

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



A HŐBEVITEL HATÁSA ULTRA-NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK TULAJDONSÁGAIRA HUZALELEKTRÓDÁS VÉDŐGÁZOS ÍVHEGESZTÉSKOR

PhD értekezés tézisei

KÉSZÍTETTE:

KOVÁCS JUDIT

GÉPÉSZMÉRNÖK (BSc, MSc),
HEGESZTŐ SZAKMÉRNÖK EWE, IWE

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

TÉMATERÜLET: GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK

TÉMACSOPORT: GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY ÉS MECHANIKAI TECHNOLÓGIÁK

DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE

VADÁSZNÉ DR. BOGNÁR GABRIELLA

DSc, EGYETEMI TANÁR

TÉMACSOPORT VEZETŐ

DR. LUKÁCS JÁNOS

CSc, PhD, EGYETEMI TANÁR

TÉMAVEZETŐ

DR. LUKÁCS JÁNOS

CSc, PhD, EGYETEMI TANÁR

TÁRS-TÉMAVEZETŐ

DR. GERALD WILHELM

PhD, EGYETEMI TANÁR

Miskolc

2024

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

elnök:

titkár:

tagok:

HIVATALOS BÍRÁLÓK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK MEGFOGALMAZÁSA

1.1 BEVEZETÉS

A nagyszilárdságú acélok egyre fontosabb szerepet töltenek be a különböző műszaki alkalmazásokban, különösen a jármű- és közlekedési iparban. Az elmúlt évtizedekben, az ötvözés és a mikroötvözés tudatos tervezése mellett, a hengerlési és a hőkezelési eljárások kombinálásával, különböző nagyszilárdságú acélokat fejlesztettek ki, amelyek eredményeként napjainkban már 1300 MPa feletti folyáshatárú vastaglemezek is vannak forgalomban [1-7]. A nagyszilárdságú acélok alkalmazásának számos előnye lehet. Ezen acélok felhasználásával vékonyabb, könnyebb, de erősebb elemek építhetők, amelyek mozgó szerkezetek esetén különösen előnyösek. A kisebb keresztmetszet kisebb anyagigényt jelent az alapanyagok és a hozaganyagok oldalán egyaránt, ezáltal a gyártási idő és a gyártási költségek is csökkenhetnek. A végeredményben kisebb tömegű szerkezet üzemeltetése energia-megtakarítást eredményez [8-12]. Ugyanakkor, a növelt szilárdság és a szerkezet működése által megkívánt szívósság egyensúlyának a megteremtése, illetve az ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállás biztosítása [13] – a szerkezet integritása érdekében [14-15] – komplex megközelítést igényel.

Jó mechanikai tulajdonságai és potenciális előnyei ellenére a nagyszilárdságú acélok hegesztése még mindig tartogat kihívásokat; főként a megfelelő hegesztéstechnológia és a technológiai paraméterek megválasztása terén. A fajlagos hőbevitel és a hűlési sebesség a két legfontosabb paraméter, amelyek befolyásolják a kötés teherbírását, alakváltozó képességét és szívósságát. Mivel a hegesztett kötés különböző részeit eltérő hőhatás éri, a hőhatásövezet különböző részei is eltérő tulajdonságúak. Nagyszilárdságú acélok esetén a hőhatásövezetben bekövetkező lágyulás és szívósságcsökkenés a legmeghatározóbb. Ezen acélok hegesztésekor szintén problémát okozhat a hidegrepedés (érzékenység) is. Emellett, a nagy folyáshatár miatt, megjelenik a hozaganyag-választás örök dilemmája, mivel még csak 1100 MPa folyáshatárú anyagokhoz lehet matching típusú hozaganyagot beszerezni [1, 8, 9, 16-20].

A hegesztett kötések leggyengébb része általában a hőhatásövezet, így ennek a vizsgálata is kiemelt fontosságú. Tényleges hegesztett kötések esetén a hőhatásövezet különböző részei kis kiterjedésűek, ezért ezek vizsgálhatósága korlátozott. A fizikai szimuláció viszont egy olyan lehetőséget nyújt, amellyel az adott alapanyagból kimunkált próbatesteken a különböző hőhatásövezeti sávok a későbbi (mechanikai) vizsgálatokhoz megfelelő mérettartományban állíthatók elő. A Gleeble fizikai szimulátorral az egyes folyamatok termoelemes mérés vagy matematikai modellek segítségével meghatározott hőciklusokkal végezhetők el. A folyamatok a valóságot minél inkább megközelítő körülmények között és paraméterekkel zajlanak, valós időben, ezért megbízható eredményeket biztosítanak. A széles tartományban programozható hőciklus modellek segítségével pedig a különböző hegesztési paraméterek mellett kialakuló szövetszerkezetek tulajdonságai is precízen elemezhetők [21-28].

Üzemelés során számos alkatrész, illetve szerkezeti elem ismétlődő igénybevételnek van kitéve, ezért gyakran megfigyelhető a fáradás okozta meghibásodás [29, 30], amely az ultra nagyciklusú fáradás tartományában akár a hagyományos kifáradási határ alatt, viszonylag kis feszültség mellett is bekövetkezhet [31]. Ezért, a biztonságos üzemeltetés érdekében, az ismétlődő igénybevételnek kitétt acélszerkezetek tervezésének egyik fő szempontja a megfelelő fáradási szilárdság biztosítása kell hogy legyen [30]. Közismert tény, hogy a hegesztett szerkezetek kötéseinek fáradási szilárdsága kisebb, mint az alapanyagé, ezért az üzemelés során az élettartamuk még inkább korlátozott. Ennek fő okai a hegesztés hatására bekövetkező szövetszerkezeti változások, a kialakuló maradó feszültségek és a kötés okozta feszültséggyűjtő helyek [32]. A fáradási szilárdság az acélok műszaki alkalmazásának egyik legfontosabb mechanikai paramétere. Kis(ebb) szilárdságú acélok esetén a fáradási szilárdság a kifáradási határ segítségével határozható meg, amely egyértelműen leolvasható a Wöhler görbe töréspontja alapján. Nagy(obb) szilárdságú acélok esetén viszont, nincs minden esetben egyértelmű töréspont. Ilyenkor a fáradási szilárdságot úgy határozzák meg, mint például a legnagyobb feszültségamplitúdót, amelynél a próbatestek előírt ciklusszámig – gyakran ez 10^7 ciklus – nem hibásodnak meg [33]. A nagyciklusú fárasztás során a próbatestek makroszkópiusan csak rugalmas alakváltozáson mennek keresztül, keresztmetszetük állandónak tekinthető, és a számított feszültség ténylegesen valódi feszültség. A repedés keletkezését és a repedés terjedését – így a mérési eredményeket is – azonban több, külső és belső tényező befolyásolja. Ezért az eredmények várható szórása miatt nagyobb számú próbatestet kell azonos körülmények között terhelni, és a mért adatokat matematikai-statisztikai módszerekkel kell értékelni [34].

Ismétlődő igénybevételnek kitétt szerkezetek (főként hegesztett szerkezetek) esetén szintén fontos a fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálata. A repedés növekedése három részre osztható: lassú növekedés, stabil növekedés és instabil repedésterjedés. Amint a repedés az instabil tartományba kerül a károsodás visszafordíthatatlan. A fáradásos repedésterjedés nagymértékben függ az anyagszerkezettani sajátosságoktól és a vizsgálati körülményektől. A szövetszerkezeti jellemzők befolyásolják a repedés terjedési útvonalát és sebességét, vagyis ezáltal a törés morfológiáját. Mivel a különböző anyagok különböző szövetszerkezettel és mechanikai tulajdonságokkal, ezáltal különböző repedésterjedési viselkedéssel rendelkeznek, felhasználás előtt ezt is meg kell vizsgálni [35-37].

1.2 CÉLKITŰZÉSEK

Ahogy az a bevezetőből is látható, a nagyszilárdságú acélok területén jelenleg is számos kihívás és ismeretlen tényező nehezíti meg a felhasználást, amelyek mindegyike kiterjedt kutatást igényel. A szerkezeti acélok területén a gyártási módtól függően maximum 1100 MPa vagy 1300 MPa folyáshatárú vastaglemezek vannak forgalomban, viszont napjainkban ezek alkalmazása még erősen korlátozott, ezért kutatómunkám során ezen acéltípusokra koncentrálok.

Kutatómunkámat alapvetően két területre összpontosítom. Mivel a felhasználás során nagyon gyakori a hegesztés és a nagyszilárdságú acélok hegesztésének számos nehézsége van, az első terület a választott alapanyagok hegesztéstechnológiájának fejlesztéséhez kapcsolódik. A második terület pedig a választott alapanyagok és hegesztett kötéseik ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállásának vizsgálata.

A nagyszilárdságú acélok ömlesztő hegesztése során a tervezés egyik legfontosabb eleme a megfelelő hegesztési (munka)tartomány meghatározása. Ehhez segítséget nyújt az optimális $t_{8/5}$ hűlési idő meghatározása, amelyre alapozva megadhatók a különböző hegesztési paraméterek. A $t_{8/5}$ hűlési idő vizsgálatának egyik legjobb eszköze a fizikai szimulátor, amelynek segítségével a hőhatásövezet kritikusnak vélt sávjai megfelelő méretben állíthatók elő a későbbi anyagvizsgálatok számára. A fizikai szimuláció további előnye, hogy számos technológiai változat vizsgálható, méghozzá viszonylag gyorsan és könnyen reprodukálható módon. Az anyagvizsgálatok eredményei alapján aztán tudatosan meghatározhatók a hegesztési paraméterek. Első lépésként tehát a szívósságsökkenés szempontjából kritikusnak vélt hőhatásövezeti sávokban végzek fizikai szimulációs vizsgálatokat, különböző $t_{8/5}$ hűlési idők alkalmazása mellett. A nagyszilárdságú acélok hegesztése során szintén problémát jelent a hozaganyag választás kérdésköre is, mivel matching típusú hozaganyag csak az 1100 MPa folyáshatárú anyagokhoz áll rendelkezésre. Tekintettel arra, hogy ezek a hozaganyagok is újnak minősülnek, a hegesztési kísérletek során ilyen és egy széles körben alkalmazott undermatching hozaganyaggal is készítünk hegesztett kötéseket. Így, a későbbi anyagvizsgálatok segítségével, megvizsgálhatók a különböző kötések mechanikai tulajdonságai.

Az ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállás esetén – mind a választott alapanyagoknál, mind a hegesztett kötéseknél – megvizsgálom a nagyciklusú fárasztó igénybevétellel, illetve a fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállást. Mivel a hozaganyag is befolyásolja a különböző fáradási jellemzőket, kutatómunkám során a választott hozaganyagok fáradási tulajdonságokra gyakorolt hatását is elemzem. Végül, a kísérletsorozatok eredményei alapján, meghatározom a tervezési határgörbét a vizsgált alapanyagok és a különböző hozaganyagokkal készült hegesztett kötések eseteire.

2. A FELADAT MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

Disszertációmban termomechanikusan kezelt és nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hegesztési, hegeszthetőségi kérdéseivel, valamint ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállásukkal foglalkoztam.

Az első részben irodalmi áttekintést adtam a nagyszilárdságú acélok jellemzőiről, gyártástechnológiájáról és hegesztéséről, a fizikai szimulációs vizsgálatokról, azon belül is az általam is alkalmazott Rykalin 3D modell elméleti háttéréről, valamint ismétlődő igénybevétel esetén a nagyciklusú fárasztóvizsgálatokról és a fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokról. Ez alapján megállapítható, hogy mind a termomechanikusan kezelt acélok, mind a nemesített acélok összetett gyártástechnológiát igényelnek. A termomechanikus acélok a kisebb ötvözőtartalom és finomabb szemcseszerkezet miatt előnyösebb mechanikai és szívóssági jellemzőkkel rendelkeznek, viszont gyártástechnológiájukból adódóan a gyártható lemezvastagság és a szilárdság is elmarad a nemesített acélokétól. A hegesztéstechnológia tekintetében – a vonatkozó irodalmak alapján – nagyszilárdságú acélok esetén a hidegrepedés, a hőhatásövezet kilágyulása és a hozaganyag választás kérdésköre okozza a legnagyobb problémát. Ezért a hegesztés során kiemelt figyelmet kell fordítani a fajlagos hőbevitel és a $t_{8/5}$ hűlési idő szabályozására, mivel túl kis fajlagos hőbevitel esetén nő a hidegrepedés kialakulásának veszélye, túl nagy érték esetén pedig – a megnövekedett hűlési idő hatására – a hőhatásövezet kilágyul. Ennek értelmében – azért, hogy a nagyszilárdságú acélok hegesztést követően is megőrizzék kiemelkedő mechanikai tulajdonságaikat – a fajlagos hőbevitelt a lehető legkisebb értékre kell választani, úgy, hogy a hidegrepedés még elkerülhető legyen. Ismétlődő igénybevételek esetén, mivel a nagyszilárdságú acélok gyakran valamilyen hegesztett szerkezetbe kerülnek beépítésre, a hegesztés kedvezőtlen hatásai miatt nem feltétlenül kapunk kedvezőbb fáradási jellemzőket. Meg kell említeni, hogy a legtöbb szabvány és előírás még nem tartalmazza ezeket az anyagminőségeket, ezért még több vizsgálatra és háttérinformációra van szükség az alkalmazásuk előtt.

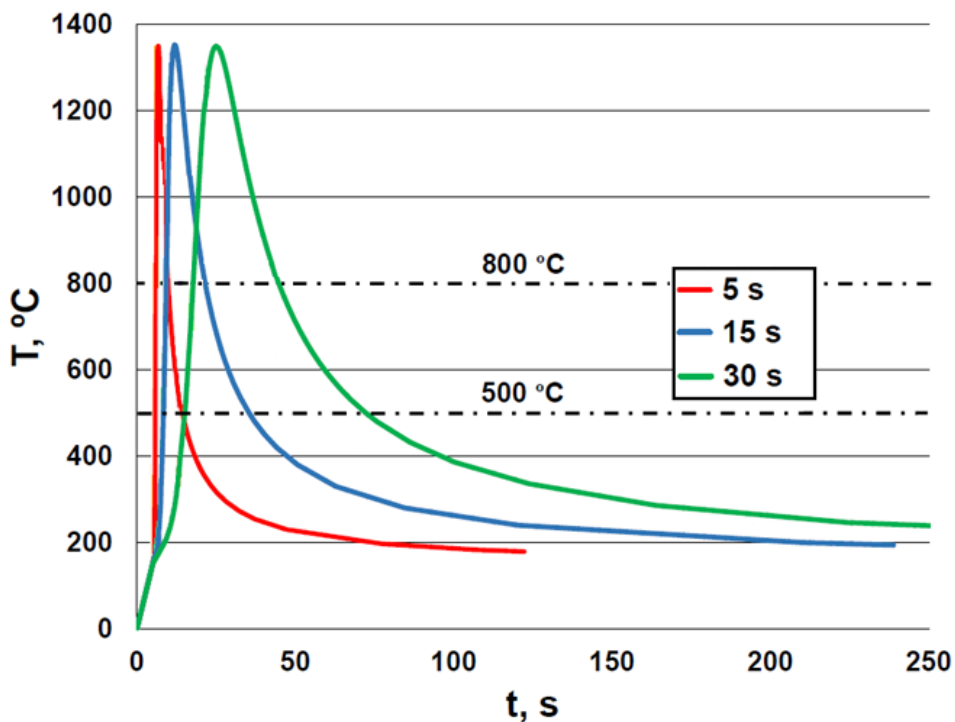
A második részben két különböző szilárdsági kategóriába tartozó és különböző gyártási móddal előállított szerkezeti acélt vizsgáltam, amelyek jelenleg vastaglemezek esetén a beszerezhető szerkezeti acélok közül a legnagyobb szilárdságúak. Az egyik vizsgált acél termomechanikusan kezelt 1100 MPa folyáshatárú (alform 1100M x-treme), a másik pedig nemesített 1300 MPa folyáshatárú volt. A hegesztett kötések elkészítése előtt – a megfelelő hegesztési paraméterek meghatározásához –, első lépésként meg kellett határozni a választott huzalelektrodás védőgázos ívhegesztő eljáráshoz az optimális $t_{8/5}$ hűlési időt. Ehhez hőhatásövezeti szimulációkat végeztem a szívósságcsökkenés szempontjából legkritikusabbnak vélt hőhatásövezeti sávokban, amelyek a durvaszemcsés, az interkritikus és az interkritikus durvaszemcsés sávok voltak. A szimulációk során egy kis, egy közepes és egy nagy fajlagos hőbevétellel történő huzalelektrodás védőgázos ívhegesztést, három különböző

hűlési időt állítottam be, amelyek 5 s, 15 s és 30 s voltak. Az elvégzett kísérleti programok adatait az **1. táblázat** tartalmazza.

1. táblázat. A hőhatásövezeti fizikai szimulációs vizsgálatok kísérleti programjai

Hőhatásövezeti sáv	Csúcshőmérséklet, [°C]		t _{8/5} hűlési idő, [s]
	T _{max1}	T _{max2}	
Durvaszemcsés	1350	-	5, 15, 30
Interkritikus	775	-	5, 15, 30
Interkritikus durvaszemcsés	1350	775	5, 15, 30

Az elvégzett hőhatásövezeti vizsgálatokhoz a szimulációs programokat a fizikai szimulátor manuális programozásával állítottam elő, a hőmérsékletfüggő fizikai jellemzők figyelembevételével kiszámított idő-hőmérséklet pontok segítségével. A beprogramozott hőciklusokra mutat egy példát az **1. ábra**.



1. ábra. A durvaszemcsés sáv előállítását célzó hőciklusok

A szimulációs vizsgálatok után optikai mikroszkópos vizsgálatokat, keménységméréseket és műszerezett ütővizsgálatokat végeztünk. A kísérletsorozat eredményei rávilágítottak arra, hogy – a vizsgált nagyszilárdságú acélok szilárdsági és szívóssági tulajdonságait figyelembe véve – célszerű rövidebb, 5 s közeli hűlési időt alkalmazni.

A fizikai szimulációs vizsgálatok után a két nagyszilárdságú acélon a hegesztett kötések két különböző szilárdsági kategóriába tartozó hozaganyaggal készítettük el, amelyek a Böhler Union X96 (Ø 1,2 mm) és a Böhler alform 1100 L-MC (Ø 1,2 mm) voltak. A hegesztési paramétereket a választott t_{8/5} hűlési idő alapján határoztam meg, azokat a **2. és a 3. táblázatok** tartalmazzák.

2. táblázat. Hegesztési paraméterek az S1100M anyagminőség esetén

Sor	Áramerősség [A]	Feszültség [V]	Hegesztési sebesség [cm/min]	t _{8/5} hűlési idő [s]	Fajlagos hőbevitel [J/mm]
1	180	19,1	24	5	688
2	190	19,7	27		666
3-4	260	25,1	50		624
5-8	280	28,7	61		632

3. táblázat. Hegesztési paraméterek az S1300Q anyagminőség esetén

Sor	Áramerősség [A]	Feszültség [V]	Hegesztési sebesség [cm/min]	t _{8/5} hűlési idő [s]	Fajlagos hőbevitel [J/mm]
1-2	180	19,1	31	5	562
3-4	240	22,7	53		493

A kötések létrehozásához választott eljárás a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés volt. A kötések Daihen WB-P500L típusú áramforrással készültek, a 350 mm x 150 mm x 10/15 mm-es X leélezésű lemezeket PA pozícióban egyesítettük. Az egyenletes hegesztési sebesség és varratképzés biztosítása érdekében (az első gyöksor kivételével) a pisztolyt ESAB B5001 típusú hegesztő traktorral mozgattuk. Az alkalmazott előmelegítési hőmérsékletet – korábbi saját kísérletek és irodalmi ajánlások figyelembevételével – 100 °C-ra választottam, a rétegek közötti hőmérséklet pedig megközelítőleg 130 °C volt. A kísérletekhez alkalmazott védőgáz M21 típusú (80% Ar + 20% CO₂) védőgáz keverék volt, 18 l/min áramlási sebességgel.

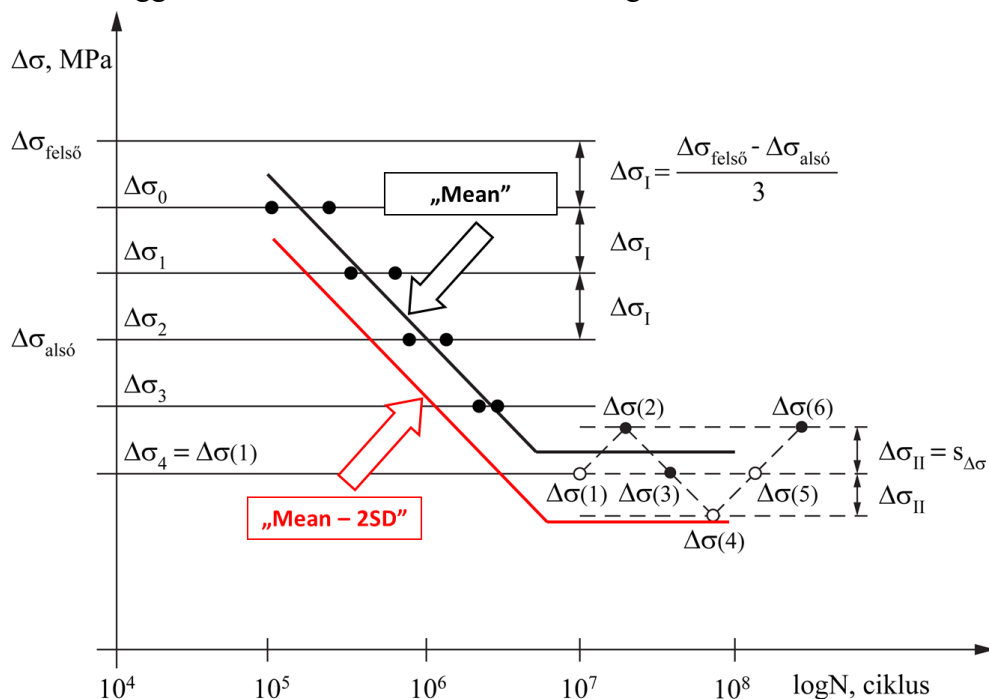
Az elkészített kötésekön optikai mikroszkópos vizsgálatokat, keménységméréseket, műszerezett ütő, nagyciklusú fárasztó és fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokat végeztünk.

Az alapanyagok és a hegesztett kötések ismétlődő igénybevételű vizsgálatai kiterjedtek minkét alapanyagra és a két különböző hozaganyaggal készített kötéseikre.

A nagyciklusú fárasztó vizsgálatokra a JSME S 002 [38] előírásban megfogalmazottakat [39] szem előtt tartva, MTS gyártmányú, univerzális, elektro-hidraulikus anyagvizsgáló rendszereken (MTS 312 és MTS 810) került sor. A vezérlési mód állandó terhelés-amplitúdójú, a terhelés aszimmetria tényező a teljes vizsgálatsorozatban állandó értékű, R = 0,1 volt. A vizsgálatokat szobahőmérsékleten, laboratóriumi közegben és szinusz alakú terhelési függvényvel végeztük. A terhelési frekvencia az f = 15-25 Hz-es tartományban változott, a jellemző érték az f = 25 Hz volt, amelytől csak akkor tértünk el a kisebb értékek irányába, amikor a vizsgálat stabilitása azt megkívánta. A terhelési frekvencia ilyen tartományban történő változtatása nincs szignifikáns hatással a vizsgálati eredményekre [34]. Az eredmények kiértékelése során a határgörbék élettartam szakaszra vonatkozó egyenletét a Basquin összefüggéssel határoztam meg. Az összefüggés logaritmálása és átrendezése után az (1) alakhoz jutunk, amely kettős logaritmikus rendszerben egy egyenes, esetünkben a határgörbe élettartam szakaszának az egyenlete:

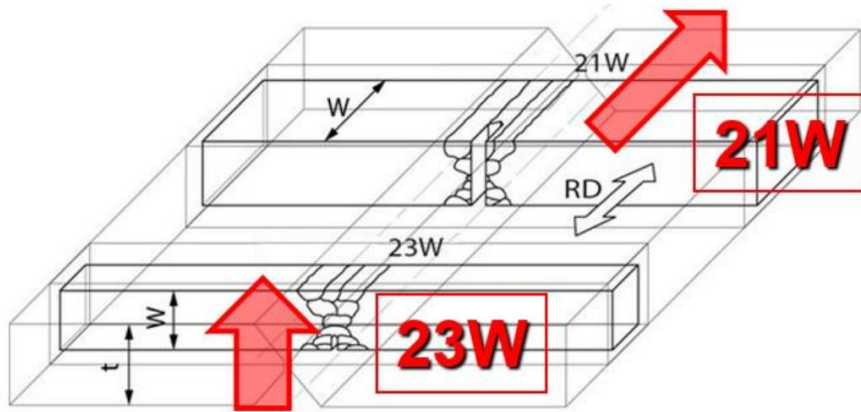
$$\log(\Delta\sigma) = \frac{\log(a)}{m} - \frac{1}{m} \log(N) \quad (1)$$

A határgörbe kifáradási határ szakaszának az egyenletét, vagyis a kifáradási határ értékét, a túlélő próbatestek átlagértékei segítségével számítottam, azokban az esetekben, amikor voltak túlélő próbatestek. Az így kapott, a felépítésükből következően az 50%-os valószínűséghez tartozó görbék, egyes előírások megnevezésével „Mean” görbék. A határgörbék közül a műszakilag szükséges biztonság figyelembevételével úgy kapunk fáradási szilárdsági görbéket, hogy a határgörbét két szórás („2SD”) tartománnyal lefelé toljuk („Mean – 2SD”). Ezt a metodikát szemlélteti a **2. ábra**, amelyen láthatjuk a fárasztóvizsgálatok elvégzésének a logikáját is. Az élettartam és a kifáradási határ szakasz (fárasztási) feszültségszintjeit egymással összefüggésben, de eltérő filozófiával kell meghatározni.



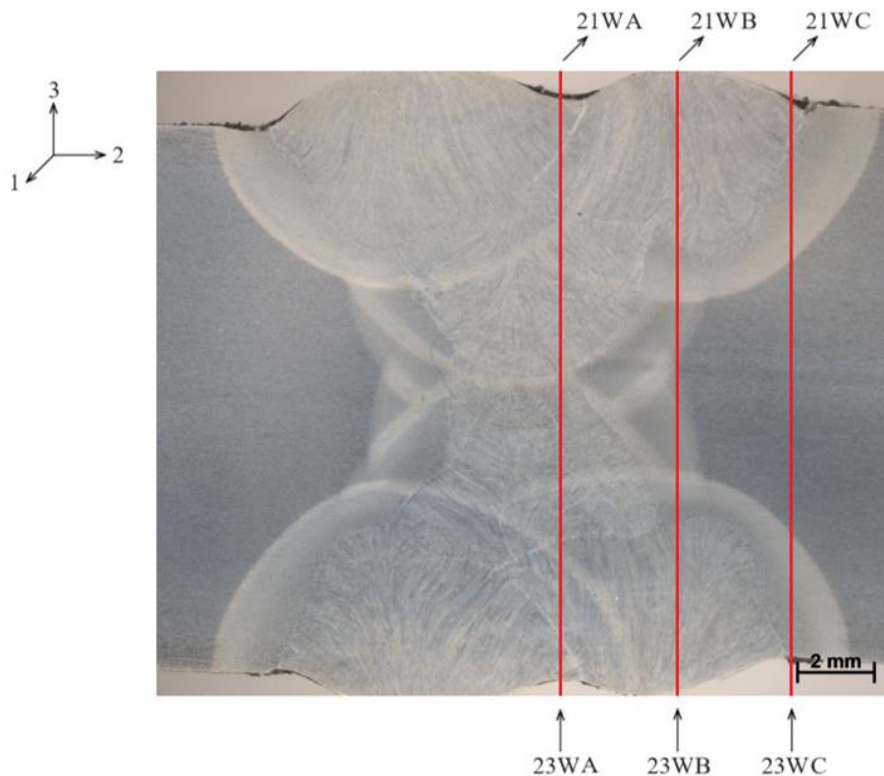
2. ábra. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok elvégzésének logikája, a határgörbék („Mean”) és a határgörbékéből származtatott fáradási szilárdsági görbék („Mean – 2SD”) [34]

A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokat a nagyciklusú fárasztó vizsgálatokhoz is alkalmazott MTS gyártmányú, univerzális, elektro-hidraulikus anyagvizsgáló rendszeren (MTS 312) végeztük el. A repedésterjedéssel szembeni ellenállás jellemzése céljából a vizsgált alapanyagokból és a különböző hozaganyagokkal készített hegesztett kötésekből három ponton terhelt hajlító próbatesteket munkáltunk ki. A hegesztett kötésekből a próbatestek kimunkálása a **3. ábra** alapján történt.



3. ábra. Három ponton terhelt hajlító próbatetek kimunkálása a hegesztett kötésekből, a bemetszési irányok jelölésével [40]

A két vizsgált alapanyagból T-L és T-S orientációjú, míg a hegesztett kötésekből 21 és 23 orientációjú [41] próbateteket készítettünk. Hegesztett kötések esetén a bemetszések elhelyezkedésére egy példát a **4. ábra** szemléltet.



4. ábra. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokhoz alkalmazott TPB próbatetek bemetszéseinek orientációja az S1100M acél hegesztett kötésesei esetén

A bemetszések helye a vizsgálatok során eltérő volt, így a repedések terjedése alapján átfogó képet kaphattunk a hegesztett kötések viselkedéséről. A vizsgálatok során a vezérlési mód terheléscsökkentéses (előfárasztás), illetve állandó terhelésamplitúdójú (repedésterjesztés) volt, $R = 0,1$ terhelés aszimmetria tényezővel és szinusz alakú terhelési függvényvel. Minden vizsgálatot laboratóriumi környezetben, szobahőmérsékleten végeztünk el. A vizsgálatok kezdetén a terhelési frekvencia $f = 20$ Hz volt, amelyet a repedésterjedés

befejező fázisában $f = 5$ Hz értékre csökkentettünk. Az eredmények megfelelő összehasonlíthatósága érdekében a próbatestek előkészítése minden esetben azonos volt, valamint a vizsgálatok szempontjából meghatározó jellemző próbatest méret (W) névleges értéke is – orientációnként – azonos volt.

A vizsgálatok után a rögzített adatokból megrajoltam a repedésméret-igénybevételi szám (a-N) görbéket, majd azok alapján meghatároztam a fáradásos repedésterjedésre jellemző kinetikai diagramokat. Ezt követően – a legkisebb négyzetek módszerével – kiszámítottam a Paris-Erdogan összefüggés [42] állandójának (C) és kitevőjének (n) az értékeit az egyes kinetikai diagramokból, a korrelációs indexekkel együtt, valamint a ciklikus törési szívósság (ΔK_{fc}) értékeket. Az eredmények értékeléséhez az egyes vizsgálati csoportokban (n és ΔK_{fc}) kapott adatokat statisztikai mintákként kezeltem és – ahol arra a minták elemszáma okán lehetőség volt – megvizsgáltam az egyes minták azonosságát, illetve különbözőségét. Ehhez Wilcoxon-próbát [43, 44] használtam, $\varepsilon = 0,1$ kétoldali szignifikanciaszinten.

Először a különböző alapanyag orientációkat (T-L és T-S) vizsgáltam meg és megállapítottam, hogy az eltérés szignifikáns, a minták külön kezelendők. Ezt követően, az S1100M hegesztett kötési esetén orientációnként (21W és 23W) az undermatching és matching párosításokat elemeztem és megállapítottam, hogy az eltérések – a 23W orientáció ΔK_{fc} mintáit kivéve – nem szignifikánsak, a minták tehát – a 23W orientáció ΔK_{fc} mintáit kivéve – egy-egy mintába összevonhatók. Ennek ismeretében azt is megvizsgáltam, hogy a hegesztett kötés orientációnként (21W és 23W) összevont minták azonosnak tekinthetők-e vagy sem. Eredményül azt kaptam, hogy ezek a minták minden esetben szignifikánsan különböznek egymástól. Az S1300Q acél esetén elsőként a különböző alapanyag orientációkat (T-L és T-S) vizsgáltam meg és megállapítottam, hogy az eltérés szignifikáns, a minták külön kezelendők. Ezután a 21W hegesztett kötés orientációra a két undermatching párosítást elemeztem és megállapítottam, hogy az eltérések – sem az n, sem a ΔK_{fc} minták esetében – nem szignifikánsak, a minták tehát egy-egy mintába összevonhatók. Ugyanilyen elemzést a 23W hegesztett kötés orientációra nem tudtam végezni, az alacsony minta elemszámok miatt. A harmadik lépésben, feltételezve azt, hogy elegendő eredmény birtokában a 23W orientáció a 21W orientációval azonos eredményre vezetne, azt is megvizsgáltam, hogy a hegesztett kötés orientációnként (21W és 23W) összevont mintákat azonosnak tekinthetnénk-e vagy sem. Eredményül azt kaptam, hogy ezek a minták minden esetben szignifikánsan különböznenek egymástól.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK – TÉZISEK

- T1. The A vizsgált, 1100 MPa és 1300 MPa szilárdsági kategóriájú, különböző gyártástechnológiával készült (termomechanikus, illetve nemesített) acélok szívósságcsökkenés szempontjából kritikus hegesztési hőhatásövezeti zónái a jellemző hűlési idő ($t_{8/5}$) függvényében eltérő tendenciájú szilárdság- és szívósságváltozást mutatnak. Ezeket a megállapításokat a fizikai szimulációval előállított hőhatásövezeti zónákon elvégzett keménységmérések és műszerezett ütővizsgálatok eredményei igazolták. (1)(4)(5)(7)(9)(10)(11)(19)(21)
- T2. A huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéssel készült hegesztett kötések szilárdsági- és szívóssági tulajdonságai a vizsgált 1100 MPa szilárdsági kategóriájú acél esetén az undermatching hozaganyag alkalmazásával, míg a vizsgált 1300 MPa szilárdsági kategóriájú acél esetén a nagyobb szilárdságkülönbséget mutató undermatching hozaganyag alkalmazásával a kedvezőbbek. Ezeket a megállapításokat az ipari körülmények között készített hegesztett kötéseken elvégzett keménységmérések és műszerezett ütővizsgálatok eredményei igazolták. (2)(6)(15)(18)(20)
- T3. A vizsgált termomechanikusan kezelt acél alapanyag kifáradási határ/szakítószilárdság aránya nagyobb, mint a vizsgált nemesített acélé; továbbá, ez a nagyobb arány illeszkedik a különböző szilárdságú acélokra együttesen jellemző kifáradási határ - szakítószilárdság kapcsolathoz. Ezeket a megállapításokat az alapanyagokon elvégzett nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei igazolták. (3)(8)
- T4. Mindkét vizsgált acél huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéssel készült hegesztett kötéseinek nagyciklusú fáradással szembeni ellenállása akkor kedvezőbb, ha a kötés a nagyobb szilárdságú hozaganyaggal készül. Az 1100 MPa szilárdsági kategóriájú acél esetében ez a matching, az 1300 MPa szilárdsági kategóriájú acél esetében ez a kisebb szilárdságkülönbségű undermatching alapanyag-hozaganyag párosítást jelenti. Ezeket a megállapításokat az ipari körülmények között készített hegesztett kötéseken elvégzett nagyciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei igazolták. (3)(8)
- T5. Mindkét vizsgált alapanyag és huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéssel készült hegesztett kötéseinek fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállása a hengerlési irányban (T-L, illetve 21) és a vastagság irányban (T-S, illetve 23) szignifikánsan különböző; mind az alapanyagok, mind azok hegesztett kötési érzékenyebbek a vastagság irányban terjedő repedésekre. A szignifikáns különbséget az elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokból meghatározott Paris-Erdogan

összefüggés kitevő (n) és ciklikus törési szívósság (ΔK_{fc}) értékek egyaránt bizonyítják. (14)(16)(17)

- T6. Egyik vizsgált alapanyag esetében sincs szignifikáns különbség a két – az S1100M acél esetében matching és az undermatching, az S1300Q acél esetében két undermatching – hozaganyaggal készített hegesztett kötések fáradásos repedésterjedés során mutatott viselkedése között. Ezt a megállapítást az S1100M acélon 21 és 23 orientációkban, az S1300Q acélon 21 orientációban elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei igazolták. (16)(17)
- T7. Mindkét vizsgált anyagminőség hegesztett kötéseinek elkészítéséhez használt hozaganyag megválasztását (matching vagy undermatching, undermatching esetén a szilárdságkülönbség is) a hegesztett szerkezet igénybevétele befolyásolja. Ezt a megállapítást a hozaganyagok vizsgálati eredményekre (alapvető mechanikai tulajdonságok, nagyciklusú fáradással és fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállás) gyakorolt hatása igazolta. (2)(6)(15)(16)(17)(18)(20)

4. A HASZNOSÍTÁS ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

A vizsgált nagyszilárdságú acélok alkalmazása sem külföldön, sem hazánkban nem elterjedt még, ezért a mechanikai tulajdonságok és a fáradási jellemzők, valamint a hegesztés hatásának ismerete meglehetősen hiányos. A releváns szabványok előírásai is csak kisebb szilárdságú acélokra vonatkoznak, így nem állnak rendelkezésre olyan előírások, amelyek figyelembe veszik ezen nagyszilárdságú acélok eltérő tulajdonságait. Mivel a különböző nagyszilárdságú acélokat különböző gyártástechnológiákkal állítják elő és különböző az összetételük, máshogy reagálnak a hőbevitelre és más a fáradással szembeni ellenállásuk is, ezért nem lehet általános javaslatokat tenni sem a hegesztésükre, sem az alkalmazásukra. Ezért jelen disszertáció egyik célja, hogy az ipar számára is hasznos információkat szolgáltatson (vastaglemezek esetén) a jelenleg forgalomban lévő legnagyobb szilárdsági kategóriába tartozó termomechanikusan kezelt és nemesített szerkezeti acélokról.

A fizikai szimuláció eredményei és a hegesztéshez használt paraméterek és adatok hasznos ismeretekkel szolgálhatnak a hegesztő mérnökök számára. Mivel nagyszilárdságú acélok esetén fokozottan kell számolni – főként a hőhatásövezetben – a kilágyulás veszélyével, a hőbevitel megfelelő korlátozása kiemelt fontosságú. Valamint, vastaglemezek esetén szintén figyelembe kell venni, hogy a több sorból elkészített kötések hőhatásövezetében kialakulhatnak olyan sávok is, amelyeket még jobban érint a kilágyulás veszélye.

Nagyszilárdságú acélok esetén szintén problémát jelent a hozaganyag választás, mivel matching típusú hozaganyag csak 1100 MPa folyáshatárig áll rendelkezésre. Ráadásul, ezek a hozaganyagok is újnak minősülnek, ezért az azokra vonatkozó információk is hasznosak lehetnek a technológus mérnökök számára. A disszertációmban két különböző szilárdsági kategóriába tartozó hozaganyaggal készített kötéseken végzett különböző anyagvizsgálatokról található eredmények. Ezek értelmében, a keménység és az ütőmunka értékek mindkét hozaganyaggal hasonlóak voltak, ebből a szempontból tehát előnyös lehet az undermatching hozaganyag alkalmazása. Húzóigénybevétel esetén viszont érdemes a nagyobb szilárdsági kategóriába tartozó hozaganyagot választani.

A fizikai szimulációs vizsgálatokhoz és a ténylegesen elkészített hegesztett kötésekhez kapcsolódóan szintén érdemes megemlíteni, hogy a műszerezett ütővizsgálatok eredményei alapján főként a hőhatásövezet meglehetősen rideg viselkedést mutatott. Ebből következően dinamikus igénybevétel esetén – biztonsági okokból – érdemes nagy figyelmet fordítani a negatív hőmérsékleten történő alkalmazás során a nagyszilárdságú acélokból készült hegesztett szerkezetekre.

A vizsgált acélok és hegesztett kötéseik ismétlődő igénybevétellel kapcsolatos vizsgálatainak eredményeit mind a hegesztőmérnökök, mind a tervező mérnökök tudják hasznosítani. Disszertációmban szerepelnek nagyciklusú fáradásra és fáradásos repedésterjedésre érvényes határgörbék is. A nagyciklusú fáradástóvizsgálatok alapján egyértelműen látszik, hogy mindkét vizsgált acél esetén a hegesztett kötések fáradási

jellemzői elmaradnak az alapanyagétól, ezért ezt a tervezés során figyelembe kell venni. A kapott eredmények alapján mindkét anyagminőség esetén érdemes a nagyobb szilárdsági kategóriába tartozó hozaganyagot alkalmazni. Továbbá, mivel az eredmények alapján a kifáradási határ környezetében nagy a fáradási ciklusszámok szórása, ezért a vizsgált nagyszilárdságú acélok esetén, a klasszikus Wöhler görbe (eső és vízszintes egyenes) helyett célszerű lehet a fáradási viselkedést két eső egyenessel leírni. Ez a határozott kifáradási határ eltűnését is jelenti, amelynek méretezési aspektusai is vannak.

A repedésterjedés körülményeire minkét vizsgált alapanyag és hegesztett kötéseik esetén is sikerült határgörbékét meghatározni. Ipari felhasználás szempontjából ez előnyös lehet, mert ezek a határgörbék alkalmazhatók hegesztett szerkezetek integritásának megítélésére, élettartamuk és maradó élettartamuk becslésére, valamint összehasonlító számítások elvégzésére is.

A disszertációban található eredmények a hegesztő és a tervező mérnökök mellett az acélfejlesztéssel foglalkozó mérnökök számára is előnyösek lehetnek, mivel rávilágítanak a nagyszilárdságú acélok hegesztése során létrejövő kedvezőtlen szövetszerkezeti változásokra, amelyek kihatnak a mechanikai tulajdonságokra. Ezért, a fejlesztő munka során, ezek az információk jó alapot biztosíthatnak a különböző ötvözők vagy a gyártástechnológia megfelelő megválasztásához.

A kutató munka lehetséges folytatásaként további mechanikai vizsgálatok (például szakító vagy hajlító vizsgálatok) és ismétlődő igénybevétel esetén kisciklusú fárasztó vizsgálatok elvégzésére is sor kerülhet. Továbbá, érdemes lehet a különböző utóhőkezelések hatásait is szisztematikusan megvizsgálni.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

Idegen nyelvű publikációk

- (1) J. Kovács, J. Lukács: Effect of the welding thermal cycles based on simulated heat affected zone of S1300 ultrahigh strength steel, *Key Engineering Materials*, 890, pp. 33-43, 2021, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.890.33>
- (2) J. Kovács, J. Lukács: Influence of filler metals on microstructure and mechanical properties of gas metal arc welded high strength steel, *Lecture notes in mechanical engineering, Vehicle and automotive engineering* 4, pp. 995-1005. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_83
- (3) J. Kovács; J. Lukács: Comparison of fatigue strength curves of different high strength steel categories, 76th IIW Annual Assembly and International Conference on Welding and Joining, Singapore, (2023) Paper: 130
- (4) J. Kovács; M. Gáspár; J. Lukács: Comparative study about the results of HAZ physical simulations on different high strength steel grades, 76th IIW Annual Assembly and International Conference on Welding and Joining, Singapore, (2023) Paper: 26_IX-L-1273-2023
- (5) J. Kovács, J. Lukács: Effect of the welding thermal cycles based on simulated heat affected zone of S1300 ultrahigh strength steel, 11th International Conference on Innovative Technologies for Joining Advanced Materials, TIMA20, Timisoara (online), (26-27.11.2020.)
- (6) J. Kovács: Influence of filler metals on microstructure and mechanical properties of gas metal arc welded high strength steel, International conference on vehicle and automotive engineering, VAE 2022., Miskolc, (8-9 Sept. 2022.)
- (7) J. Kovács: Comparative study about the results of HAZ physical simulations on different high strength steel grades, Commission IX, Sub-Commission meeting, Behavior of materials subjected to welding, IX-2789-2023, Munich, (6-8. March 2023.)
- (8) J. Kovács: Comparison of fatigue strength curves of different high strength steel categories, 76th IIW Annual Assembly and International Conference on Welding and Joining, OR-16-0130, Singapore, (16-2.1 July 2023.)
- (9) J. Kovács, M. Gáspár, J. Lukács, H. Tervo, A. Kaijalainen: Comparative study about the results of HAZ physical simulations on different high-strength steel grades, *Welding in the World*, 1714, 2024.

Magyar nyelvű publikációk

- (10) Kovács J, Lukács J.: S1300 ultra-nagyszilárdságú acél hőhatásövezetének fizikai szimulációs vizsgálatai, *GÉP, LXXI*: 5-6. pp. 81-86, (2020)

- (11) Kovács J., Lukács J.: Hőhatásövezeti sávok fizikai szimulációra alapozott vizsgálata S1300 ultra nagy szilárdságú acél esetén, *Hegesztéstechnika*, 32, 1, pp. 47-57, (2021)
- (12) Gál V., Gáspár M., Kovács J., Lukács Zs., Sisodia P. R. S.: Anyagtechnológiai kutatások az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhelyben, *Multidiszciplináris tudományok*, 11, 2, pp. 80-86, (2021), <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.2.11>
- (13) Kovács J., Dakhel A. Y., Lukács J.: A diffúziós hidrogéntartalom hegesztett kötésekre gyakorolt hatása, *Multidiszciplináris tudományok*, 11, 4, pp. 227-240, (2021), <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.4.27>
- (14) Kovács J., Lukács J.: Nagyszilárdságú acélok nagyciklusú fáradásra érvényes fáradási szilárdsági görbéi, *Kutatási eredmények a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetében*, *Évkönyv, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet*, pp. 87-96. (2022.)
- (15) Kovács J., Lukács J.: S1300 ultra-nagyszilárdságú acél huzalelektrodás védőgázos ívhegesztése, *Hegesztéstechnika* (1215-8372): 3 (1), pp. T51-T57. (2023.)
- (16) Kovács J., Gerald W., Lukács J.: Fáradásos repedésterjedés alform 1100M x-treme szerkezeti acélban és hegesztett kötéseiben, *Kutatási eredmények a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetében*, *Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet*, pp. 137-152., 2023.
- (17) Kovács J., Gerald W., Lukács J.: Fáradásos repedésterjedés 1300 MPa szilárdsági kategóriájú szerkezeti acélban és hegesztett kötéseiben, *Kutatási eredmények a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetében*, *Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet*, pp. 153-168. 2023.
- (18) Kovács J., Lukács J.: S1300 nagyszilárdságú szerkezeti acél huzalelektrodás védőgázos ívhegesztése, *XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencia*, 2022. 05. 19-21, *Kecskemét, Konferencia Kiadvány*, pp. 131-138.
- (19) Kovács J.: Ultra-nagyszilárdságú acélötvözetek hőhatásövezeti tulajdonságainak fizikai szimulációra alapozott vizsgálata, *Anyag- és Gépgyártástechnológiai Kutatások*, *Miskolci Egyetem* (2021.11.12.)
- (20) Kovács J.: S1300 nagyszilárdságú szerkezeti acél huzalelektrodás védőgázos ívhegesztése, *XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencia*, *Kecskemét* (2022. 05. 19-21.)
- (21) Kovács J.: Hőhatásövezeti sávok fizikai szimulációra alapozott vizsgálata ultra-nagyszilárdságú acél esetén, *Diplomamunka*, 2020.

6. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALMAK

- [1] M. Gáspár: Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel, *Metals*, 9, 1226., 2019.
- [2] M. St. Weglowski, M. Zeman, M. Lomozik: Physical Simulation of Weldability of Weldox 1300 Steel, *Material Science Forum*, 762, pp. 551-555., 2013.
- [3] S. Blacha, M. S. Weglowski, S. Dymek, M. Kopyscianksi: Microstructural and mechanical characterization of electron beam welded joints of high strength S960QL and Weldox 1300 steel grades, *Arch. Metall. Mater.*, 62, 2, pp. 627-634., 2017.
- [4] P. Kah, M. Pirinen, R. Suoranta, J. Martikainen: Welding of Ultra High Strength Steels, *Advanced Materials Research*, 849, pp. 357-365., 2014.
- [5] M. St. Weglowski, M. Zeman: Prevention of cold cracking in ultra-high strength steel Weldox 1300, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14, pp. 417-424., 2014.
- [6] A. Kurc-Lisiecka, J. Piwnik, A. Lisiecki: Laser welding of new grade of advanced high strength steel Strenx 1100 MC, *Arch. Metall. Mater.*, 62, 3, pp. 1651-1657., 2017.
- [7] R. Branco: High-Strength Steels, New trends in production and application, *Mechanical Engineering Theory of Application*, Nova science publisher, New York, pp. 144-198., 2018. (ISBN: 978-53613-907-5)
- [8] M. Gáspár, R. Sisodia: Improving the HAZ toughness of Q+T high strength steels by post weld heat treatment, *Materials Science and Engineering*, 426, 012012., 2018.
- [9] M. Amraei, A. Ahola, S. Afkhami, T. Björk, A. Heidarpour, X-L. Zhao: Effects of heat input on the mechanical properties of butt-welded high and ultra-high strength steels, *Engineering Structures*, 198, 109460., 2019.
- [10] H. Tervo, A. Kaijalainen, T. Pikkarainen, S. Mehtonen, D. Porter: Effect of impurity level and inclusions on the ductility and toughness of an ultra-high-strength steel, *Materials Science Engineering: A*, 697, pp. 184-193., 2017.
- [11] H. Ban, G. Shi: A review of research on high-strength steel structures, *Struct Build*, 171, 8, pp. 65-641., 2018.
- [12] M. Gáspár, A. Balogh: GMAW experiments for advanced (Q+T) high strength steels, *Production Processes and Systems*, 6, 1, pp. 9-24., 2013.
- [13] Zs. Koncsik: Lifetime analyses of S960M steel grade applying fatigue and fracture mechanical approaches, In: K. Szita Tóthné, K. Jármay, K. Voith (Eds.), *Solutions for Sustainable Development: Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development (ICESSD 2019)*, October 3-4, 2019, Miskolc, Hungary, CRC Press, pp. 316-324., 2019.
- [14] Koncsik Zs.: A szerkezetintegritás helye és szerepe az oktatásban és a kutatásban, *Multidiszciplináris Tudományok*, 9, 4, pp. 63-71., 2019.

- [15] Koncsik Zs.: Szerkezetintegritási kutatások az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhelyben, *Multidiszciplináris Tudományok*, 11, 2, pp. 372-379., 2021.
- [16] D. A. Porter: Weldable high-strength steels: challenges and engineering applications, 68 IIW Annual Assembly & International, Conference of the International of Welding, 2-3 July 2015, Helsinki, Finland, 2015.
- [17] F. Farrokhi, J. Siltanen, A. Salminen: Fiber laser welding of direct-quenched ultrahigh strength steels: evaluation of hardness tensile strength, and toughness properties at subzero temperatures, *ASME J Manuf. Sci. Eng.*, 137, 6, 061012., 2015.
- [18] M. Amraei, T. Skriko, T. Björk, X-L. Zhai: Plastic strain characteristics of butt-welded ultra-high strength steel (UHSS), *Thin-Walled Structures*, 109, pp. 227-241., 2016.
- [19] H. Tervo, A. Kajjalainen, V. Javaheri, M. Ali, T. Alatarvas, M. Mehtonen, S. Anttila, J. Kömi: Comparison of Impact Toughness in Simulated Coarse-Grained Heat-Affected Zone of Al-Deoxidized and Ti-Deoxidized Offshore Steels, *Metals*, 11, 1783., 2021.
- [20] M. Tümer, F. Pixner, R. Vallant, J. Domitner, N. Enzinger: Mechanical and microstructural properties of S1100 UHSS welds obtained by EBW and MAG welding, *Welding in the World*, 66, pp. 1199-1211., 2022.
- [21] R. P. S. Sisodia, M. Gáspár: Physical Simulation-Based Characterization of HAZ Properties in, Steels. Part 1. High-Strength Steels and Their Hardness Profiling, *Strength of Materials* 51, 3, pp. 490-499., 2019.
- [22] D. A. Metzler: A Gleeble®-based Method for Ranking the Strain-Age Cracking Susceptibility of Ni-Based Superalloys, *Welding Journal*, 87, pp. 249-256., 2008.
- [23] <https://www.bleeble.com> (utolsó mektekintés: 2023.10.28.)
- [24] R. Cao, Z. Yang, Z. Chan, W. Lei, J. Li, J. Zhang, X. Liang, J. Chen: The determination of the weakest zone and the effects of the weakest zone on the impact toughness of the 12Cr2Mo1R welded joint, *Journal of Manufacturing Processes*, 50, pp. 539-546., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.014>
- [25] Y. Huang, X. Chen, Z. Shen, B. Madigan, L. Yucheng, J. Zhou: Measurement and analysis of SHCCT diagram for CLAM steel, *Journal of Nuclear Materials*, 432, 1-3., pp. 460-465, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.07.011>
- [26] L. Lan, C. Qui, D. Zhao, L. Du: Analysis of microstructural variation and mechanical behaviors in submerged arc welded joint of high strength low carbon bainitic steel, *Materials Science and Engineering: A*, 558, pp. 592-601., 2012. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.057>
- [27] S. K. Sharma, S. Maheshwari: A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 38, pp. 203-217., 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.12.039>
- [28] Balogh A., Lukács J., Török I.: Hegesztetheőség és a hegesztett kötések tulajdonságai. Kutatások járműipari acél és alumínium ötvözet anyagokon, Miskolci Egyetem, Miskolc, pp. 11-41., pp. 202-209., 2015. (ISBN: 9789633580813)

- [29] B. Pyttel, D. Schwerdt, C. Berger: Very high cycle fatigue –Is there a fatigue limit? *International Journal of Fatigue*, 33, 1, pp. 49-58., 2011.
- [30] A. Akyel, M. H. Kolstein, F. S. K. Bijlaard: Fatigue strength of repaired cracks in base material of high strength steels, *Journal of Constructional Steel Research* 139., pp. 74-384., 2017.
- [31] Y. Hong, X. Liu, Z. Lei, C. Sun: The formation mechanism of characteristic region at crack initiation for very-high-cycle fatigue of high-strength steels, *Internal journal of Fatigue*, 89., pp. 108-118., 2016.
- [32] M. M. Pedersen: Improving the Fatigue and Control Performance of Loader Cranes, Department of Mechanical Engineering, Aalborg University, Special Report, No. 71.
- [33] Y. B. Liu, Z. G. Yang, Y. D. Li, S. M. Chen, S. X. Li, W. J. hui, Y. Q. Weng: Dependence of fatigue strength on inclusion size for high-strength steels in very high cycle fatigue regime, *Materials Science and Engineering: A* 517. 1-2, pp. 180-184., 2009.
- [34] Lukács J., Nagy Gy., Harmati I., Fótos R. K., Koncsik Zs. K. L.: Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből, Miskolci Egyetem, 2012. (ISBN 978-963-358-000-4)
- [35] J. Yu, P. Ziehl, B. Zárate, J. Caicedu: Prediction of fatigue crack growth in steel bridge components using acoustic emission, *Journal of Constructional Steel Research*, 67., 8., pp. 1254-1260., 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.03.005>
- [36] Y. Zhang, S. Wang, G. Xu, G. Wang, M. H. Zhao: Effect of microstructure on fatigue-crack propagation of 18CrNiMo7-6 high-strength steel, *International Journal of Fatigue*, 163., 107027., 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107027>
- [37] H. F. Li, P. Zhang, Z. F. Zhang: A new fatigue crack growth mechanism of high-strength steels, *Materials Science and Engineering: A*, 840., 142969., 2022. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142969>
- [38] JSME S 002: Standard Method of Statistical Fatigue Testing, 1981.
- [39] H. Nakazawa, S. Kodama: Statistical S-N testing method with 14 specimens: JSME standard method for determination of S-N curves. *Statistical research on fatigue and fracture. Current Japanese materials research – 2.* Eds.: Tanaka, T., Nishijima, S., Ichikawa, M., Elsevier Applied Science and The Society of Materials Science, Japan, pp. 59-69., 1987. (ISBN 1-85166-092-5)
- [40] H. F. H. Mobark: Fatigue strength and fatigue crack propagation design curves for high strength steel structural elements, PhD theses, Miskolc, pp. 67., 2020.
- [41] ASTM E1823-21: Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing, ASTM International, 2021.
- [42] P. Paris, F. Erdogan: A critical analysis of crack propagation laws, *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the ASME, pp. 528-534. 1963.

- [43] Vincze, I.: Matematikai statisztika ipari alkalmazásokkal, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975. (ISBN 963-10-0472-4)
- [44] D. B. Owen: Handbook of statistical tables, Vychislitel'nyjj Centr AN SSSR, Moskva, 1973.