

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**TERVEZÉSI HATÁRGÖRBÉK NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOKBÓL
KÉSZÜLT, ISMÉTLŐDŐ IGÉNYBEVÉTELŰ SZERKEZETI ELEMÉKHEZ**

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

DOBOSY ÁDÁM

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK,
OKLEVELES HEGESZTŐ SZAKMÉRNÖK, EWE/IWE

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK TÉMATERÜLET
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY ÉS MECHANIKAI TECHNOLOGIA TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TÉMACSOPORT VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TUDOMÁNYOS VEZETŐ

DR. LUKÁCS JÁNOS

CSc, PhD, EGYETEMI TANÁR

Miskolc

2017

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

- elnök: **Prof. Dr. Jármai Károly**
DSc, egyetemi tanár (ME)
- titkár: **Dr. Siménfalvi Zoltán**
PhD, egyetemi docens (ME)
- tagok: **Dr. Gremesberger Géza**
CSc, ny. főiskolai tanár (DUE)
- Dr. Májlinger Kornél**
PhD, egyetemi adjunktus (BME)
- Dr. Török Imre**
PhD, c. egyetemi tanár (ME)

HIVATALOS BÍRÁLÓK

- Horváthné Prof. Dr. Varga Ágnes**
CSc, ny. egyetemi tanár (ME)
- Dr. Palotás Béla**
CSc, főiskolai tanár (DUE)

1. BEVEZETÉS

1.1 ELŐZMÉNYEK

Napjaink mérnöki szerkezetei, berendezési újabb és újabb kihívások elé állítják a tervezőket. A mai felgyorsult világban szinte éves szinten jelennek meg új típusú alapanyagok, ezek pedig sok esetben új típusú megközelítést igényelnek. A nagyszámú modern alapanyag között – a mérnöki szerkezetek esetében – továbbra is vezető szerepet töltenek be a fémek és ötvözeteik, különösképpen az acélok. Kiemelkedő helyzetüket széleskörű felhasználhatóságuk indokolja [1]. Napjainkban az egyik legfőbb tendencia az alapanyagok szilárdságának növelése. A korszerű nagyszilárdságú acélok (*High Strength Steels* – HSS) esetében ezt speciális gyártástechnológiával érik el, amely különleges, összetett szövetszerkezetet eredményez. Mindezek következtében sok kihívás áll még a fejlesztőmérnökök és kutatók előtt [2]. A jelenleg érvényben lévő előírások nem feltétlenül tartanak lépést a legújabb acélok megjelenésével. Konkrét példa erre a melegen hengerelt szerkezeti acélokkal foglalkozó szabványcsalád termomechanikusan hengerelt acélokkal foglalkozó fejezete (MSZ EN 10025-4), ahol a legmagasabb kategória csupán 460 MPa garantált folyáshatárú, miközben az ilyen acélokból már a 960 MPa szavatolt folyáshatár is mindennapos. Az acélcsalád nemesített nagyszilárdságú acélokkal foglalkozó fejezete (MSZ EN 10025-6 [3]) 960 MPa folyáshatár kategóriát említ legnagyobb értéknek, pedig már 1300 MPa garantált folyáshatárral rendelkező acélok is megjelentek a piacon. A hegesztett acélszerkezetek tervezésével foglalkozó Eurocode 3 [4] csupán 460 MPa garantált folyáshatár értékig tartalmazza az információkat [5]; kiegészítő korlátozások figyelembevételével a 12. fejezet már 700 MPa folyáshatár értékig alkalmazható, más határértékeket azonban a kiterjesztés nem módosít [6][7].

A kihívások közül az egyik legjelentősebb a nagyszilárdságú acélból készült szerkezetek gyártása, illetve gyártástechnológiája, az ömlesztő hegesztés. A nehézséget az jelenti, hogy a gyártók által előállított szövetszerkezetet a hegesztés hőciklusa irreverzibilisen megváltoztatja, szívósságcsökkenéssel lehet számolni, a jelentős keménységcsúcsok kialakulása mellett [8]. A hegeszthetőség tárgykörében fontos megemlíteni a hozaganyagok kérdéskörét is; az új típusú alapanyagok szilárdsága már olyan értéket ért el, amivel a hozaganyag gyártók csak nehezen tudják felvenni a versenyt. A korszerű HSS anyagok esetében a klasszikus elv – amely szerint az alapanyag és a hozaganyag folyáshatára közel azonos kell hogy legyen (idegen kifejezéssel *matching*) – nem tud teljesülni minden alkalommal [9].

A másik komoly kihívás, amivel ezen acélok esetében foglalkozni kell, az a belőlük készült (hegesztett) szerkezetek fáradása. A legmodernebb HS acél alapanyagok jellemzőit, tulajdonságait sem ismerjük teljes körűen; így amikor ezen anyagokat hegesztjük, még bizonytalanabbá válik a tudásunk. Általánosságban kijelenthető, hogy a nagy szilárdságból származó előnyök statikus húzóterhelés esetén teljesen kihasználhatók, a helyzet azonban nem

ennyire egyértelmű stabilitásvesztéskor (kihajlás, horpadás vagy kifordulás stb.). Ugyancsak bizonytalan ezen anyagok viselkedése ismétlődő igénybevételek esetén, ráadásul a különböző ismétlődő igénybevételek hatását külön kell kezelni [10]. Nagyszilárdságú acélok esetében jellemzően nagyciklusú fáradással (HCF), speciális körülmények között kisciklusú fáradással (LCF) kell számolni, míg a hegesztett kötések okán külön figyelmet érdemel a fáradásos repedésterjedés (FCG) [11].

1.2 CÉLKITŰZÉSEK

Magyarországon a HS acélokon belül – a vastaglemezek kategóriájában – a nemesített (Q+T) acélokat alkalmazzák a legnagyobb mennyiségben, ugyanakkor a termomechanikusan kezelt (TM) acélok is kezdenek egyre inkább elterjedni. Éppen ezért vizsgálataimhoz az MSZ EN ISO 10025-6 szerinti S960QL minőséget, illetve S960M minőséget választottam.

Mivel ezen acélok hegesztéstechnológiája összetett feladat, ezért kutatómunkám során az alábbi célokat tűztem ki:

- A két vizsgált acélra egy-egy optimális paramétertartomány meghatározása.
- A kiválasztott acélok különböző szilárdságából adódóan, S690QL esetén *matching* és *overmatching*, míg S960M esetén *matching* és *undermatching* hozaganyag-párosítás vizsgálata, az egyes párosítások hegeszthetőségi tulajdonságainak és a mechanikai jellemzők összehangolhatóságának az elemzése.

Az ismétlődő igénybevételek alatti viselkedés területén, célul tűzöm ki a hegesztési munkatartományok, illetve a különböző hozaganyag-párosítások esetén a fáradási jellemzők széles körű vizsgálatát.

- A kisciklusú fáradás esetén a két alapanyag fáradási jellemzőinek a vizsgálata a fő cél, részletesen elemzem továbbá az S690QL alapanyag esetén a *matching* és az *overmatching*, míg az S960M alapanyag esetén a *matching* hozaganyag-párosítás hatását a fáradási jellemzőkre.
- A nagyciklusú fáradás esetén, az S690QL acélminőségnél, fő célul a hozaganyag-választás hatásának vizsgálatát (*mismatch*), míg az S960M acélminőségnél a hegesztési paraméterek, vagyis a hőbevitel hatásának vizsgálatát (kis, közepes és nagy hőbevitel, *matching* hozaganyag) tekintem fő kutatási irányoknak.
- A fáradásos repedésterjedés esetén szintén a két alapanyag jellemzőinek vizsgálatát tűzöm ki legfőbb célul, ugyanakkor megvizsgálom a hozaganyag-választás szerepét is.
- Mindhárom kísérletsorozat céljának tekintem tervezési határgörbék meghatározását, mind a vizsgált alapanyagokra, mind pedig azok hegesztett kötéseire.

2. A FELADAT MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

Értekezésemben a közepes falvastagságtartományban használt, nemesített (Q+T) és termomechanikusan kezelt (TM) nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségi kérdéseivel, valamint ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállásával foglalkoztam.

Az *elméleti kutatómunka* első részében irodalmi áttekintést adtam a nagyszilárdságú acélok esetében alkalmazott szilárdságnövelési módszerekről, elemezve a nemesített és a termomechanikusan kezelt acélok előállítási módjait, gyártástechnológiáját, továbbá hegeszthetőségi jellemzőit. Mindkét acél esetében közös jellemző az összetett, rendkívül finomszemcsés szövetszerkezet, ugyanakkor az előállítási, gyártási mód igen eltérő [12]. Nemesített acélok esetében egy edzést követő magas hőmérsékletű megeresztést tartalmaz a gyártástechnológia. Mivel a karbontartalom nem tekinthető jelentősnek, ezért ezeknél az acéloknál a fő szilárdságnövelő mechanizmus elsősorban a finom tűs martenzit szerkezetből és a diszlokáció-sűrűségből adódik, kevésbé az oldott állapotban lévő karbontól [1][13]. Ugyanakkor, meghatározó a magas hőmérsékletű megeresztés hőmérséklete és a hőtartási idő, mivel megeresztéskor az edzés során keletkezett rácsfeszültségek csökkennek és a szövetszerkezet az egyensúlyi állapot irányába változik. Termomechanikusan kezelt acélok esetében a hőkezelés és a képlékenyalakítás hatását alkalmazzák, amelynek során a hengerlés hőmérsékletét $1100-1200$ °C-os hőmérsékletről $850-900$ °C-ra csökkentik, és a további hengerlési hőmérsékleteket is magasabb hőmérsékleten végzik. A folyamat szabad levegőn történő hűléssel, vagy intenzív vízűtéssel zárul [14]. A termomechanikusan kezelt acélok (technológiától függően) jellemzően megeresztett bénit mátrixba ágyazott, martenzit és cementit szigetekből állnak, elhanyagolható mennyiségű ferrit és perlit jelenléte mellett. Ez alapján megállapítható, hogy mind a nemesített, mind a termomechanikusan kezelt acélok összetett gyártástechnológiát követelnek meg [15]. Összeségében a TM acélok a kisebb ötvözőtartalom és finomabb szemcseszerkezet miatt kedvezőbb mechanikai és szívóssági jellemzőkkel rendelkeznek, ugyanakkor gyártható lemezzvastagságuk ma még elmarad a Q+T acélokéhoz képest [16].

Hegeszthetőség szempontjából, mindkét acél esetében komplex hőhatásövezettel kell számolni, azonban – a kedvezőbb vegyi összetétel miatt – a termomechanikusan kezelt acélok jóval kedvezőbb hegesztéstechnológiát tesznek lehetővé [17]. Ismertettem a nemesített és a termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez alkalmazható előmelegítési hőmérséklet meghatározásának módszereit és a hegesztéstechnológia $t_{8,5/5}$ hűlési időn alapuló tervezésének koncepcióját. Külön foglalkoztam, a szövetszerkezetből adódóan, a két acélcsoport eltérő hegeszthetőségével, hidegrepedéssel szembeni érzékenységükkel, megvizsgáltam az optimális hegesztéstechnológiák lehetőségeit. A hozaganyag-választás kérdéskörét megvizsgálva kijelenthető, hogy a 960 MPa szilárdsági kategória határértéket jelent, ennél nagyobb szilárdság esetén már korlátozottak a rendelkezésre álló hozaganyag

lehetőségek, *matching*, illetve *undermatching* hozaganyagot kell alkalmazni. A legtöbb irodalom *matching*, illetve *undermatching* hozaganyag párosítást javasol, azonban speciális esetekben, kisebb szilárdságkategóriákban előnyös lehet az *overmatching* hozaganyag alkalmazása is [18].

A káresetek bekövetkezésének szempontjából a hegesztett kötések döntő szerepet töltenek be, ugyanis teljesen hibátlan hegesztett kötés nem létezik; bizonyos méretű és mennyiségű eltéréssel mindig számolni kell [19][20]. A jellemző károsodási mód ezen szerkezetek esetén a nagyciklusú fáradás (HCF), azonban speciális alkalmazási területeken számolni kell a kisciklusú fáradás (LCF) megjelenésével, illetve az eltérések okán a fáradásos repedésterjedés (FCG) jellemzőit is vizsgálni szükséges. Az ismétlődő igénybevételek szempontjából fontos szem előtt tartani, hogy a szilárdság növekedésével nem feltétlenül kapunk kedvezőbb fáradási jellemzőket, továbbá a nagyszilárdságú acélok kihajlással, horpadással szembeni ellenállása sem mondható kiemelkedőnek [21][22]. A tervezés szempontjából a nagyszilárdságú acélok más megközelítést igényelnek, azonban a legtöbb előírás még nem, vagy csak bizonyos megköötésekkel tartalmazza a legkorszerűbb acélokat [23]. Ezek az előírások igen gyakran nem veszik figyelembe a különböző gyártási módokat sem, az eltérő hozaganyag-párosítás hatásával pedig szinte egyik előírás sem foglalkozik.

A kísérleti kutatómunkám két részre osztható. Az első részében a kiválasztott alapanyagok (1. táblázat) hegeszthetőségi kérdéseivel foglalkoztam, amelynek során meghatároztam a lehetséges hegesztési munkatartományokat, illetve a hozaganyag-párosítás kérdéskörét elemeztem. Kutatómunkám második részben a vizsgált alapanyagok és hegesztett kötések ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállását vizsgáltam, külön figyelmet fordítva a hozaganyag-választás hatására.

1. táblázat. A kutatómunka során alkalmazott anyagminőség jelölések magyarázata

Szabványos jelölés	Gyártói jelölés	Disszertációban alkalmazott jelölés	Lemezvastagság, mm
S690QL	RUUKKI Optim 700QL	R700Q	30
S690QL	SSAB Weldox 700E	W700Q	15
S960M	VOESTALPINE Alform 960M	A960M	15
S960QL	SSAB Weldox 960E	W960Q	15

Megvizsgáltam ezen acélok hegeszthetőségét az ideálisan alkalmazható hegesztési paraméterek, illetve a hozaganyag-választás kérdéskörének oldaláról. A hegesztett kötések védőgázos fagyóelektródás ívhegesztéssel (MSZ EN ISO 4063 szerinti 135-ös eljárás), az Anyagszerkezetani és Anyagtechnológiai Intézet Hegesztéstechnológiai Laboratóriumában rendelkezésre álló REHM MegaPuls 500, illetve DAIHEIN Varstroj Welbee P500L szinergikus hegesztőgépek segítségével készítettük el, az MSZ EN ISO 14175 szerinti M21 (82% Ar + 18% CO₂) védőgáz alkalmazásával. A hegesztési kísérletek azonossága, reprodukálhatósága érdekében a kísérletek során, a gyöksor kivételével, hegesztőkocsit alkalmaztunk. A kísérleteket 300 mm x 125 mm nagyságú lemezekon végeztük, bekezdő és

kifutó lemezek alkalmazásával, betartva ezzel az MSZ EN ISO 15614-1 szabványnak megfelelő eljárásvizsgálatban foglaltakat. A hegesztési munkatartományok meghatározása során nyert tapasztalatok egyértelműen mutatják, hogy a különböző szilárdsági kategóriákra érvényes hegesztési munkatartományokat minden esetben külön kell meghatározni, mert az egyes kategóriák hegeszthetősége között jelentős különbségek lehetnek. Saját hegesztési tapasztalataim alapján az S700Q kategória esetén az ideális hűlési idő tartománya 5-10 s, 150 °C előmelegítési és 180 °C maximális rétegeközi hőmérséklet alkalmazása mellett. A kísérletek szerint ennél nagyobb tartomány is elfogadható lehet, ipari körülmények között azonban a szűkebb tartomány az indokolt. Az S960M kategória esetén jelentősen nagyobb, 5-20 s az ideális kritikus hűlési idő tartomány. Ebben az esetben előmelegítésre nincs szükség, azonban vastagabb lemezek esetén 50-80 °C javasolható, akár 200 °C rétegeközi hőmérséklet mellett is.

A hozaganyag-párosítás hatásának vizsgálata során különböző szilárdságú hozaganyagokat alkalmaztam a 2. táblázatnak megfelelő párosításokkal. A kapott eredmények alapján az S700Q kategória esetén alkalmazott *overmatching* hozaganyag egyértelműen javítja a szilárdsági jellemzőket. A hozaganyag kisebb ütőmunkája kedvezőtlen hatást gyakorol a varrat szívóssági jellemzőire, a hőhatásövezetben ugyanakkor – az összetett felépítés következtében – szívósságnövekedés figyelhető meg. A nagyobb szilárdságú hozaganyag alkalmazásakor átlagosan nagyobb keménységértékekkel, a hőhatásövezetben pedig jelentősebb kilágyulással kell számolni, szemben a *matching* hozaganyaggal, azonban ezek az eltérések nem jelentősek. Részben *matching*, részben *overmatching* hozaganyagok alkalmazása esetén a mechanikai jellemzők a csak *matching* és a csak *overmatching* esetek során kapott eredmények közé estek.

2. táblázat. A hegesztési kísérletek során alkalmazott alapanyag-hozaganyag párosítások

Alapanyag	Hozaganyag	Párosítás
R700Q	NiMoCr	matching
W700Q	Union X85	matching
W700Q	Union X90	overmatching
A960M	Union X96	matching
A960M	Union X90	undermatching

A kapott eredményeket elemezve megállapítható, hogy előnyös lehet a gyöksorokat *matching*, míg a további sorokat *overmatching* hozaganyaggal készíteni [24]. Az A960M kategória esetén, *undermatching* hozaganyagot alkalmazva, a szilárdsági jellemzők egyértelműen kisebbek a *matching* esethez képest, ugyanakkor a szívóssági jellemzők nem különböznek szignifikánsan attól. A keménységeloszlást vizsgálva szintén nem állapítható meg számottevő eltérés a *matching* és az *undermatching* kötés között. Fontos még kiemelni, hogy a kötés kialakítástól függően, a hőhatásövezetben fokozottabban kell számolni a kilágyulás veszélyével [25]. Kedvezőtlen varratkialakítás esetén a gyöksort minden további sor képes hőkezeli, ezáltal a gyöksor hőhatásövezetében egy többszörösen kilágyult szövetszerkezet tud

kialakulni. Ezt a beolvadási mélység csökkentésével, illetve más leélezési szög alkalmazásával lehet elkerülni.

A hegesztett kötések ismétlődő igénybevételű vizsgálatai kiterjedtek az előzőekben bemutatott összes kísérletsorozatra. A kisciklusú fárasztóvizsgálatokat (LCF) teljes alakváltozás amplitúdóra vezérelve végeztem, $R = -1$ terhelés aszimmetria tényező és háromszög alakú terhelési függvény mellett. Tönkremeneteli kritériumnak a húzó oldali maximális erő 10%-os csökkenését állítottam be, laboratóriumi körülmények között, hengeres próbatesteket alkalmazásával [26][27]. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált tartományban az A960M alapanyag esetében a rugalmas alakváltozás a meghatározóbb. Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy a képlékeny alakváltozás amplitúdó esetében az eredmények nagyobb szórást mutatnak, vagyis a termomechanikusan kezelt alapanyagok képlékeny alakváltozása elsősorban a rendkívül finom szemcseszerkezet miatt kevésbé megbecsülhető folyamat. A W700Q alapanyag és hegesztett kötéseinek eredményeit megvizsgálva egyértelműen látható a hegesztéstechnológia kedvezőtlen hatása. A *matching* hozaganyaggal készült kötés eredményei elmaradnak az alapanyag tulajdonságaitól, ugyanakkor az *overmatching* hozaganyaggal készült kötés elmarad a *matching* kötés jellemzőitől. Vagyis, a nagyobb szilárdságú, de kisebb alakváltozó képességű hozaganyag egyértelműen negatív hatással van a kisciklusú fáradási jellemzőkre. A kísérleti eredményekből meghatározott, kisciklusú fáradásra érvényes tervezési görbék paramétereit a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat. A kisciklusú fárasztási eredményeket közelítő függvények paramétereit

Anyag-minőség	Rugalmas alakváltozás			Képlékeny alakváltozás			Ciklikus folyásgörbe		
	σ_f'	b	R	ϵ_f'	c	R	K	n	R
W700Q aa	721	-0,037	0,89	0,265	-0,589	0,99	822,85	0,070	0,97
W700Q m	865	-0,066	0,97	0,0776	-0,488	0,98	1204,5	0,134	0,97
W700Q om	1092	-0,105	0,97	0,275	-0,745	0,91	1075,6	0,106	0,80
A960M aa	1236	-0,061	0,99	0,232	-0,698	0,86	1242,9	0,068	0,90

A táblázat külön adja meg az alakváltozás amplitúdó – tönkremeneteli ciklusszám függvények esetében a rugalmas (σ_f' , b) illetve a képlékeny (ϵ_f' , c) alakváltozás görbéket leíró függvények paramétereit, valamint a feszültség amplitúdó – képlékeny alakváltozás amplitúdó közötti kapcsolatot leíró paramétereket (K , n). Minden esetben meghatározásra kerültek az eredményeket közelítő függvények korrelációs együtthatói (R) is.

A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok (HCF) során a vezérlési mód állandó terhelés-amplitúdójú volt, a terhelési aszimmetria tényező pedig a teljes vizsgálatsorozatban állandó értékű, $R = 0,1$. A vizsgálatokat szinuszos alakú terhelési függvényvel végeztem, laboratóriumi körülmények között, lapos próbatestek alkalmazásával [28]. A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy minden vizsgált alapanyag esetében a hegesztett kötések fáradási ellenállása, hozaganyagtól függetlenül, elmaradt az alapanyagétól. Kisebb ciklusszámok (kb.

$2 \cdot 10^5$ ciklusszám alatt), vagyis nagyobb terhelésszintek esetén, az *overmatching* kötés elmarad ugyan a *matching* kötés nagyciklusú fáradási jellemzőitől, azonban nagyobb ciklusszámok esetén az *overmatching* kötés jellemzői meghaladják a *matching* kötését. Vagyis, ha a hegesztett kötést terhelő erő nem túlzottan nagy, a repedések kialakulása, illetve terjedése nehezebben tud bekövetkezni, illetve végbemenni; nagyobb terhelés esetén viszont az *overmatching* hozaganyag ridegebb viselkedése játszhat szerepet, ami repedések keletkezésének kedvez, ezáltal az elviselt ciklusszám is kisebb. Az A960M alapanyag esetén a hőbevitel növelésével arányosan javul a kötések kifáradási határának értéke, ezzel egyidejűleg a kötések mechanikai jellemzői gyakorlatilag változatlanok maradnak. Az ellentmondás lehetséges magyarázata, hogy kis hűlési idők esetén a szemcseszerkezet nem változik jelentősen, a szemcsedurvulás nem meghatározó, így a kialakuló repedések a kisméretű szemcsék között könnyebben tudnak terjedni. Nagy hűlési idők esetén a szemcsedurvulás is jelentős lehet, különösen a hőhatásövezet durvaszemcsés sávjában, ami a keletkező repedések terjedését nagymértékben képes akadályozni. *Undermatching* hozaganyag alkalmazásakor (közepes hőbevitel) a kifáradási határ értéke nagyobb, mint a *matching* kötések kis, illetve közepes hőbevitellel készült kötései esetén, és lényegében azonos az alapanyagéval és a *matching* kötések nagy hőbevitellel készült kötéseinél meghatározottal. Az élettartam szakasz nagyobb részében az *undermatching* kötések viselkedése kedvezőbb. A kísérleti eredményekből meghatározott, nagyciklusú fáradásra érvényes tervezési görbék paramétereit a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok számszerűsített eredményei

Anyag-minőség	Kimunkálás, repedésterjedés	m , –	$lg(a)$, –	N_k , ciklus	$\Delta\sigma_D$, MPa	$\Delta\sigma_{1E07}$, MPa
R700Q	AA h/v	51,282	151,109	–	–	646
	M k/3W	4,826	17,476	9,850E+05	239	–
	M k/1W	50,251	141,26	–	–	470
W700Q	AA h/k	12,453	39,650	1,68E+06	483	–
	M k/1W	9,960	32,469	–	–	–
	OM k/1W	31,25	90,415	–	–	467
A960M	AA h/k	11,494	37,885	5,122E+06	513	–
	M k/1W 5-6 s	8,130	27,893	4,270E+06	412	–
	M k/1W 10-11 s	16,129	49,413	2,681E+06	462	–
	M k/1W 15-17 s	15,385	47,838	9,693E+05	525	–
	UM k/1W	41,667	119,723	–	–	507

A táblázatban található m és $lg(a)$ értékek az élettartam szakaszt leíró Basquin összefüggés paramétereit, az N_k érték a Wöhler görbe töréspontjához (könyökponthoz) tartozó igénybevételi szám, a $\Delta\sigma_D$ a kifáradási határ, míg a $\Delta\sigma_{1E07}$ az $1 \cdot 10^7$ igénybevételi számhoz tartozó feszültség, azokban az esetekben, amikor a görbe vízszintes szakaszát nem lehetett meghatározni.

A laboratóriumi körülmények között, I terhelésmódban elvégzett fáradásos repedés-terjedési sebesség vizsgálatoknál (FCG) ugyancsak $R = 0,1$ terhelés aszimmetria tényezőt és szinusz alakú terhelési függvényt alkalmaztunk. A terjedő repedést százszoros nagyításban, optikai úton követtük, TPB próbatesteken [29][30]. A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy mind a W700Q, mind az A960M alapanyagok esetében, a fáradásos repedés terjedése a hengerlési és a hengerlésre merőleges irányokban (L-T és T-L) szignifikánsan azonosnak, a vastagság irányban (T-S) pedig szignifikánsan eltérőnek tekinthető. A hegesztett kötések fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállása, mindkét alapanyag esetében, szignifikánsan különbözik az alapanyagétól, mindkét vizsgált orientációban és mindegyik *mismatch* esetben. A Paris-Erdogan összefüggés kitevőjének (n) átlaga minden *mismatch* esetben meghaladja az alapanyagra vonatkozó értéket. A hegesztett kötések fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállása három esetben megegyezett a két vizsgált orientációban (21W és 23W), csak az A960M *matching* kötések esetén volt különböző. A ciklikus törési szívósság (ΔK_{fc}) értéke, mindkét alapanyag hegesztett kötéseiben, a 23W irányban (vastagság irány) volt a kisebb. A W700Q acél hegesztett kötéseinek ciklikus törési szívóssága jellemzően meghaladja az alapanyagét, az A960M acél esetében pedig jellemzően kisebb annál. A fáradásos repedésterjedés körülményei között, a W700Q acél esetében a *matching* eset kedvezőbb, mint az *overmatching* eset, az A960M acél esetében pedig az *undermatching* eset kedvezőbb, mint a *matching* eset, orientációtól függetlenül. A kísérleti eredményekből meghatározott, fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék paramétereit az 5. táblázat foglalja össze.

5. táblázat. A fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék paramétereit

Alapanyag, hegesztett kötés	Orientáció	n	C	ΔK_{fc}
		mm/ciklus, MPam ^{1/2}	MPam ^{1/2}	MPam ^{1/2}
W700Q AA	T-L és L-T	1,70	8,09 E-07	101
	T-S	1,50	2,06 E-06	75
W700Q M	T-L/21W	4,10	1,12 E-11	105
	T-S/23W	2,30	4,93 E-08	80
W700Q OM	T-L/21W	1,85	4,02 E-07	96
	T-S/23W	1,90	3,19 E-07	61
A960M AA	T-L és L-T	1,82	4,63 E-07	116
	T-S	1,75	6,41 E-07	87
A960M M	T-L/21W	1,90	3,19 E-07	114
	T-S/23W	2,75	6,06 E-09	82
A960M UM	T-L/21W	2,40	3,10 E-08	115
	T-S/23W	2,15	9,93 E-08	67

A táblázatban közölt adatok I terhelésmódra vonatkoznak, arra érvényesek. Tekintettel a kísérletsorozat statisztikai mintáira, illetve azok összevonási lehetőségeire, mind az alapanyagok, mind a hegesztett kötések esetében orientációkhoz rendelt határgörbékét határoztam meg. Ugyancsak külön határgörbék tartoznak a *mismatch* hatás kifejezésére.

Abban az esetben, ha a terjedő repedés orientációja ismert, akkor a táblázat megfelelő sorában található értékek használhatók. Abban az esetben, ha a terjedő repedés orientációja nem ismert, akkor a vonatkozó értékek közül a kisebbet kell figyelembe venni. Ennek megfelelően, a táblázatban dőlt karakterekkel szerepelnek a nagyobb értékek. (Megjegyzendő, hogy a repedés alapanyagban (AA) vagy hegesztett kötésben való elhelyezkedését, illetve a *mismatch* hatást (*matching* (M), *overmatching* (OM) vagy *undermatching* (UM) állapot) ismertnek tételezzük fel). A táblázatban a feszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértékére (ΔK_{th}) nem szerepelnek adatok, ami azt jelenti, hogy a megadott határgörbék a ΔK_{th} környezetében, tehát a kis repedésterjedési sebességek tartományában, nyitottak. Ennek értelme kettős. Azokban az esetekben, amikor a ΔK_{th} értéke nincs megadva, akkor irodalmi adatok [10], és/vagy a ΔK_{th} és a terhelés aszimmetria tényező (R) közötti függvénykapcsolatok alkalmazhatók. Hegesztett kötések esetében, akár adott ΔK_{th} értéke, akár nem, a maradó feszültségek jellegének megítélése és nagyságrendjének becslése után a vonatkozó érték módosítható, illetve annak figyelembevételével választandó meg. Nyomó maradó feszültségek esetében ΔK_{th} értéke növelhető, míg húzó maradó feszültségek esetében csökkenteni kell azt.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- T1. A vizsgált acélok közül a termomechanikusan kezelt A960M minőség hegeszthetőségi tulajdonságai a kedvezőbbek, ebből következően az ipari gyakorlatban alkalmazandó hegesztéstechnológia – mind technológiatervezési, mind hegesztéstechnikai oldalról – könnyebben megvalósítható. Ezt a nemesített W700Q és a termomechanikusan kezelt A960M minőségekre, elméleti és kísérleti úton meghatározott hegesztési munkatartományok összehasonlítása segítségével igazoltam (1) (8) (16) (18).
- T2. A nemesített W700Q minőségű acél esetében az alapanyag kisciklusú fáradással szembeni ellenállása a legkedvezőbb, a *matching* kötés kisciklusú fáradással szembeni ellenállása pedig kedvezőbb, mint az *overmatching* kötésé. Ezt az elvégzett kisciklusú fásasztóvizsgálatok eredményei és az azokból meghatározott alakváltozás amplitúdó - tönkremeneteli ciklusszám függvények egyaránt igazolták (9) (11) (14) (24) (26).
- T3. A termomechanikusan kezelt A960M minőségű acél nagyciklusú fáradással szembeni ellenállása *matching* kötés esetén a hegesztés során alkalmazott hőbevitel függvénye, *undermatching* kötés esetén kedvezőbb, mint az annál nem nagyobb hőbevitelű *matching* kötésé, és lényegében azonos, mint az alapanyagé és a nagyobb hőbevitelű *matching* kötésé. A hőbevitel növelésével a kifáradási határ nő, miközben az élettartam lényegében nem változik. Ezt a nagyciklusú fásasztóvizsgálatok eredményeiből a lépcsős módszer szellemében meghatározott tervezési görbék igazolták (1) (2) (3) (17).
- T4. Mind a nemesített W700Q, mind a termomechanikusan kezelt A960M minőségű acél fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállása a hengerlési irányban és arra merőlegesen szignifikánsan azonos, vastagság irányban szignifikánsan különböző; mindkét acél érzékenyebb a vastagság irányban terjedő fáradásos repedésekre. Ezen acélok hegesztett kötéseinél, a *mismatch* hatástól függetlenül, a fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállás a kötések hossz tengelyének és vastagságának irányában szignifikánsan különböző. Ezt a statisztikus szemlélettel elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei valamint, azok összehasonlítása igazolta, és ez a sajátosság – ismert repedésgeometria esetén – integritási számításoknál kihasználható (2) (5) (7) (14) (15).
- T5. A nemesített W700Q minőségű acél esetében a *matching* kötés fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállása kedvezőbb, mint az *overmatching* kötésé; a termomechanikusan kezelt A960M minőségű acél esetében pedig az *undermatching* kötésé kedvezőbb, mint a *matching* kötésé. Ezt a statisztikus szemlélettel elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei és az azokból meghatározott határgörbék egyaránt igazolták (2) (19).

4. A HASZNOSÍTÁS ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

Napjainkban a gyakorló mérnökök, a tervezők és hegesztőmérnökök ismerete a nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségéről és fáradási jellemzőiről meglehetősen hiányos. Sok esetben rendelkezésre áll ezen acélokra vonatkozó előírás, javaslat a megfelelő hegesztéstechnológiára, azonban ezek gyakorta a kisebb szilárdságú acélok előírásainak kiterjesztett változatai, így nem veszik figyelembe a nagyszilárdságú acélok alapvető, azokétól eltérő jellemzőit. Ugyanakkor, ezen acélok viselkedése mind a gyártástechnológiák következtében, mind pedig statikus és ismétlődő igénybevételek esetén alapvetően különbözik a hagyományos acélokétól. Ezekből eredően nem lehet általános, minden nagyszilárdságú acélra érvényes javaslatokat tenni. Éppen ezért, jelen disszertáció egyik alapvető célja olyan ismeretek összefoglalása, amelyek az ipari szakemberek számára is hasznos információkat szolgáltatnak.

A hegesztési munkatartományok meghatározását tartalmazó fejezetben közölt adatok és eredmények, maguk a munkatartományok, hasznos ismeretekkel szolgálhatnak a hegesztett szerkezeteket gyártó mérnökök számára. A közölt diagramok segítségével könnyen meghatározhatók az optimális hegesztési paraméterek az egyes alapanyagok esetében, megkönnyítve a gyakorló mérnökök munkáját. A kötés kialakítástól függően a hőhatás-övezetben fokozottabban kell számolni a kilágyulás veszélyével, kedvezőtlen esetben ugyanis – a varratkialakításból adódóan – a gyöksort minden további sor képes hőkezeleni, így egy többszörösen kilágyult szövetszerkezet tud kialakulni. Ezt a beolvadási mélység csökkentésével, illetve a leélezési szög változtatásával lehet mérsékelni.

A hozaganyag-választás kérdéskörét vizsgáló fejezetben közölt megállapítások szintén a gyakorló hegesztőmérnökök számára lehetnek hasznosak. Mivel vizsgálataim kiterjedtek mind az S700, mind az S960 szilárdsági kategóriákra, így a megállapítások mindkét acélkategória esetében alkalmazhatók. A W700Q alapanyag esetén kapott eredmények értelmében, az *overmatching* hozaganyag alkalmazása azokon a helyeken, ahol a hegesztett kötések csupán statikus terhelést kapnak, előnyös lehet. Ugyanakkor a *matching/overmatching* vegyeskötés alkalmazása még kedvezőbb tulajdonságokkal bír, hiszen a kritikusnak számító gyök esetében a kisebb, jelen esetben egyenszilárdságú hozaganyag, nagyobb alakváltozó képessége jelent előnyt, míg a töltő sorok esetében a nagyobb szilárdság használható ki. Az A960M alapanyag esetében az *undermatching* hozaganyag kisebb kötészilárdságot eredményezett, ugyanakkor a szívóssági jellemzők nem mutattak jelentős javulást a *matching* hozaganyaghoz képest, ami egyértelműen az alapanyag, ennek megfelelően pedig a hőhatásövezet kiemelkedő jellemzőinek köszönhető.

Disszertációmban egyaránt közöltem kisciklusú fáradásra, nagyciklusú fáradásra és fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési határgörbéket. A kisciklusú fáradás esetén nem állapítható meg egyértelmű különbség a két szilárdsági kategória között, ugyanakkor a

termomechanikusan kezelt acél esetében a rugalmas alakváltozás amplitúdó rendre a nemesített alapanyag és a hegesztett kötések esetében kapott amplitúdó fölött haladt. A vizsgált tartományban az A960M alapanyag esetében a rugalmas alakváltozás a meghatározóbb; nagyobb alakváltozás hatására is a rugalmas viselkedés dominál. A W700Q alapanyag és hegesztett kötéseinek eredményeit megvizsgálva egyértelműen látható a hegesztéstechnológia negatív hatása: a hegesztett kötések elmaradnak az alapanyag esetén kapott értékektől, továbbá a nagyobb szilárdságú, de kisebb alakváltozó képességű hozaganyag egyértelműen negatív hatással van a kisciklusú fáradási jellemzőkre.

Nagyciklusú fáradás esetében, az eredmények alapján, az S700 kategória esetén *overmatching* hozaganyag alkalmazása lehet előnyös azokban az esetekben, amikor a kötést terhelő erő viszonylag kisebb, míg a *matching* hozaganyagot érdemes választani nagyobb terhelő erők esetében. Továbbá, a termomechanikusan kezelt alapanyag esetében itt is megállapítható, hogy a nagyobb szilárdsági kategória nem jelent egyértelműen jobb fáradási ellenállást. Ezen acélok esetében a vonalenergia növelésével, vagyis a kritikus hűlési idő növekedésével arányosan javul a kötések kifáradási határának értéke, azonban ezzel egyidejűleg romlanak a kötések mechanikai jellemzői. Ennek megfelelően, amennyiben a kötésre ható terhelés statikus, kisebb hőbevitelt érdemes előírni, felülről korlátozva a vonalenergia nagyságát, ami a gyártás esetén nagyobb fegyelmet igényel a hegesztő(mérnök) részéről. Abban az esetben viszont, amikor a kötést jellemzően nagyciklusú ismétlődő igénybevétel terheli, a megszokottnál nagyobb hőbevitelt kell előírni, ezzel növelve a kötés kifáradási határát. Szem előtt kell ugyanakkor tartani, hogy a túlzott hőbevitel növelés jelentős szilárdságromlást fog okozni. Éppen ezért ebben az esetben is felülről korlátozni kell a hőbevitel nagyságát a hegesztési paraméterek és a maximális rétegeközi hőmérséklet előírásával.

A fáradásos repedésterjedés körülményeire, mindkét vizsgált alapanyag és hegesztett kötései, illetve mindegyik *mismatch* változat esetére sikerült határgörbét meghatározni. Ezek a határgörbék, konkrét vagy általános alakjukban, használhatók hegesztett szerkezetek integritásának megítélésére, élettartam és/vagy maradó élettartam becslésekre, összehasonlító számítások elvégzésére.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

IDEGEN NYELVŰ

- (1) Dobosy, Á., Gáspár, M., Jámbor P.: Weldability of S960M thermo-mechanically treated advanced high strength steel. YPIC2017 3rd Young Welding Professionals International Conference, Halle (Saale), Németország, 2017. 08. 16-18., pp. 1-6.
- (2) Lukács, J., Dobosy, Á.: Matching effect on fatigue crack growth behaviour of high strength steels GMA welded joints. 70th IIW Annual Assembly and International Conference, Commission XIII Fatigue of welded components and structures, 2017. Június 25-30, Shanghai, Kína, IIW-DOC XIII-2692-17, p. 19
- (3) Dobosy, Á., Gáspár, M., Lukács, J.: High cycle fatigue investigations on high strength steels and their GMA welded joints. Vehicle and Automotive Engineering, Proceedings of the JK2016, Miskolc, Hungary, Springer, 2017, pp. 453-467 (DOI: 10.1007/978-3-319-51189-4_39)
- (4) Dobosy, Á., Lukács, J.: The effect of the filler material choice on the high cycle fatigue resistance of high strength steel welded joints. Materials Science Forum Vol. 885, Trans Tech Publications, 2017, pp. 111-116. (doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.885.111)
- (5) Lukács, J., Dobosy, Á., Gáspár, M.: Fatigue crack propagation limit curves for high strength steels and their welded joints, and the applicability of these curves for ECA calculations, IIW 2016 International Conference, The Total Life Cycle of Welded Components, Melbourne, Australia, 14-15th July 2016. (poszter)
- (6) Dobosy, Á., Lukács, J.: The effect of the welding parameters on the properties of the thermomechanically rolled high strength steels. XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc, 2016. 04. 21-22., D2_3 (ISBN: 978-963-358-113-1)
- (7) Gáspár, M., Dobosy, Á., Lukács, J., Sas, I.: Behaviour of undermatched AHS steel welded joints under static and cyclic loading conditions. 68th IIW Annual Assembly and International Conference, Commission XIII Fatigue of welded components and structures, Helsinki, 2015. Július 02-03, IIW-DOC IIW2015-15/1804, p. 16
- (8) Dobosy, Á., Lukács, J.: Welding properties and fatigue resistance of S690QL high strength steels. Materials Science Forum, Vol. 812., Materials Science, Testing and Informatics VII. 2015, pp. 29-34. (doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.812.29)
- (9) Dobosy, Á., Nagy, Gy., Lukács, J.: Low cycle fatigue resistance of quenched and tempered high strength steels. Production Processes and Systems, Vol. 7. No. 1., Miskolc, 2014. pp. 31-40. (ISSN 1786-7983)

- (10) Dobosy, Á., Lukács, J.: Fatigue resistance of the welded joints of high strength steels. YPIC 2014, Young Welding Professionals International Conference, Budapest, 2014. 09. 17-20., pp. 7-16. (ISBN: 978-963-12-0084-3)
- (11) Dobosy, Á., Nagy, Gy., Lukács, J.: LCF experimennts on different yield strength steels and their welded joints. XXVIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc, 2014. 04. 10-11., D1 (ISBN: 978-963-358-051-6)
- (12) Dobosy, Á., Lukács, J.: Welding and fatigue of quenched and tempered high strength steels. Nemzetközi Mérnöki Szimpózium, International Engineering Symposium at Bánki, Budapest, 2013. 11. 19., CD melléklet
- (13) Dobosy, Á., Gáspár, M.: Welding of quenched and tempered high strength steels with heavy plate thickness. XXVII. microCAD Internatianal Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc, 2013 03. 21., Paper M7 (ISBN: 978 963 358 018)

MAGYAR NYELVŰ

- (14) Dobosy, Á., Gáspár, M.: Nagyszilárdságú acélok hegesztési hozaganyagai. 19. Hegesztési Felelősök Országos Tanácskozása, Hajdúszoboszló, 2017. 09. 14-15. CD melléklet
- (15) Dobosy, Á., Gáspár, M., Lukács, J.: Járműipari nagyszilárdságú acélok és hegesztett kötéseinek fáradási jellemzői. Járműipari Konferencia 2016. Ellenállás-hegesztési szimpózium, Miskolc, 2016. 11. 18-19.
- (16) Dobosy, Á., Gáspár, M.: A termomechanikus és a nemesített nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségének összehasonlítása. 18. Hegesztési Felelősök Országos Tanácskozása, Hajdúszoboszló, 2016. 09. 15-16. CD melléklet
- (17) Dobosy, Á., Lukács, J.: A termomechanikusan hengerelt acélok hegeszthetősége, ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállása. 28. Nemzetközi Hegesztési Konferencia, Dunaújváros, 2016. 05. 26-28. pp. 184-202. Elektronikus kiadvány
- (18) Dobosy, Á., Lukács, J.: A termomechanikus nagyszilárdságú acélok optimális hegesztési munkaablakának meghatározása. GÉP, LXVII. évfolyam, 2016/1-2. pp. 55-62.
- (19) Balogh, A., Dobosy, Á., Frigyik, G., Gáspár, M., Kuzsella, L., Lukács, J., Meilinger, Á., Nagy, Gy., Pósalaky, D., Prém, L., Török, I.: Hegeszthetőség és a hegesztett kötések tulajdonságai. Szerk.: Balogh, A., Lukács, J., Török, I. Monográfia, Miskolci Egyetem, 2015. p. 324, 1.1., 3.3., 3.4., 3.5. fejezet (ISBN 978-963-358-081)
- (20) Dobosy, Á., Lukács, J.: A termomechanikus nagyszilárdságú acélok optimális hegesztési munkaablakának meghatározása. Doktoranduszok Fóruma 2015, Miskolc, 2015. november 18-19.

- (21) Dobosy, Á., Lukács, J.: A hozaganyagválasztás hatása a nagyszilárdságú acélok hegesztett kötéseinek ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállására. X. Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonalmádi, 2015. október 13.
- (22) Dobosy, Á., Lukács, J.: S690QL jelű acélok hegeszthetőségének és fáradással szembeni ellenállásának vizsgálata. Hegesztéstechnika, 2015, XXVI. évfolyam 1. szám, pp. 51-59. ISSN: 1215-8372)
- (23) Dobosy, Á.: Hegesztett kötések ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállásának tanulmányozása. Nemzetközi hegesztő szakmérnöki diplomamunka, témavezető: Dr. Lukács János, 2014.
- (24) Dobosy, Á., Lukács, J.: A hegesztéstechnológia hatása a finomszemcsés nagyszilárdságú szerkezeti acél ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállására. 27. Hegesztési Konferencia, Budapest, 2014. 05. 22-24., pp. 291-305. Elektronikus kiadvány
- (25) Dobosy, Á.: Korszerű nagyszilárdságú acélok tervezési határgörbéinek tanulmányozása. Doktoranduszok Fóruma 2014, Miskolc, 2014. 11. 19.
- (26) Dobosy, Á., Nagy, Gy.: Különböző folyáshatárú acélok és hegesztett kötéseinek kisciklusú fárasztása. XXII. OGÉT Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Nagyszeben, 2014. 04 24-27., pp. 98-101. (ISSN 2068-1267)
- (27) Nagy, Gy., Dobosy, Á., Lukács, J.: Kisciklusú fárasztásnál meghatározott mérőszámok megbízhatósága. GÉP, LXIV. évfolyam, 2013/8., pp. 39-44.
- (28) Dobosy, Á., Lukács, J.: Nemesített nagyszilárdságú acél hegesztése és fárasztása. Nemzetközi Mérnöki Szimpózium, International Engineering Symposium at Bánki, Budapest, 2013. 11. 19.
- (29) Dobosy, Á., Lukács, J.: S690QL nagyszilárdságú acél hegesztett kötéseinek jellemzői, ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállása. IX. Országos Anyagtudományi konferencia, Balatonkenese, 2013. 10. 15. (PO-08)
- (30) Dobosy, Á.: A vonalenergia hatása a nemesített, nagyszilárdságú acél vastaglemezek hegesztett kötéseire. XXXI. Országos Tudományos Diákköri Konferencia, Kecskemét, 2013. 04. 25.
- (31) Dobosy, Á.: Nagyszilárdságú acélok ívhegesztése. MSc diplomamunka, témavezető: Dr. Balogh András, 2013.

6. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOMAK

- [1] Porter, D.: *Weldable high-strength steels: challenges and engineering applications, Portevin lecture, IIW 2015 International Conference on High Strength Steels – Challenges and Applications, Helsinki, Finland, 2-3. July 2015, Paper IIW 2015 0102 13p.*
- [2] Tisza, M.: *Járműipari anyagfejlesztések, GÉP, LXIII. évf. 4. szám, 2012. pp. 3-10.*
- [3] MSZ EN 10025-6+A1:2009: *Melegen hengerelt termékek szerkezeti acélokból 6. rész: Nagy folyáshatárú szerkezeti acélokból készült, nemesített lapos termékek műszaki szállítási feltételei, 2009.*
- [4] MSZ EN 1993-1-9:2011: *Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése, 1-9. rész: Fáradás, 2011.*
- [5] International Institute of Welding: *Recommendations for fatigue design of welded joint and components, IIW-1823-07, 2008.*
- [6] Gremesperger, G.: *A hegesztés jövője és a hazai feladatok. Hegesztéstechnika, XXI. évf. 1. sz., 2010. pp: 19-31.*
- [7] Gáspár, M., Balogh, A.: *Efficient Increase of the Productivity of GMA Welding of AHSS Using Flux Cored Wire, Design, Fabrication and Economy of Metal Structures: International Conference Proceedings, Springer, 2013. pp. 463-468. (ISBN: 978-3-642-36690-1)*
- [8] Gáspár, M.: *Nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hegesztéstechnológiájának fizikai szimulációra alapozott fejlesztése, PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2016. p. 128.*
- [9] Balogh, A., Dobosy, Á., Frigyik, G., Gáspár, M., Kuzsella, L., Lukács, J., Meilinger, Á., Nagy, Gy., Pósalaky, D., Prém, L., Török, I.: *Hegeszthetőség és a hegesztett kötések tulajdonságai: Kutatások járműipari acél és alumíniumötvözet anyagokon, Szerk.: Balogh, A., Lukács, J., Török, I. Miskolc, Miskolci Egyetem, 2015. p. 324. (ISBN:978-963-358-081-3)*
- [10] Lukács, J., Nagy, Gy., Harmati, I., Fótos, R., Koncsik, Zs.: *Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből, Miskolci Egyetem, Miskolc 2012. (ISBN 978-963-358-000-4).*
- [11] Metals Handbook, Volume 19.: *Fatigue and Fracture, USA, ASM International, 1996.*
- [12] Egger, R.: *Thermomechanically rolled heavy plates – Advantages in the high-strength range, presentation, Voestalpine Grobblech GmbH, June 6, 2012.*
- [13] Willms, R.: *High strength steel for steel constructions, Nordic Steel Construction Conference, electronic publication, 2009, pp. 597-604.*
- [14] Chung, J., Kwon, O.: *Development of high performance auto steels at POSCO steels, Proc. of the 9th ICTP Conference, Gyeongju-Korea, September 7-11. 2008. pp. 3-8.*
- [15] Richter, K., Hanus, F., Wolf, P.: *Structural steels of 690 MPa yield strengths – a state of art, High Strength Steel for Hydropower Plants Conference, Graz, 2005.*

- [16] Voestalpine: *High-strength and ultra-high-strength heavy plates, Weight savings combined with excellent weldability*, Voestalpine Alform x-treme tájékoztató, 2014.
- [17] Metals Handbook, Volume 6.: *Welding, Brazing and Soldering*, ASM International, USA, 1995.
- [18] Palotás, B.: *A finom szemcsés acélok hegeszthetősége*, Acélszerkezetek, MAGÉSZ, XII évf. 2. sz., 2015. pp: 59-67.
- [19] Jármái, K.: *Life cycle assessment of welded structures using cost optimization*. 12th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation, Braunschweig, Németország, 2017.06.05 - 2017.06.09. Paper 254. 12 p.
- [20] Pijpers, R. J. M., Kolstein, M. H., Romeijn, A., Bijlaard, F. S. K.: *Fatigue experiments on very high strength steel base material and transverse butt welds*, Advanced Steel Construction, 5. No. 1, 2007. pp. 14-32.
- [21] Möller, B., Wagener, R., Hrabowski, J., Ummenhofer, T., Melz, T.: *Fatigue life of welded high-strength steels under Gaussian loads*, 3rd International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading VAL2015, Procedia Engineering Vol. 101. 2015. pp. 293-301.
- [22] Tóth, L., Marosné, B. M.: *The Physical Content of the Manson-Coffin Relationship*, Conference Proceedings of the EUROMAT TOPICAL 94, 15th Conference on Material Metallurgy; 11th Congress on Materials Testing, Balatonszéplak, 1994.05.30-1994.06.01., pp: 238-242.
- [23] Pedersen, M. M., Mouritsen, O. O., Hansen, M. R., Andersen, J. G., Wenderby, J.: *Re-analysis of fatigue data for welded joints using the notch stress approach*, International Journal of Fatigue, Vol. 32, Issue 10, 2010, pp. 1620-1626.
- [24] Collin, P., Möller, M., Nilsson, M., Törnblom, S.: *Undermatching butt welds in high strength steels*, DOI: 10.2749/222137809796078829, 2009.
- [25] Palotás, B.: *Növelt folyáshatárú mikroötvözött acélok hegeszthetősége*, 3. Magyar Karbantartási Konferencia, Dunaujváros, 2012.11.15-11.16.
- [26] Nakazawa, H., Kodama, S.: *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 – Vol. 2. Eds.: Tanaka, T., Nishijima, S., Ichikawa, M., Elsevier Applied Science and The Society of Materials Science, Japan, 1987. pp. 59-69. (ISBN 1-85166-092-5)
- [27] Czoboly, E., Ginsztler, J., Havas, I.: *Ismeretek a kisciklusú és a termikus fáradásról*, Gép, (36) 1984/7. p. 241-253. (ISSN 0016-8572)
- [28] Hamme, U., Hauser, J., Kern, A., Schriever, U.: *Einsatz hochfester Baustähle im Mobilkranbau*, Stahlbau. 69 (2000) No. 4, pp. 295-305.
- [29] Horváthné, V. Á., Lukács, J.: *Furatokkal könnyített CT próbatestek vizsgálata*, XI. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc, 2011.08.29-08.31., pp: 37-39. (ISBN:978-963-661-975-6)
- [30] WES 2805-1997: *Method of Assessment for Defects in Fusion Welded Joints with Respect to Brittle Fracture*, Japán, 1997.