

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**NEMESÍTETT NAGYSZILÁRDSÁGÚ SZERKEZETI ACÉLOK
HEGESZTÉSTECHNOLÓGIÁJÁNAK FIZIKAI SZIMULÁCIÓRA
ALAPOZOTT FEJLESZTÉSE**

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

GÁSPÁR MARCELL GYULA

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK, OKLEVELES KÖZGAZDÁSZ,
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. BALOGH ANDRÁS

PHD, EGYETEMI DOCENS

Miskolc

2016

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

- elnök: **Prof. Dr. Tisza Miklós**
DSc, egyetemi tanár (ME)
- titkár: **Dr. Marosné Dr. Berkes Mária**
PhD, egyetemi docens (ME)
- tagok: **Prof. Dr. Jármai Károly**
DSc, egyetemi tanár (ME)
- Dr. Gremesperger Géza**
CSc, főiskolai tanár (DUE)
- Dr. Szabó Péter**
PhD, műszaki igazgató (Quality Pack ZRt.)

HIVATALOS BÍRÁLÓK

- Lenkeyné Dr. Bíró Gyöngyvér**
CSc, divízió igazgató (Bay Zoltán Közhasznú Nonprofit Kft., Mérnöki Divízió)
- Dr. Palotás Béla**
CSc, főiskolai tanár (DUE)

1. BEVEZETÉS

1.1 ELŐZMÉNYEK

A hozzáférhetőség, a komplex tulajdonságok és nem utolsósorban az árviszonyok alapján a 21. század elején az ipari felhasználásban a fémcsoporton belül a vasötvözetek továbbra is megőrizték vezető szerepüket. A vas a földkéregben jelentős mennyiségben fordul elő, előállítási technológiája a többi fémhez képest egyszerűbben, energiatakarékosabban és kisebb CO₂ kibocsátással végezhető el, továbbá egyszerűen újrahasznosítható. Mechanikai, fizikai és kémiai ellenállása viszonylag tág határok között változtatható, ebből adódóan a felhasználói tulajdonság figyelembevételével az adott célra és feladatra megfelelő tulajdonságú acélt lehet előállítani. Egy adott fém felhasználását az előállítási ára jelentősen befolyásolja. Statisztikai adatok igazolják, hogy jó közelítéssel a felhasználni kívánt fém egységárának tízszeres növekedése, százszoros csökkenést eredményez a felhasználásban [1].

Az elmúlt évtizedekben a hegesztett szerkezetek acéljai jelentős fejlődésen mentek keresztül. A fejlődés irányát elsősorban a szilárdság, azon belül is elsősorban a folyáshatár növelése szabta meg [2]. A nagyszilárdságú acélok felhasználásával elérhető kisebb szelvényméreteknek köszönhetően a jármű fogyasztása csökken, ezáltal kevesebb üzemanyagra van szükség, ami kisebb károsanyag-kibocsátást és kedvezőbb üzemeltetési költségeket eredményez. További előnyként jelentkezik, hogy a kisebb szelvényméreteknek köszönhetően kevesebb alapanyagra, hegesztési szempontból pedig kevesebb hozaganyagra van szükség [3], amely tovább csökkenti egy adott termék előállításának CO₂ lábnyomát [1]. A járműiparban a fogyasztáscsökkenés mellett a nagyszilárdságú acélok alkalmazása előnyt jelenthet mobil autódaruk esetén a nagyobb emelési magasság elérésében, illetve mezőgazdasági gépek esetén a kisebb sajáttömegnek köszönhető csökkent talajterhelés (roncsolódás) esetén is [4]. Ráadásul a nagyszilárdságú acélok alkalmazása nemcsak a járműipar területén nyújt vonzó megoldást a tervezőmérnökök számára, hanem olyan gyártmányok esetén is, amelyeknél fontos, hogy a szerkezet minél karcsúbb megjelenéssel rendelkezzen (például épületek, hidak) [5].

A nagyszilárdságú acélból készült szerkezetekben leggyakrabban alkalmazott kötéstechológia a hegesztés, azon belül is az ömlesztő hegesztés. Az alapvető probléma abból adódik, hogy az acélgyártók által gondosan előállított mikroszerkezetet a hegesztés hőciklusa irreverzibilisen megváltoztatja, amelyet a hegesztést követően egyáltalán nem, vagy csak korlátozottan lehet visszaállítani. Ennek eredményeként a varratban és a hőhatásövezetben repedések jelenhetnek meg, valamint a hegesztésből származó hőbevitel következményekén a hegesztett kötésben az alapanyag mechanikai tulajdonságaihoz képest jelentős mértékű szívóosság- és szilárdságcsökkenés alakulhat ki. Ezért a korszerű

nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez olyan hegesztéstechnológiát kell kidolgozni, amely a mikroszerkezetben a lehető legkisebb mértékű kedvezőtlen változást okozza.

Az ipari gyakorlatban egyre szélesebb körben alkalmazott nagyszilárdságú acélok fáradási tulajdonságairól jelenleg még hiányosak az ismereteink. A nagy szilárdságból származó előnyök statikus húzóterhelés esetén lényegében maximálisan kihasználhatók, azonban a helyzet már nem ennyire egyértelmű stabilitásvesztés (kihajlás, horpadás vagy kifordulás), illetve ismétlődő igénybevétel esetén. Az elmúlt években számos projekt [6] foglalkozott a nagyszilárdságú szerkezeti acélok fáradásával, amelyek eredményei további kutató munkára adnak okot.

1.2 CÉLKITŰZÉSEK

A kutatómunka során a hegesztett szerkezetekben alkalmazott legnagyobb szilárdsági kategóriát jelentő, nemesített nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségével foglalkoztam, amelyek közül az MSZ EN 10025-6 szabvány szerinti S960QL szilárdsági kategóriájú acél hegesztési tulajdonságainak részletes elemzését tűztem ki célul. A hegesztéstechnológia fejlesztésekor két területre: a hozaganyag-választás szerepének kérdéskörére és a hegesztési paraméterablak biztonságos meghatározására kívántam összpontosítani.

- Ebből adódóan a kutatómunka elején célként fogalmaztam meg hegesztési kísérletek és a hozzájuk kapcsolódó anyagvizsgálatok elvégzésével a hozaganyag-választás kérdéskörének elemzését.
- A hozaganyag-választás területét, tekintettel a hegesztett szerkezetek károsodási okai között szereplő fáradásra, különböző szilárdságú és alakváltozó képességű hozaganyagok felhasználásával elvégzett hegesztési kísérletek és a hozzájuk kapcsolódó fásasztó vizsgálatokon keresztül kívántam elemezni.

A fizikai szimuláció a hagyományos módszerekhez képest lehetővé teszi a hegesztési paraméterablaknak a hőhatásövezet tulajdonságain alapuló, a helyi szintű szívósságcsökkenést kompenzáló tudatos tervezését.

- A kutatómunka célja, a vizsgálat tárgyát képező acél ömlesztő hegesztési paraméterablakának vizsgálata, a hőhatásövezetben bekövetkező mikroszerkezeti változások és a még elfogadható mértékű szívósságcsökkenés alapján.
- A disszertációm egyik fontos feladatákként fogalmaztam meg a hegesztéstechnológiára irányuló olyan elvek és iránymutatások kidolgozását, amelyekkel a hőhatásövezetben bekövetkező helyi szintű szívósságcsökkenés hatása mérsékelhető, illetve kompenzálható.
- Tekintettel arra, hogy a fizikai szimulációs próbatesten a berendezéssel elérhető hűtési sebesség nagyban függ a próbatest geometriájától, ezért a kutatómunka célja olyan próbatest kifejlesztése, amellyel a teljes ömlesztő hegesztési paramétertartományban, így az extrém rövid hűlési idők esetén létrejövő hőhatásövezet szívóssága is vizsgálható.

2. A FELADAT MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

Az *elméleti kutatómunka* során kiemelten foglalkoztam a nemesített nagyszilárdságú acélokból alkalmazott szilárdságnövelési módszerekkel [7][8]. Tekintettel arra, hogy ezeket az acélokat a kétciklusú hőkezelés első szakaszában a meleghengerlést követően edzik, ezért részletesen bemutattam a martensites átalakulás jellemzőit, különösen a kis karbontartalmú acéloknál kialakuló tűs martensit tulajdonságaira. Ezeknél az acéloknál a fő szilárdságnövelő mechanizmus elsősorban a finom tűs, illetve méhsejtszerű martensit szerkezetből és a diszlokáció-sűrűségből adódik, kevésbé az oldott állapotban lévő karbontól [7]. Az edzést követő nagy hőmérsékletű megeresztés hatására a rácsfeszültségek csökkennek, a diszlokációk rendeződnek és a szövetszerkezet az egyensúlyi állapot irányába változik [8]. A nemesített nagyszilárdságú acéloknál alkalmazott karbidképző ötvözők (például Mo, Cr) javítják a megeresztés-állóságot, amelynek köszönhetően ezek az acélok a hőkezelést követően is kimagasló szilárdsági jellemzőkkel rendelkeznek.

A hagyományos acélokhöz képest a nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok fokozott ridegedési hajlamát az egyhez közeli folyáshatár/szakítószilárdság arány jelzi. Ehhez társul, hogy a nagyszilárdságú acélokból a kisméretű rideg fázisok – karbidok, martensit szigetecskék vagy esetenként zárványok – hasadásos töréshez vezethetnek [1]. Az ilyen rideg fázisok eredete visszavezethető az acélgyártási folyamatra, illetve helyi törékeny zónák a hegesztési hőbevitel hatására is kialakulhatnak [9]. A hegesztés hőciklusa a nem-egyensúlyi szövetszerkezetet irreverzibilisen megváltoztatja, amelynek eredményeként a hőhatásövezetben szilárdság- és szívósságcsökkenés következik be [3]. A gondatlan hegesztéstechnológia és a viszonylag nagy karbon egyenértékkel rendelkező alap- és hozaganyag következményeként hidegrepedések jelenhetnek meg a varratban és a hőhatásövezetben, amelynek megelőzése fokozott körültekintést igényel [10]. Ebből következően a nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztése a kis- és közepes szilárdságúakhoz képest nem csak nagyobb gondosságot, de új szemléletmódot is igényel.

A vizsgálandó acélcsoport hegesztésével kapcsolatos nehézségek miatt részletesen foglalkoztam a hegesztéstechnológia tervezésének szempontjaival. Ennek keretében ismerttettem a nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez alkalmazható előmelegítési hőmérséklet meghatározási módszereket [11] és a hegesztéstechnológia $t_{8,5/5}$ hűlési időn alapuló tervezésének koncepcióját [12]. Fokozott figyelmet fordítottam a hozaganyagválasztás kérdéskörének átfogó ismertetésére. A nemesített nagyszilárdságú acéloknál az alapvető nehézséget az jelenti, hogy az alapanyag és a hozaganyag adott hegesztő eljárásra jellemző keveredési arányának megfelelően kialakuló varrat esetén az alapanyag gyártástechnológiájára jellemző mechanikai és hőkezelési folyamatokat nem lehet reprodukálni, a kimagasló szilárdsági jellemzők megvalósításának egyedüli lehetőségeként az ötvözés áll fenn. Ebből adódóan ezeknél az acéloknál a hozaganyagok vegyi összetétele az alapanyagétól jelentősen különbözik. A *matching* kifejezés az alapanyag és a varrat különféle tulajdonságainak, elsősorban szilárdsági jellemzőinek (főként folyáshatár, szakítószilárdság)

megfelelését, közeli azonosságát jelenti. Lehetnek olyan helyzetek [13][14], amikor az *undermatching* (azaz kisebb szilárdságú, de nagyobb alakváltozóképeségű) varrat esetén a hegesztett kötés a gyártásból adódó repedésképződésnek és a többnyire nem statikus jellegű üzemi terhelésnek képes jobban ellenállni. Továbbá, a kisebb szilárdságú varrat nagyobb alakváltozó képessége és a kisebb maradó feszültség csökkenti a réteges tépődés veszélyét [15]. A teljes kötés szilárdsági és törési viselkedése szempontjából a hőhatásövezetben végbemenő kilágyulás (a varrat szilárdságával együtt) meghatározó lehet, amit a szerkezetintegritási számításoknál figyelembe kell venni [1].

A *kísérleti kutatómunkám* alapvetően két részre osztható. Az egyik részben a Weldox 960 E (S960QL) acélból készült hegesztett kötések ismétlődő igénybevétellel szembeni ellenállását, illetve a hozaganyag szilárdsági és alakváltozási jellemzőinek hatását vizsgáltam. A kísérleti munka másik részében a hegesztési paraméterek hőhatásövezetre gyakorolt hatását fizikai szimulációval elemeztem.

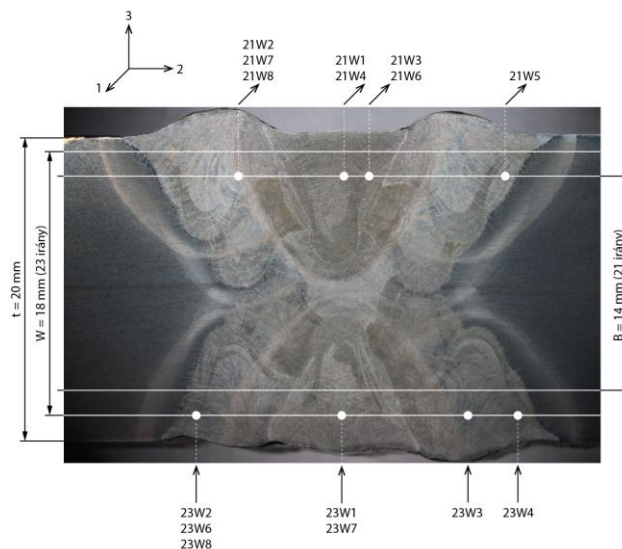
A védőgázos fogyóelektródás ívhegesztéssel elvégzett hegesztési kísérletek során Union X96 jelölésű *matching* és OK Tubrod 14.03 típusú *undermatching* huzalelektrodát alkalmaztam. A hegesztési kísérletek során a hegesztési paramétereket folyamatfelügyelő rendszer segítségével rögzítettem. A $t_{8,5/5} = 5-10$ s hűlési időtartományban és a szükséges előmelegítéssel készült hegesztett kötések statikus teherviselő-képességét az alapvetően alakíthatósági vizsgálatokhoz alkalmazott optikai alakváltozásmérő rendszerrel követett szakítóvizsgálattal elemeztem [16]. Az *undermatching* kötés esetén az alakváltozás a varratra koncentrált, ebből adódóan a maximális erőnél a varratban mért valódi nyúlás mértéke a *matching* kötéshez képest nagyobb volt.

A hegesztett kötések kisciklusú ($N \leq 10^4$) fáradással szembeni ellenállásának meghatározásához teljes alakváltozás amplitúdójú vizsgálatokat [17] alkalmaztunk, $R = -1$ aszimmetria tényező és háromszög alakú terhelési függvény mellett. Tönkremeneteli kritériumnak a húzó oldali maximális erő 10%-os csökkenését állítottuk be. Az *undermatching* kötés rugalmas nyúlás amplitúdója a vizsgált tartományban a *matching* kötés és az alapanyag értéke alatt maradt. A képlékeny nyúlás amplitúdó viszont a kisebb ciklusszámok ($N_t \leq 1000$) esetén meghaladta az alapanyag és a *matching* hegesztett kötés vizsgálata során mért értékeket. A vizsgálatokat követően a próbatesteken a repedések megjelenésének helyét elemeztem.

A hegesztett kötések elvégzett nagyciklusú fárasztóvizsgálatok ($N > 10^4$) során a vizsgálat tervezésekor és értékelésekor a tervezési határgörbék meghatározásához szükséges nagy próbatest szám, és hosszú vizsgálati időtartamra való tekintettel az ún. lépcsős módszert (staircase method) [18] alkalmaztuk. A vezérlési mód állandó terhelésamplitúdójú, a terhelési aszimmetria tényező pedig a teljes vizsgálat sorozatban állandó értékű, $R = 0,1$ volt. A vizsgálatokat szinuszos alakú terhelési függvénnyel végeztük. Fontos eredménynek tekintem, hogy az acél *undermatching* kötésének nagyciklusú fáradással szembeni ellenállása meghaladta a *matching* kötés ellenállását, azaz az *undermatching* elven történő hozaganyag-

választás nem volt káros hatással a hegesztett kötés nagyciklusú fáradással szembeni ellenállására.

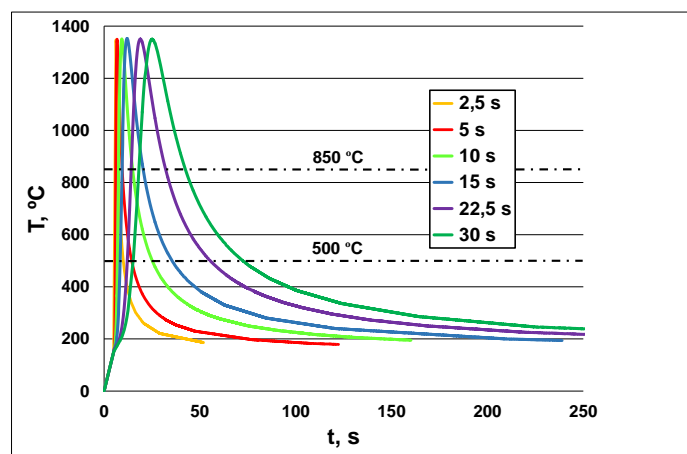
A nemesített nagyszilárdságú acélból készült, *matching* típusú hegesztett kötés különböző részeinek (varrat, hőhatásövezet, alapanyag) repedésterjedéssel szembeni ellenállásának vizsgálatára fáradásos repedésterjedési sebességvizsgálatokat [17] végeztünk. A hegesztett kötés egyes részeinek jellemzése, illetve a statisztikus megközelítés érdekében a bemetszések helyeit, két orientációban, a hegesztett kötés középvonalához képest változtattuk. A vizsgálatoknál $R = 0,1$ aszimmetria tényezőt és szinusz alakú terhelési függvényt alkalmaztunk, a terjedő repedést pedig optikai úton követtük. A vizsgálatok során meghatározott kinetikai diagramok első, a kis repedésterjedési sebességekhez tartozó részei jól mutatták a kötés eltérő helyeiről induló repedések közötti különbségeket. A varratban és a hőhatásövezet kritikus részein bemetszett próbatestek esetén a repedések terjedése viszonylag nagy sebességgel indult meg, a néhány milliméteres méret elérését követően a kezdeti különbségek kiegyenlítődtek.



1. ábra. A bemetszések elhelyezése a fáradásos repedésterjedési sebességvizsgálatoknál

Az anyagtechnológiai eljárások fizikai szimulációja olyan laboratóriumi körülmények között végzett vizsgálatokat jelent, amelyek során pontosan reprodukálják azokat a termikus és mechanikus folyamatokat, amelyek a valós műveletek során érik az adott anyagot. A fizikai szimuláció egy lehetséges definíciója a következő: a fizikai szimuláció nem más, mint a tényleges és a lehetséges ipari folyamatok megvalósítása, a valósággal egyező időléptékben és a valóságot megközelítő geometriai (térfogati) léptékben [17][19]. A nemesített nagyszilárdságú acélok nem-egyensúlyi szövetszerkezetét a hegesztés hőciklusa irreverzibilisen megváltoztatja, a hegesztési folyamat eredményeként pedig egy inhomogén mikroszerkezettel és mechanikai tulajdonságokkal rendelkező hőhatásövezet alakul ki. A hőhatásövezetben létrejövő sávok a valós hegesztett kötésben, csekély kiterjedésük miatt, csak korlátozottan vizsgálhatók. A fizikai szimuláció segítségével viszont az alapanyagból

kimunkált próbatesteken a hőhatásövezet különböző részei, a későbbi anyagvizsgálatoknak kedvező mérettartományban, precízen előállíthatók [20]. A hőhatásövezet különböző sávjaiban végbemenő hőfolyamatokat hegesztési hőciklus modellek segítségével lehet leírni. A hegesztési hőciklus matematikai leírásához a hővezetés differenciálegyenletének hegesztésre alkalmazható megoldására van szükség. A hőciklusok előállításához a *Rykalin-3D* modellt [21] alkalmaztam, amely egy vastag lemezen végigmenő, lassan mozgó, pontszerű hőforrás által létrehozott hőmérsékletmezőt ír le. Ebben a nagytest-modellben a hővezetés domináns szerepe miatt a felületi hőátadás elhanyagolható, ebből adódóan a modellt leíró összefüggés független a lemezvastagságtól, így kevesebb változó bonyolítja az eredmények értékelését és felhasználhatóságát [22]. A fizikai szimulációs kísérletsorozat tervezésekor, a finnországi Oulu-i Egyetemmel való együttműködésben, a *JMatPro* program segítségével meghatároztam a vizsgálandó Weldox 960 E hőfizikai jellemzőit, amelyek átlagértékének megadásával a szívósság szempontjából kritikusnak tekintett hőhatásövezeti sávok hőciklusa előállítható. Abból a megfontolásból, hogy a nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok ömlesztő hegesztésére jellemző teljes technológiai skálát meg tudjam vizsgálni, a hegesztési paraméterek hatásának elemzéséhez összesen hét ($t_{8,5/5} = 2,5$ s; 5 s; 10 s; 15 s; 22,5 s; 30 s és 100 s) hűlési időt választottam ki. A hőhatásövezet szívósságának vizsgálatát célzó hagyományos vizsgálati összeállítás és próbatest kialakítás (10x10x70 mm hasáb) mellett az elérhető legrövidebb hűlési időt ($t_{8,5/5} \approx 5$ s) előállító hűtési sebesség 60 °C/s, miközben a kis vonalenergiájú hegesztéseknél (például robotizált nagy hegesztési sebességű VFI, gyöksor hegesztése előmelegítés nélkül, lézersugaras hegesztés) a hűtési sebesség ezt az értéket jelentősen meghaladja. Ebből a megfontolásból az ütővizsgálatokhoz használt fizikai szimulációs próbatest geometriájának célirányos módosításával olyan külső hűtésű fizikai szimulációs próbatestet terveztem, amellyel a 2,5 s hűlési idő is elérhető. A durvaszemcsés, az interkritikus és az interkritikusan megeresztett durvaszemcsés sávokhoz tartozó csúcshőmérsékleteket, az austenitációs diagram, irodalmi adatok [23][24], illetve előkísérletek segítségével határoztam meg. A durvaszemcsés sáv előállítását célzó hőciklusokat a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. A durvaszemcsés hőhatásövezeti sáv szimulációs hőciklusai

A sikeresen előállított hőhatásövezeti sávok tulajdonságait optikai- és elektronmikroszkópos vizsgálattal, makro- és mikrokeménység vizsgálattal, illetve műszerezett ütővizsgálattal elemeztem. A hagyományos ütővizsgálathoz képest, amelynél a törésre fordított energiát, az ütőmunkát határozzák meg, a műszerezett ütővizsgálattal lehetőségünk van arra, hogy az anyagok viselkedéséről és a törési folyamatról további információkat szerezhessünk. A Charpy V-bemetszésű próbatesteken végzett műszerezett ütővizsgálat közben regisztrált erő-idő vagy számított erő-behajlás diagram alapján lehetőség van a törési folyamat jellegzetes pontjainak kijelölésére (a képlékeny alakváltozás kezdete, maximális erő, instabil repedésterjedés kezdete, instabil repedésterjedés vége). Ezzel összefüggésben a diagram alapján a repedésindulásra és repedésterjesztésre fordított energiák szétválaszthatók. A repedésindulásra fordított energia arányának csökkenése azt jelenti, hogy a stabil repedésterjedésre arányaiban több energia nyelődik el, ami a szívósság növekedését eredményezi [25].

A műszerezett ütővizsgálati eredmények értékelését követően megállapítottam, hogy az ömlesztő hegesztésre (elsősorban ívhegesztésekre) jellemző hegesztési paraméter-tartományban minden vizsgált hőhatásövezeti sáv az alapanyagétól jelentősen kisebb ütőmunkával rendelkezik. A vizsgált hőhatásövezeti sávok esetében a szívósság szempontjából, a lokális jelleggel előforduló, interkritikusan megeresztett durvaszemcsés sáv bizonyult a legveszélyesebbnek. Érdemes megjegyezni, hogy a nemesített nagyszilárdságú acéloknál az interkritikus sáv összességében a durvaszemcsés sávnál kisebb ütőmunkával rendelkezik, tehát a szívósságcsökkenés szempontjából legalább olyan veszélyesnek tekinthető, mint a durvaszemcsés sáv.

A fizikai szimulátor segítségével a hőhatásövezet helyi szintű utóhőkezelésének hatását is megvizsgáltam. A durvaszemcsés sáv megeresztésének eredményeként a megeresztett martensit ütőmunkája a nagyméretű szemcseszerkezet ellenére a kétszeresére, az interkritikus sáv esetén pedig a háromszorosára növekedett. A helyi szinten előforduló, interkritikusan megeresztett durvaszemcsés sáv esetén a javulás szintén jelentős mértékű. A szívósság javulását a repedésindulásra fordított energiák arányának csökkenése is igazolta.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- T1. Az ütővizsgálatokhoz használt fizikai szimulációs próbatest geometriájának célirányos módosításával olyan külső hűtésű fizikai szimulációs próbatestet fejlesztettem, amellyel a $t_{8,5/5} = 5$ s-nál rövidebb hűlési idejű hőhatásövezeti sávok szívóssága megbízhatóan vizsgálható (20)(23).
- T2. Fizikai szimulációs alapú és valós hegesztési kísérletekkel bizonyítottam, hogy a nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hegesztéséhez, a hőhatásövezetben bekövetkező jelentős szívósságcsökkenés miatt, a kritikus $t_{8,5/5}$ hűlésidő szűk, 5-10 s tartományának betartása szükséges. A hűlési idő intervallumának alsó határértéke a megengedettnél nagyobb keményedés elkerülését célozza, a felső határértéke pedig biztosítja, hogy az egyensúlytól távol eső, termikusan instabil szövetszerkezet változása a hőhatásövezet kritikus sávjaiban egy elfogadható mértéket ne haladjon meg (4)(13)(21)(25)(27).
- T3. Az elvégzett fizikai szimulációs kísérletek és anyagvizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hőhatásövezetének szívóssága szempontjából egyrétegű hegesztésnél a durvaszemcsés sáv és az interkritikus sáv, többrétegű hegesztésnél az interkritikusan megeresztett durvaszemcsés sáv (mikro)szerkezete egyaránt meghatározó. A többrétegű varratos kötésekben a hőhatásövezet legridegebb része az interkritikusan megeresztett durvaszemcsés sáv, amelynek a kötés szívósságára gyakorolt kedvezőtlen hatását a kötéskialakítás és a hegesztéstechnológia tudatos tervezésével csökkenteni szükséges (4)(21)(25)(27).
- T4. Műszerezett ütővizsgálatokkal megállapítottam, hogy a nemesített nagyszilárdságú acélok hőhatásövezeti sávjaiban bekövetkező helyi szintű, kritikus mértékű szívósságcsökkenést nem lehet elkerülni, és mértékét a $t_{8,5/5}$ hűlési idővel érdemben nem lehet befolyásolni. A hűlési idő hatása elsősorban a kritikus hőhatásövezeti sávok szélesség irányú kiterjedésének változásában jelenik meg (4)(21).
- T5. Kísérleti úton bizonyítottam, hogy a nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hőhatásövezetének szívóssága helyi hőbevitelű, jól szabályozható és ellenőrizhető utókezeléssel – a durvaszemcsés, az interkritikus és az interkritikusan megeresztett durvaszemcsés sáv esetében egyaránt – jelentősen javítható (3).

4. A HASZNOSÍTÁS ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

Napjainkban a hegesztőmérnökök ismerete a nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségéről még meglehetősen hiányos. Ezen acélok hegesztéséhez gyakorlati útmutatók, tanácsok már sok esetben elérhetők, azonban a hegesztési hőbevitel okozta hatásokról és ezen acélokból készült hegesztett kötések dinamikus és ismétlődő igénybevétel közbeni viselkedéséről elegendő információ jelenleg még nem áll rendelkezésre. Éppen ezért jelen disszertáció célja olyan ismeretek összefoglalása, amely az ipari szakemberek számára is hasznos információkat szolgáltat.

Az *undermatching* hozaganyagok hatását vizsgáló kísérleti eredmények hasznos információul szolgálnak a hozaganyag-fejlesztők, továbbá a hegesztett szerkezeteket tervező mérnökök számára. A nemesített nagyszilárdságú acélból készült hegesztett kötésekben kimunkált próbatesteken elvégzett kisciklusú és nagyciklusú fárasztóvizsgálatok, valamint a fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei felhasználhatók a nemesített nagyszilárdságú acélból készült hegesztett szerkezetek tervezéséhez. A nemesített nagyszilárdságú acélokban lévő lehetőségek teljes mértékű kiaknázásához, a technológia fejlesztése mellett, a tervezésben is szemléletváltásra van szükség [26].

A fizikai szimulációs vizsgálatokhoz kapcsolódóan érdemes kitérni arra, hogy az elvégzett műszerezett ütővizsgálatok során a -40 °C -on megkövetelt 27 J ütőmunkát jóval meghaladó próbatestek is jellemzően ridegen viselkedtek. Az ütővizsgálat során elnyelt energia repedésindulásra fordított aránya ezen próbatestek esetén is, a kisebb szívósságúakhoz hasonlóan, $80\text{-}90\%$ körül volt. Ebből következően érdemes kritikusan végiggondolni, hogy a 27 J -os követelmény mennyire biztosítja negatív hőmérsékleten egy nagyszilárdságú acélból készült hegesztett szerkezet dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállását és üzembiztos viselkedését. A szimulált hőhatásövezeti sávokon elvégzett ütővizsgálati eredmények arra is rávilágítottak, hogy nemesített nagyszilárdságú acélok esetén a hegesztőmérnököknek a vonalenergia felülről történő korlátozását és a teljes hegesztési folyamat minőségfelügyeletét kell előtérbe helyezniük.

Az értekezésben bemutatott eredmények a hegesztéssel foglalkozó szakemberek mellett az acélfejlesztéssel foglalkozó anyagmérnökök számára is fontos információkkal szolgálnak. A vizsgált nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acél szövetszerkezetében a hegesztési hőciklus hatására, a jelenleg alkalmazott ötvözők mellett is bekövetkező, kedvezőtlen mikroszerkezeti változások, és az ezekből adódó mechanikai tulajdonságromlás részletes ismerete alapot jelenthet olyan, új típusú acélok kifejlesztéséhez, amelyek a gyártástechnológia vagy az ötvözők megváltoztatásával a hegesztési hőbevitelre kevésbé érzékenyek. A fizikai szimulátorral elvégzett kísérletsorozat, különösen a hegesztési hőciklusok szimulációjánál alkalmazott módszer és a hőhatásövezeti sávok tulajdonságaira rámutató anyagvizsgálatok, más korszerű nagyszilárdságú acél hegeszthetőségének elemzésére is alkalmazhatók. A fizikai

szimuláció a nemesített nagyszilárdságú acélok folyáshatárát napjainkban már megközelítő, az alapanyag szabványokban jelenleg még nem is szereplő, új fejlesztésű nagyszilárdságú acélok (például S960M) hegeszthetőségének vizsgálatára is lehetőséget teremt. Ezen acélok a *Graville diagram* [27] alapján, kisebb hidegrepedési hajlamuknak köszönhetően, rendkívül ígéretesnek bizonyulnak. A kutatómunka során kifejlesztett, rövid $t_{8,5/5}$ hűlési időkhöz tartozó hőhatásövezeti sávok szívósságának meghatározására szolgáló fizikai szimulációs próbatest geometria alkalmazható más típusú acélok vizsgálatához, továbbá a nagy energiasűrűségű, ebből adódóan kis vonalenergiát eredményező hegesztő eljárások (például lézersugaras hegesztés) szövetszerkezetre gyakorolt hatásának elemzésére.

Ismert tény, hogy a hegesztett szerkezetekben a varrat-alapanyag átmenet ismétlődő igénybevétel esetén feszültséggyűjtő helyként, döntő szerepet tölt be a repedéskeletkezésben. Ezért a kutatás egy lehetséges folytatásaként érdemes megvizsgálni, hogy az utókezelés alkalmazása a szívósság növelése mellett mennyiben járul hozzá a maradó feszültség csökkentéséhez és a fáradási tulajdonságok javításához.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

IDEGEN NYELVŰ

- (1) Lukács, J., Dobosy, Á., Gáspár, M.: *Fatigue crack propagation limit curves for high strength steels and their welded joints, and their applicability of these curves for ECA calculations*, IIW 2016 International Conference, The Total Life Cycle of Welded Components, Melbourne, Australia, 14-15th July 2016. (megjelenés alatt)
- (2) Dobosy, Á., Gáspár, M., Nagy, Gy.: *The mismatch effect on LCF resistance of Q+T high strength steels and their welded joints*, 8th International Conference on Low Cycle Fatigue, DVM, Dresden, Germany, 27-29. June 2017. (megjelenés alatt)
- (3) Gáspár, M., Balogh, A.: *Effect of postweld heat treatment on HAZ toughness of Q+T high strength steels*, XXXth microCAD International Scientific Conference, University of Miskolc, Miskolc, Hungary, 21-22. April 2016. D2_5 8p.
- (4) Gáspár, M., Balogh, A., Sas, I.: *Physical simulation aided process optimisation aimed sufficient HAZ toughness for quenched and tempered AHSS*, IIW 2015 International Conference on High Strength Steels - Challenges and Applications, Helsinki, Finland, 2-3. July 2015, Paper IIW 2015 1504 7p.
- (5) Gáspár, M., Dobosy, Á., Lukács, J., Sas, I.: *Behaviour of undermatched AHS steel welded joints under static and cyclic loading conditions*, IIW 2015 International Conference on High Strength Steels - Challenges and Applications, Helsinki, Finland, 2-3. July 2015, Paper IIW 2015 1801 8p.
- (6) Lukács, J., Kuzsella, L., Koncsik, Zs., Gáspár, M., Meilinger, Á.: *Role of the Physical Simulation for the Estimation of the Weldability of High Strength Steels and Aluminium Alloys*, Materials Science Forum, Vol. 812., 2015. pp. 149-154, DOI: 10.4028.
- (7) Gáspár, M.: *Application of instrumented Charpy V-notch impact test for the investigation of simulated HAZ*, Young welding Professionals International Conference (YPIC), Budapest, Hungary, 7-8 October 2015.
- (8) Gáspár, M., Balogh, A.: *The effect of $t_{8,5/5}$ cooling time on the critical HAZ areas of high strength steel welded joints*, International Engineering Symposium at Bánki (IESB), 20th November 2014.
- (9) Gáspár, M.: *The analysis of HAZ of high strength steel welded joint by physical simulation*, Young welding Professionals International Conference (YPIC), Budapest, Hungary, 17-20. September 2014.

- (10) Gáspár, M., Balogh, A.: *Behaviour of mismatch welded joints when undermatching filler metal is used*, Journal of Production Processes and Systems, Vol. 7 No. 1, 2014. pp. 63-76.
- (11) Gáspár, M., Lukács, J.: *Fatigue crack growth resistance of S960QL high strength steel and its GMAW welded joints*, Journal of Production Processes and Systems, University of Miskolc, Vol. 7 No. 1, 2014. pp. 41-52.
- (12) Lukács, J., Gáspár, M.: *Fatigue Crack Propagation Limit Curves for High Strength Steels and their Application for Engineering Critical Assessment Calculations*, Advanced Materials Research, Vol. 891-892., 11th International Fatigue Congress, Melbourne, Australia, 2-7 March 2014. DOI 10.4028.
- (13) Gáspár, M., Balogh, A.: *GMAW experiments for advanced (Q+T) high strength steels*, Journal of Production Processes and Systems, University of Miskolc, Vol. 6 No. 1, 2013. pp. 9-24.
- (14) Gáspár, M., Balogh, A.: *Structural inhomogeneities in the heat affected zones of (Q+T) high strength steel joints*, XXVIIth microCAD International Scientific Conference, University of Miskolc, Miskolc, Hungary, 21-22. March 2013., Paper M3. (ISBN 978-963-358-018-9)
- (15) 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, Springer, Miskolc, 24-26. April 2013, pp. 463-468.
- (16) Gáspár, M., Balogh, A.: *Experimental investigation on the effect of controlled linear energy applied to the welding of high strength steels*, XXVIth microCAD International Scientific Conference, University of Miskolc, Miskolc, Hungary, 29-30. March 2012., Paper M3. (ISBN 978-963-661-773-8)
- (17) Gáspár, M., Balogh, A.: *Effect of weld build-up on high strength steel joints*, 8th International Conference of PhD Students, Miskolc, Hungary, 6-10. August 2012, Paper D7.
- (18) Balogh, A., Török, I., Gáspár, M., Juhász, D.: *Present State and Future of Advanced High Strength Steels*, Production Processes and Systems, Vol. 5 No. 1., 2012. pp. 79-90.
- (19) Gáspár, M., Illés, B.: *High Strength Steels in Mobile Cranes*, 4th International Doctoral Students Workshop on Logistics, Otto von Guericke University, Magdeburg, Germany, 28 June 2011, pp. 103-108.

MAGYAR NYELVŰ

- (20) M Gáspár, M., Balogh, A.: *Gleeble próbatest fejlesztése a szimulált hőhatásövezet szívósságának vizsgálatához*, GÉP, 67. évf. 1-2. sz., 2016. pp. 19-22.

- (21) Gáspár, M., Balogh, A.: *Fizikai szimulátorral előállított S960QL hőhatásövezeti sávok szívósságának elemzése műszerezett ütővizsgálatok segítségével*, Hegesztéstechnika, XXVI. évf. 4. sz., 2015. pp. 51-64.
- (22) Balogh, A., Dobosy, Á., Frigyk, 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*, Miskolci Egyetem, 2015. 324 p. (ISBN 978-963-358-081-3)
- (23) Gáspár, M.: *Próbatest fejlesztése kis fajlagos hőbevitellel készült hegesztett kötések hőhatásövezetének fizikai szimulációjához*, Tavaszi Szél Konferencia Absztraktkötet, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Eger, 2015.04.10-12. p. 326. (ISBN 978-963-397-702-6)
- (24) Balogh, A., Gáspár, M.: *A matching kérdéskör: hozaganyagválasztás a konvencionális és korszerű nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez*, Hegesztéstechnika, XXV. évf. 3. sz., 2014. pp. 75-80.
- (25) Gáspár, M., Balogh, A., *Kritikus sávok a nagyszilárdságú acélok hegesztett kötéseinek hőhatásövezetében*, 27. Hegesztési Konferencia, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország, 2014. pp. 195-212. (ISBN 978-963-088-585-0)
- (26) Gáspár, M., Kuzsella, L., Koncsik, Zs., Lukács, J.: *Hegeszthetőségi problémák megoldása fizikai szimulációval*, 7. Anyagvizsgálat a Gyakorlatban Szakmai Szeminárium, Kecskemét, 2014.06.19-20.
- (27) Gáspár, M., Balogh, A.: *A hegesztési paraméterek hőhatásövezetre gyakorolt hatásának fizikai szimulációval történő vizsgálata S960QL esetén*, Hegesztéstechnika, XXV. évf. 1. sz., 2014. pp. 21-28.
- (28) Gáspár, M.: *Nemesített nagyszilárdságú acélok hőhatásövezeti zónáinak előállítása szimulált hegesztési hőciklusok segítségével*, Multidiszciplináris Tudományok, 3. évf. 1. sz., Miskolci Egyetem, 2013. pp. 27-38.
- (29) Gáspár, M.: *Nagyszilárdságú acélból készült hegesztett kötések hőhatásövezetének vizsgálata fizikai szimulációval*, Tavaszi Szél Konferencia, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Sopron, 2013. pp. 179-184.
- (30) Balogh, A., Gáspár, M., Prém, L.: *A hegesztett szerkezetek konvencionális és korszerű nagyszilárdságú acéljainak rendszerezése és hegesztési nehézségei*, GÉP, 64. évf. 8. sz., 2013. pp. 7-12.
- (31) Gáspár, M.: *A nemesített állapotú nagyszilárdságú acélok hagyományostól eltérő hegesztési megoldásai középvastag lemezeknél*, Hegesztő Szakmérnöki Diplomatervezés (témavezető: Dr. Balogh András), 2013.
- (32) Balogh, A., Gáspár, M.: *Nagyszilárdságú acélok hegesztésének standardtól eltérő koncepciója*, Hegesztéstechnika, XXIII. évf. 3. sz., 2012. pp. 23-28.

- (33) Gáspár, M., Balogh, A.: *Hegesztéstechnológiai paraméterablak nagyszilárdságú acélok hegesztésénél*, GÉP, 63. évf. 11. sz., 2012. pp. 11-16.
- (34) Gáspár, M., Balogh, A.: *A vonalenergia optimális tartománya nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztésekor*, 26. Hegesztési Konferencia és Hegesztéstechnikai Kiállítás, Óbudai Egyetem, Budapest, 2012.05.10-12., pp. 173-180. (ISBN 978-615-501-828-2)
- (35) Gáspár, M., Balogh, A.: *Feszegethető technológiai határok nagyszilárdságú acélok ívhegesztésekor*, Hegesztési Felelősök XIV. Országos Tanácskozása, 2012.09.20-21.
- (36) Gáspár, M.: *A hűlési idő szerepe nagyszilárdságú acél hegesztése során*, Diáktudomány: A Miskolci Egyetem Tudományos Diákköri Munkáiból, 1. évf., 2011. pp. 46-50.
- (37) Gáspár, M.: *Nagyszilárdságú, nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztése*, MSc Diplomamunka, 2011.

6. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOM

- [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] Komócsin, M.: *Nagyszilárdságú acélok és hegeszthetőségük, Hegesztéstechnika, XIII. évf. 1 sz., 2002. pp. 5-9.*
- [4] Ohlsson, A.: *Applications in high strength steels – Possibilities on new segments, IIW 2015 International Conference on High Strength Steels – Challenges and Applications, Helsinki, Finland, 2-3. July 2015, Paper IIW 2015 Plenary Lecture.*
- [5] S Bursi, O. S., Kumar, A. et al.: *Design and integrity assessment of high strength tubular structures for extreme loading conditions, Research programme of the Research Fund for Coal and Steel, RFSR-CT-2008-00035, 2011.*
- [6] O 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.*
- [7] Porter, D. A., Easterling, K. E.: *Phase Transformations in Metals and Alloys, Second edition, Chapman and Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK 1996. (ISBN 0-412-45030-5).*
- [8] Tisza, M.: *Az anyagtudomány alapjai, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2008. pp. 1-285. (ISBN 978 963 661 844 5).*
- [9] Nevasmaa P.: *Evaluation of HAZ Toughness Properties in Modern Low Carbon Low Impurity 420, 550 and 700 MPa Yield Strength Thermomechanically Processed Steels with Emphasis on Local Brittle Zones, Lisensiaatintyö, University of Oulu, 1996. pp. 176.*
- [10] Nevasmaa, P.: *Predictive model for the prevention of weld metal hydrogen cracking in high-strength multipass welds, PhD Dissertation, University of Oulu, Finland, 2003.*
- [11] Palotás, B.: *A finom szemcsés acélok hegeszthetősége, Acélszerkezetek, MAGÉSZ, XII. évf. 2. sz., 2015. pp. 59-67.*
- [12] Balogh, A., Kirk, S., Görbe, Z.: *Role of cooling time when steels to be welded requires controlled heat input, GÉP, L. évf. 5. sz. 1999.*

- [13] Rodrigues, D.M., Menezes, L.F., Loureiro, A., Fernandes, J.V.: *Numerical study of plastic behaviour in tension of welds in high strength steels*, International Journal of Plasticity, Vol. 20. 2004. pp. 1-18.
- [14] Satoh, K.; Toyoda, M.: *Joint Strength of Heavy Plates with Lower Strength Weld Metal*, Welding Journal, No. 9. 1975. pp. 311s-319s.
- [15] Structural Welding Code - Steel (AWS D1.1/D1.1.M:2006).
- [16] Kovács, P. Z.: *Alakítási határdiagramok elméleti és kísérleti elemzése*, PhD értekezés, 2012. p. 114.
- [17] 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).
- [18] 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. Elsevier Applied Science and The Society of Materials Science, Japan, 1987. pp. 59-69.
- [19] Verő B.: *A fizikai és matematikai szimuláció helye és szerepe a műszaki anyagtudományban*, Bányászati és Kohászati Lapok, 145. évf. 1. szám, 2012. pp. 2-6.
- [20] Adonyi, Y.: *Heat-affected zone characterization by physical simulations*, Welding Journal, October 2006. pp. 42-47.
- [21] Rykalin, N. N.: *Teplovie processzi pri szvarke*, Vüpuszk 2, Izdatelsztvo Akademii Nauk SzSzsZR, Moszkva, 1953. pp. 56.
- [22] Balogh, A.: *A hegesztés hőfolyamatai*, Oktatási segédlet, Hegesztő Szakmérnöki Jegyzet, 2010, p. 18.
- [23] Laitinen, R.: *Improvement of weld HAZ toughness at low heat input by controlling the distribution of M-A constituents*, PhD Dissertation, University of Oulu, 2006. pp. 164.
- [24] Heikkilä, S. et al: *Hardness Profiles of Quenched Steel Heat Affected Zones*, Materials Science Forum Vol. 762, Trans Tech Publications, Switzerland, 2013. pp. 722-727.
- [25] Lenkeyné Bíró, Gy.: *Ütővizsgálat információtartalma - Hagyományos, műszerezett*, GÉP, 49. évf. 7-8. sz. 1997. pp. 55-64.
- [26] Farkas, J., Jármái, K.: *High strength steel application for welded stiffened plate structure of a fixed storage tank roof*, IIW 2015 International Conference Programme High Strength Steels - Challenges and Applications, Helsinki, Finnország, 2015.07.02-2015.07.03, Paper IIW 2015 1001 7 p.
- [27] Metals Handbook, Volume 6.: *Welding, Brazing and Soldering*, ASM International, USA, 1995.