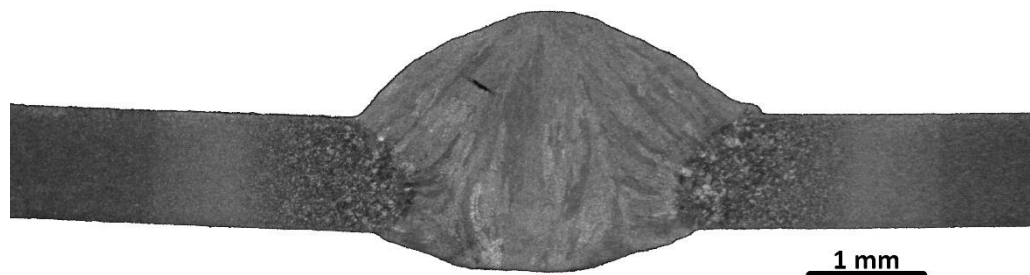
24. ábra – A 6A jelű csiszolat makrofotója



25. ábra – A 6B jelű csiszolat makrofotója



26. ábra – A 7A jelű csiszolat makrofotója



27. ábra – A 7B jelű csiszolat makrofotója



28. ábra – A 8A jelű csiszolat makrofotója



29. ábra – A 8B jelű csiszolat makrofotója

8. táblázat – A keménységmérés egyes mérési pontjain mért keménységértékek

Sor- szám	Lemezek típusa	Csiszo - lat jele	Keménységmérési lenyomat sorszáma														
			1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13..	14.	15.
2.	1500M-1500M	A	421	343	321	219	336	336	363	374	367	324	226	219	343	447	473
		B	457	47	327	253	253	331	378	371	346	356	253	213	312	447	473
3.	1700M-1700M	A	558	439	379	204	237	452	436	443	435	462	226	223	370	519	561
		B	554	457	356	223	226	470	430	425	424	478	241	226	356	532	590
5.	1700M-1500M	A	551	478	321	271	226	425	3586	384	378	424	410	276	384	447	495
		B	462	484	309	223	266	495	425	391	435	462	266	258	378	452	515
6.	1700M1700M	A	544	386	361	237	389	516	478	482	495	389	425	2234	346	513	520
		B	558	378	333	230	276	468	447	447	484	508	226	241	307	509	554
7.	1500M-1500M	A	462	404	336	280	216	424	435	371	419	425	347	276	389	447	515
		B	498	425	296	237	262	449	428	419	435	425	271	237	301	438	485
8.	1700M-1500M	A	532	493	317	249	271	435	456	322	465	423	285	210	237	245	442
		B	565	509	313	241	253	484	358	438	486	435	309	223	389	404	579