

NAGY SZILÁRDSÁGÚ ACÉLSZERKEZETEK – FEJLESZTÉSI IRÁNYOK ÉS ALKALMAZÁS

HIGH STRENGTH STEEL STRUCTURES – DEVELOPMENTS AND APPLICATIONS

Napjainkban az építőmérnöki acélszerkezetek tervezésében megjelentek olyan különösen nagy szilárdságú, 500 MPa-nál nagyobb folyáshatárú anyagok, melyek a gépjárműiparban, repülőgépiparban már régebben használatosak. Az építőmérnöki felhasználás széles körű elterjedését jelenleg azonban erősen korlátozza a hiányos méretezési háttér vagy a túl konzervatív előírások alkalmazása, ami kiegészítő kutatásokat tesz szükségessé a témában. A cikkben bemutatjuk a BME Hidak és Szerkezetek Tanszéknek az elmúlt 3–4 évben a nagy szilárdságú acélszerkezetek témaköréhez kapcsolódó kutatási tevékenységét. Ismertetjük a különböző kutatási területeken elért új tudományos eredményeket, valamint ezeknek a szabványosítási folyamatban való megjelenését és a hétköznapi tervezésben való alkalmazhatóságát. A cikkben bemutatjuk a hegesztett és hidegen alakított nagy szilárdságú acél szelvényekben fellépő sajátfeszültségek specialitásait, meghatározási módjait, ezeknek a teherbírási való közvetlen hatását. Ezenkívül ismertetjük a nagy szilárdságú acélszerkezetek stabilitási és fúradási méretezési specifikumait, a tanszék által kifejlesztett méretezési módszereket, melyek hozzájárulnak a nagy szilárdságú acélszerkezetek gazdaságosságának növeléséhez.

1. BEVEZETÉS

A nagy szilárdságú acélanganyagok felhasználása már széles körben elterjedt a járműiparban, mobil daruszerkezeteknél, off-shore szerkezetekben, illetve a hajóiparban. Építőmérnöki felhasználása azonban ezeknek az új és nagy teljesítőképességű acélanganyagoknak napjainkban még csekély, azonban növekvő tendenciát mutat. A felhasználás elterjedését jelenleg erősen korlátozza a hiányos méretezési háttér, ami kiegészítő kutatásokat tesz szükségessé a témában. Ezek a kutatások, melyek a nagy szilárdságú acél felhasználásának elterjedését hivatottak szolgálni, számos nyugat-európai, amerikai és ázsiai egyetemen nagy ütemben zajlanak napjainkban, mely kutatásokba kapcsolódott be tanszékünk is egy hazai és egy nemzetközi kutatási projekt keretében.

Jelenleg a világon az építőmérnöki szerkezetek esetén nagy szilárdságú acélt leggyakrabban nagy fesztávú hídszerkezetekben alkalmaznak súlycsökkentés és ezáltal igénybevétel-csökkentés céljából (pl: *Tokyo Gate Bridge – 1–2. ábra*). Tudomásunk szerint Magyarországon is hídszerkezetekbe épült be a legnagyobb mennyiségben nagy szilárdságú acél, ami az S420–S460 szilárdsági osztályt jelentette.

The application field of high strength steel (S500 and higher steel grades) is growing nowadays in the civil engineering praxis due to the numerous advantages of the HSS members compared to the normal strength steel structures: economic design, material saving, possibility of creation lighter and more aesthetic structures. The wide application of HSS structures in the civil engineering praxis is currently limited by the non-complex and conservative design methods provided by the Eurocode. The paper presents the research activities made by the BME Department of Structural Engineering in the last 3–4 years in the field of high strength steel structures. The first focus field of the current research program is the special residual stress distribution in HSS welded box section columns and their flexural buckling resistance, which are experimentally and numerically studied in a detailed manner. The second research field is the fatigue behaviour of typical structural details used in bridges made of HSS. The current paper presents our new research findings, their standardization process and application possibilities in the design, which increases the economic application possibilities of HSS structures.

Másik lehetséges, manapság gazdaságosnak tűnő felhasználási terület a szintén nagy fesztávú, térbeli felületszerkezetű rácsos tartók, esetleg rácsos gerendák. Kutatásainkban ennek megfelelően erre a két alkalmazási területre fókuszáltunk. Korábban a nagy szilárdságú acél termékek csak lemez formájában voltak kaphatók a piacon, napjainkban azonban megjelentek a melegen hengerelt vagy hidegen alakított acélszerkezeti gyártmányok is (I szelvények, zárt szelvények) nagy szilárdságú acélanganyagból. Elsősorban a zárt szelvények alkalmazása terjedt el az acél rácsos tartók körében, ahol a nagy szilárdságú acél számos előnyös tulajdonsága kihasználható. Egyrészt a nagyobb szilárdsági jellemzők keresztmetszeti méretcsökkentést tesznek lehetővé, amely súlycsökkentéshez, ezáltal igénybevétel-csökkentéshez vezet, mely versenyképesebb szerkezetek előállítását teszi lehetővé. Ezenkívül a keresztmetszeti méretcsökkenés a festendő felület és a tűzvédelmi bevonat csökkenését is jelenti, ami tovább csökkenti az összköltséget. A kisebb keresztmetszeti méretek azonban karcsúbb, ezáltal stabilitásra érzékenyebb szerkezeti kialakításokhoz vezetnek, melyeknél a lokális horpadás és a kihajlás nagyobb hangsúlyt kap a tervezésben. Mindemellett ismert, hogy a nagy szilárdságú acélok gyártása, hengerlése, hegesztése a folyáshatárhoz viszonyítva kisebb sajátfeszültséget eredm-



1. ábra: Tokyo Gate Bridge oldalnézete – BHS500 és BHS700 anyagból készült [1]



2. ábra: Tokyo Gate Bridge építése [1]

nyez a normál szilárdságú acélananyagokkal összehasonlítva. Ezáltal lényegesen kedvezőbb lehet a nagy szilárdságú acélananyagból készült szerkezeti elemek stabilitási viselkedése, illetve a hagyományos eljárások alkalmazása jelentősen a biztonság oldalán tévedhet, mely rontja a gazdaságos felhasználást. Ezért a globális és lokális stabilitási jelenség és teherbírás meghatározása nagy szilárdságú acélból készült szerkezeti elemek esetén felülvizsgálatra szorul, melyet a jelen kutatásaink keretében elvégeztünk. Magyarországon jelenleg S235–S355 (S420/S460) acélananyagok érhetők el széles körben a piacon. Ugyanakkor külföldön már szélesebb körben elérhetők az S500–S960 acélananyagból készült szerkezeti elemek is. Ezért kutatásaink során az S235–S960 acélananyagból készült szerkezetek stabilitási, majd később fáradási jellemzőire fókuszálunk.

Az anyagfelhasználás további csökkentésének általában a használhatósági, valamint a fáradási határállapot szab korlátot. Mivel a fáradásvizsgálati eljárások és méretezési módszerek függetlenek az acélananyag szilárdsági tulajdonságától, ezért elengedhetetlen a nagy szilárdságú acél hídszerkezetek gazdaságos alkalmazáshoz, hogy megvizsgáljuk fáradási jellemzőit, és továbbfejlesszük a tervezésükhöz alkalmazott méretezési eljárást. Korábbi szakirodalmi adatok egyértelműen alátámasztják, hogy a folyáshatár növelésével az alapanyag fáradási jellemzői is kedvezőbbek lesznek, ugyanez azonban már nem mutatható ki egyértelműen hegesztett szerkezeti részletek esetén. A kutatásaink keretében ezért célunk néhány hidépítésben hagyományosan alkalmazott szerkezeti részlet fáradási jellemzőinek vizsgálata, és ezáltal a nagy szilárdságú acél alkalmazhatóságának megítélése abban az esetben, ha fáradási határállapot a mértékadó.

A kutatásaink illeszkednek a jelenlegi nemzetközi kutatási és fejlesztési trendekhez. A BME Hidak és Szerkezetek Tanszék részt vett nemzetközi együttműködés keretében öt neves európai egyetemmel (köztük: RWTH Aachen, Luleå University of Technology, TUT Tampere University of Technology) és három széles körben ismert acélgyártó céggel (Voest Voestalpine Krems

GmbH, Ruukki Rautaruukki Oyj, SSAB EMEA) végzett RFCS kutatási projektben, melynek címe Rules on High Strength Steel (RUOSTE). A kutatási projekt célja a különösen nagy szilárdságú acélszerkezetek (S500–S960) méretezési szabványainak fejlesztése és azáltal a gazdaságos alkalmazás elősegítése. A projektben tanszékünk két kutatási területre fókuszált, a nagy szilárdságú acélból készült csavarozott nyírt kapcsolatok és a húzott rúd méretezési eljárásnak fejlesztésére, dr. Horváth László témavezetésével. A másik fókuszterület a hegesztett és hidegen alakított zárt szelvények sajátfeszültség-eloszlásának és a nyomott szerkezeti elemek kihajlási ellenállásának meghatározása volt, dr. Kövesdi Balázs témavezetésével.

A nemzetközi kutatásaink egy hazai GINOP projekt keretében (SteelBeam – Innovatív, nagyfeszítésváltságú, hegesztett acél gerendatartók fejlesztése) terjesztettük ki és aktualizáltuk a hazai építési gyakorlatnak megfelelően. Ebben a projektben kiegészítettük a vizsgálatainkat az alacsonyabb szilárdsági osztályok (S235–S355–S420–S460) sajátfeszültség-eloszlásának és stabilitási ellenállásának meghatározásával, mely jól használható referenciaértékeket adott a nagy szilárdságú acélananyagokon végzett kísérletekhez. Továbbá tudomásunk szerint a világon egyedülálló módon teljes vizsgálati programot tudunk végrehajtani egy adott jelenség (zárt szelvények sajátfeszültség-eloszlása), szerkezeti viselkedés és teherbírás (kihajlási ellenállás) vizsgálatára S235–S960 szilárdsági tartományon. A vizsgálatok eredményeként a szilárdsági osztálytól függő paraméterek és szerkezeti viselkedési sajátosságok meghatározhatók és elemezhetők voltak. A jelen cikkben a nagy szilárdságú acélszerkezetek előnyeinek átfogó bemutatása után a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék nemzetközileg is elismert kutatási eredményeit szeretném bemutatni a nagy szilárdságú acélszerkezetek sajátfeszültség-eloszlásának, kihajlási ellenállásának és fáradási viselkedésének témájában.

2. NAGY SZILÁRDSÁGÚ ACÉLSZERKEZETEK ELŐNYEI, JELLEMZŐI, GAZDASÁGOSSÁGA

Nagy szilárdságú acélszerkezetek napjainkig elsősorban hidépítésben terjedtek el. Magasépítési felhasználásuk eddig csekély, költségelemzések azt mutatják, hogy a jelenlegi árszinteken jelenleg még nem éri meg a nagy szilárdságú acélszerkezet alkalmazása. Hidaknál azonban előtérbe kerülnek előnyös tulajdonságaik, súlycsökkentés és ezáltal igénybevétel-csökkentés következtében. Kutatási eredmények azt mutatják, hogy a nagy szilárdságú acélszerkezetek előnyei a hagyományos szilárdsági osztályú szerkezetekkel szemben a következők:

- kisebb önsúly és anyagköltség,
- karcsúbb és ezáltal kedvezőbb megjelenésű szerkezetek,
- feszításváltság és ezáltal esetleg pillérszámcsökkentés lehetősége,

- kisebb szerelési költség (kisebb varratméretek vékonyabb lemezek miatt, kisebb előmelegítési igény kedvezőbb hegeszthetőség miatt),
- egyszerűbb szállíthatóság és összeszerelhetőség a kisebb önsúly következtében,
- a kedvezőbb szívóssági tulajdonság csökkenti a ridegtörési kockázatot, és növeli a szerkezet megbízhatóságát az élettartama alatt,
- kedvezőbb fenntarthatóság, jobb korrózióállóság, mely növeli a szerkezet élettartamát,
- a kedvezőbb hegeszthetőségi tulajdonság csökkenti a gyártási költséget,
- hibetolárnál negatív nyomaték csökkentésének lehetősége.

Több korábbi nemzetközi szakirodalomban publikált tanulmány is arra az eredményre jutott, hogy a nagy szilárdságú acélananyag más, alacsonyabb szilárdságú anyagokkal együtt lehet igazán gazdaságos, például hibrid tartókban (övmélez nagy szilárdságú, gerinclemez normál szilárdságú acélból készül), vagy öszvérszerkezetekben felső vasbeton pályalemezzel, ahol a nagy szilárdságú szerkezeti elemek dominánsan húzottak [2]. További felhasználási alternatíva, hogy szerkezetek bizonyos részei nagy szilárdságú, bizonyos részei normál szilárdságú acélból készülnek (például nagy fesztávolságú hidak mezőközépi része nagy szilárdságú acélból, támaszközeli részei normál szilárdságú acélból).

Az anyagköltség-csökkenés továbbá magával vonja a szerelési, szállítási és építési költség csökkenését is, mivel kisebb tömegű szerkezeteket kell szállítani, mozgatni, emelni. Továbbá a kedvezőbb időállósági és korrózióállósági tulajdonság következtében a híd élettartama során is kisebb költségekkel lehet számolni. A külföldön hagyományosan 10 évenkénti festés (ami jelentős költséget jelent) csökkenthető a nagy teljesítőképességű acélananyag alkalmazásával.

Japánban a Tokyo Institute of Technology és a Japan Iron and Steel Federation egy közös kutatási projekt keretében végzett költségszámításokat kis/közepes, valamint nagy fesztávolságú hidak esetén nagy teljesítőképességű acélananyagok felhasználásának várható költségcsökkentésének meghatározására [2]. Két kialakítású hídszerkezetet vizsgáltak, egy 53 m fesztávolságú két főtartós autópályahidat és egy rácsos pályaszerkezettel rendelkező, 69 m fesztávolságú hidat. A számítások azt mutatták, hogy kis fesztávú szerkezetek esetén a 355 MPa folyáshatárú acélananyaghoz képest a magasabb folyáshatár a fáradási határállapot miatt csak kismértékű súlycsökkenést tud eredményezni. Nagyobb fesztávolságú hidaknál azonban, ahol a fáradási határállapot kisebb szerepet kap, egészen a 600 MPa folyáshatárú acélananyagokig jelentősen csökkenthető a szerkezet önsúlya és ezáltal az anyagfelhasználás mennyisége.

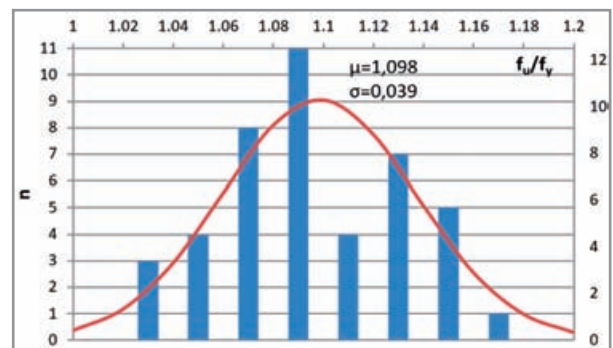
Összefoglalóan elmondhatjuk, hogy a nagy szilárdságú acélok az acélszerkezeti építőmérnöki gyakorlatban alkalmazott acélananyagok új generációját jelentik, melyek jelentősen javított mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, növelt folyáshatár és szakítószilárdság, kedvezőbb szívóssági tulajdonság, kedvezőbb hegeszthetőség és korrózióállóság. Figyelembe véve ezeket a kedvező tulajdonságokat, körültekintő tervezéssel és helyes szerkezeti alkalmazással jelentős költségcsökkentést lehet elérni nagy szilárdságú acélananyag alkalmazásával, mely jelentős előnyökkel kecsegtet a felhasználásának jövőjét tekintve.

3. A NAGY SZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK ANYAGJELLEMZŐI

A nagy szilárdságú acélok fejlesztése már az 1950-es években megindult. Az első nagy szilárdságú acélok esetében ugyan a nagy (>500 MPa) szilárdságot sikerült elérni, de közben más jellemzői az acélnak nem voltak kedvezőek, mint például a hegeszthetősége, a korrózióállósága vagy a duktilitása. Ugyanakkor a mai nagy szilárdságú acélok esetén sok hátrányos tulajdonságot sikerült felszámolni az anyagtudomány fejlődésének

köszönhetően. Az úgynevezett nagy teljesítőképességű acélok esetén már nemcsak a szilárdsága magasabb az acélnak, hanem kedvezőbb a hegeszthetősége, valamint a korrózióállósága is. A továbbiakban bemutatjuk azokat a legfontosabb jellemzőket, amelyekben szignifikánsan eltér a nagy szilárdságú acélananyag viselkedése a normál szilárdságú acéloktól.

1. Megnövekedett szilárdság: az általánosan elérhető 235 MPa nominális folyáshatárú acélokhöz képest akár 4–5-szörös szilárdsági növekedés is elérhető már.
2. Nincs folyási plató, emiatt az acél folyáshatárát a 0,2%-os maradé nyúláshoz tartozó egyezményes folyáshatárral jellemezzük.
3. Kisebb felkeményedési mérték, így nincs meg bennük az a képlékeny tartalék, ami jelen van a normál szilárdságú acéloknál. Míg az EN 1993-1-1 [3] előírásai alapján S460-as anyagminőségig a szakítószilárdság és a folyáshatár hányadosának nagyobbak kell lennie, mint 1,10 ($f_u/f_y \geq 1,10$), addig ezt az értéket a nagy szilárdságú acélok nem minden esetben teljesítik. A BME korábbi anyagvizsgálati kísérletei, melyet 22 (különböző gyártó, anyagminőség vagy anyagvastagság esetén) nagy szilárdságú acélananyagon végzett (összesen 42 darab próbapálcán), azt mutatták, hogy a vizsgált nagy szilárdságú acélananyagok átlagos f_u/f_y arányának átlaga kisebb, mint 1,1.
4. Az EN 1993-1-12 [4] előírása alapján az S460 és S700 közötti acélananyagminőségek esetén a minimális f_u/f_y arány határértéke 1,05. A korábban a BME által vizsgált anyagok nagy része ezt a feltételt kielégíti, de a 42 próbatestből 4 darab (~10%) még ezt a határértéket sem érte el. A vizsgált próbatestek statisztikai kiértékelését a 3. ábra mutatja be.



3. ábra: Szakítószilárdság és folyáshatár aránya nagy szilárdságú acéloknál

5. Kisebb duktilitás: az Eurocode-ban az f_u/f_y arány a duktilitási feltételek közt szerepel, habár az tulajdonképpen a felkeményedés jelenségét írja le. Ugyanakkor szerepel az Eurocode-ban két másik feltétel is, ami már ténylegesen a duktilitás jelenségét írja le. S460-as anyagminőségig az első ilyen feltétel 15%-os minimum határt szab a szakadási nyúlásra ($\epsilon_f \geq 15\%$), a másik pedig a folyási nyúlás 15-szörösében minimalizálja a szakadónyúlást ($\epsilon_{0.1} \geq 15\epsilon_y = 15f_y/E$). Az S460-tól S700-ig terjedő anyagminőségek esetén az EN 1993-1-12 az első feltételt 10%-ra csökkenti, míg a másodikat változatlanul hagyja. A kísérleti eredményeink azt mutatták, hogy 10%-os szakadónyúlást az S500-as és S700-as acélok minden esetben teljesítették, de az S960-as acélok már nem minden esetben. Viszont a második feltételt, már nem csak az S960-as próbatestek nem tudták kielégíteni, hanem S500-as és S700-as hidegen alakított acélok sem.

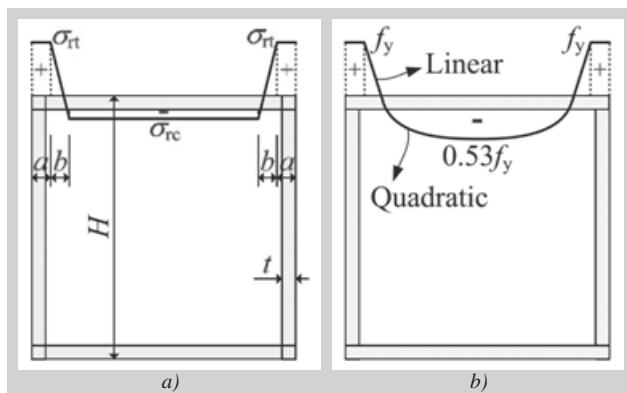
A képlékenységi követelmények biztosítják a törési tönkremenetelek elkerülését. Ebben a szénttartalomnak igen fontos szerepe van. A szénttartalom növelésével ugyan a szilárdság nő, azonban az alakíthatóság csökken. Ezért a szénttartalmat 0,15–0,30% között kell tartani minden szerkezeti acélnál. A HSS típusú acélok szénttartalmát egészen alacsony, 0,15%-os értéken tartva tudják biztosítani a magas szilárdságot, ugyanakkor ennek következté-

ben jelentősen lecsökken a duktilitás mértéke. Mivel az alacsony szilárdságú acélszerkezetre kidolgozott méretezési eljárások közül számos képlet kihasználja a képlékeny teherbírási tartalékot, illetve a képlékeny tartományban bekövetkező feszültségrendeződést, ezért az eltérő anyagi jellemzőkkel bíró nagy szilárdságú acélszerkezetek esetén ezen méretezési eljárások felülvizsgálatra, pontosításra szorulnak.

4. NAGY SZILÁRDSÁGÚ ACÉL ZÁRT SZELVÉNYEK SAJÁTFESZÜLTÉG-ELOSZLÁSA

4.1. Szakirodalmi adatok

A szakirodalomban viszonylag nagyszámú kutatás található, mely normál szilárdságú acél szelvények sajátfeszültségeinek elemzésével foglalkozik, viszont nagy szilárdságú acél szelvények sajátfeszültségeivel foglalkozó tanulmány csak korlátozott számban található. A korábbi kísérleti eredmények alapján az állapítható meg, hogy nem ugyanolyan módon kell figyelembe venni normál és nagy szilárdságú acél szelvények esetén a sajátfeszültségek eloszlását. Jellemzően nagy szilárdságú acél szelvények esetén a sajátfeszültségek nagyságrendje a folyáshatárhoz viszonyítva kisebb, mint normál szilárdságú acélok esetén. A kutatásainkban mind a hegesztett, mind a hidegen alakított szelvények sajátfeszültség-eloszlását részletesen vizsgáltuk, azonban a cikkben csak a hegesztett szelvényekre kidolgozott sajátfeszültség-modellt ismertetjük. Hegesztett zárt szelvények sajátfeszültség-eloszlására a szakirodalomban különböző modellek találhatók [5], [6]. Az Európában és Kínában használt modelleket az 4. ábra mutatja be.



4. ábra: Sajátfeszültség modellek [5]
a) ECCS modell; b) kínai modell

Az ECCS modell a nyomó sajátfeszültség értékét a b/t arány és a hegesztési típus függvényében definiálja, ahogy ezt a 1. táblázat mutatja. Az ajánlás szerint a húzó sajátfeszültséget a sarkokon a folyáshatárral megegyező értékre kell felvenni. A kínai modell hasonló, de a nyomott oldalon lekerekített, kvadratikus függvényt használ, továbbá a nyomó sajátfeszültség értéke ezen modell szerint függetlenek a szelvény b/t arányától.

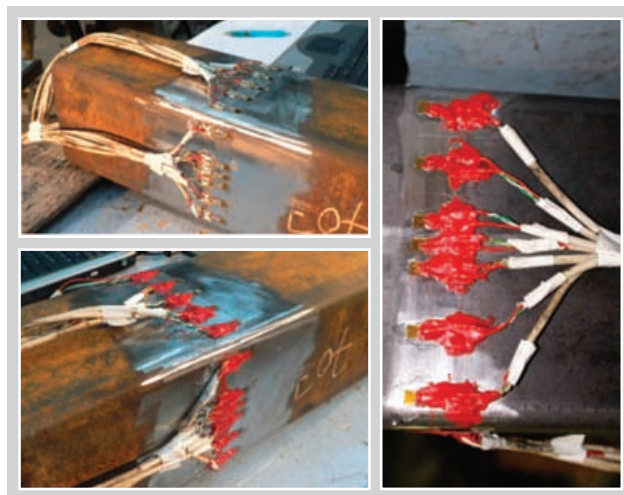
1. táblázat: Az ECCS sajátfeszültség-modell paraméterei [5]

H/t	Welding type	σ_{rt}/f_y	σ_{rc}/f_y	a	b
10	–	1,0	–0,60	0	–
20	heavy weld	1,0	–0,82	3 t	3 t
20	light weld	1,0	–0,29	1,5 t	1,5 t
40	heavy weld	1,0	–0,29	3 t	3 t
40	light weld	1,0	–0,13	1,5 t	1,5 t

Szakirodalmi áttekintés alapján megállapítható, hogy általánosan ismert és elfogadott tény, hogy a hegesztett zárt szelvények sarkaiban a hegesztés környezetében mindig magas húzófeszültség jelenik meg, melynek nagyságrendje elérheti vagy akár meg is haladhatja az alapanyag folyáshatárát. A lemezek középső részein egy alacsonyabb mértékű, de nagyobb felületre kiterjedő nyomó sajátfeszültség van, amely ellensúlyozza a sarkokon lévő húzóhatást. Viszont a húzó és nyomó sajátfeszültség maximális értékeinek tekintetében vannak ellentmondásos eredmények és konklúziók a nemzetközi szakirodalomban. Több modell, mely javaslatot ad a sajátfeszültség értékeire a húzó és nyomó sajátfeszültséget a folyáshatár konstans-szorosaként definiálja. Mivel a legtöbb korábbi vizsgálat azt mutatta, hogy magasabb szilárdságú anyag esetén a sajátfeszültségek növekedése nem lineáris ütemben növekszik a folyáshatárral [5], [7]. Továbbá számos mérési eredmény azt igazolja, hogy a nyomott oldali sajátfeszültség értéke erősen függ a vizsgált lemez b/t arányától [7]. Több esetben a kutatók azt találták, hogy különböző lemezvastagságok esetén a b/t aránytól való függés is különböző, ugyanakkor más eredmények szerint a lemezvastagságnak nincs ilyen jellegű hatása.

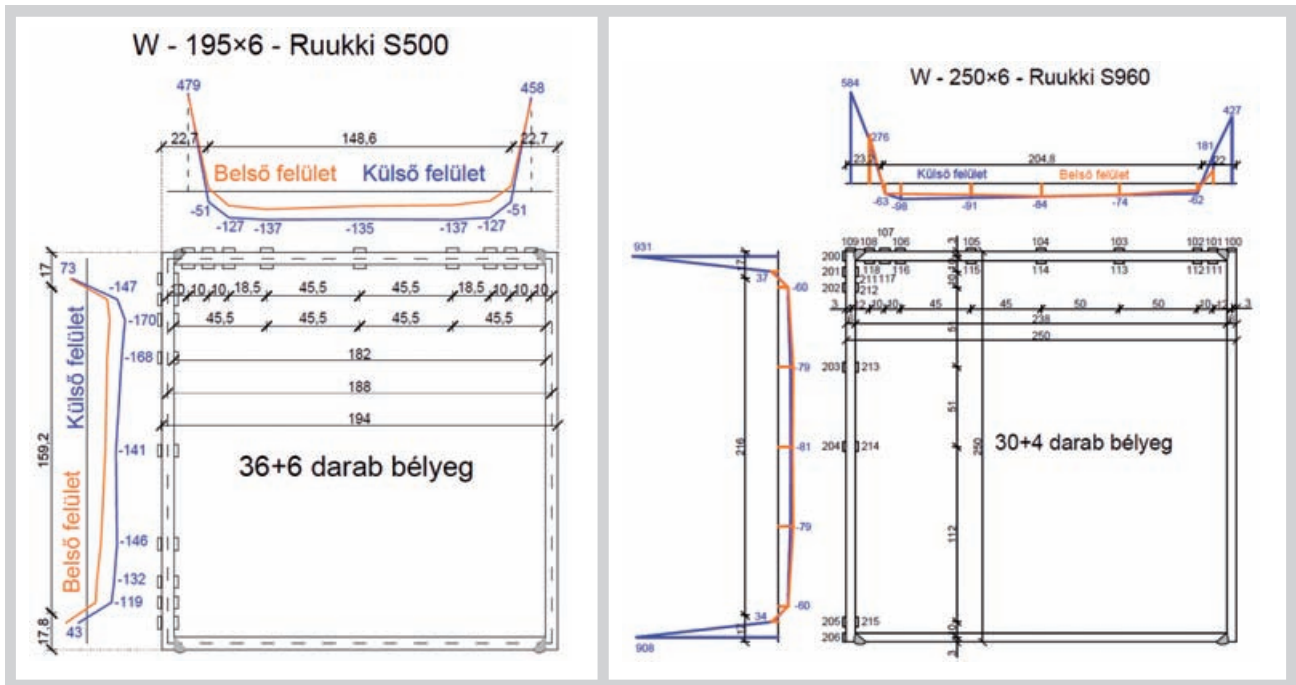
4.2. Kísérleti vizsgálatok és eredményei

A szakirodalomban található ellenmondások feloldására, valamint az alacsony szilárdságú acélanagra kidolgozott sajátfeszültség-modell nagy szilárdságú acélananyagban való alkalmazásának vizsgálatára egy átfogó kutatási programot dolgoztunk ki. A kísérleti program keretében összesen 22 darab hegesztett négyzet keresztmetszetű zárt szelvény sajátfeszültség-eloszlását mértük meg különböző szilárdsági osztályú acélananyag alkalmazásával. A hegesztett próbatetek 4 síklemezből lettek összehegesztve olyan módon, hogy két párhuzamos oldalon a külső szélességgel (b) megegyező szélességű lemezek vannak, erre merőleges irányban pedig $b-2 \times t$ szélességű lemezek lettek a másik kettő közé helyezve, így a négy hegesztés páronként két szemközi oldalon helyezkedik el. A sajátfeszültségek meghatározását a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékének Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában végeztük el vízhűtéses, szeleteléses technológiával. A mérésre előkészített, felbélyegzett próbatestet az 5. ábra mutatja be.



5. ábra: A próbatetek előkészítése

A vizsgálatok során a 22 próbatesten összesen 497 pontban határoztuk meg a sajátfeszültségek értékét. Két próbatest esetén a szelvény belső és külső oldalán mért sajátfeszültségek értékeit a 6. ábra mutatja be. Hasonló jellegű feszültségeloszlást mértünk az összes többi próbatesten is, eltérő maximális értékekkel.



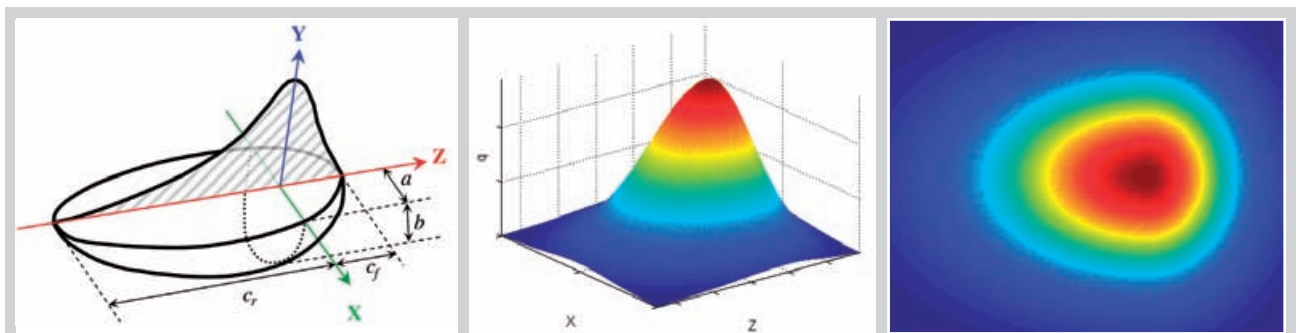
6. ábra: Mért sajátfeszültségek a hegesztett S500 195×6-os és S960 250×6-os próbatesteken

A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a hegesztések környezetében a sarkoknál jelentős húzó sajátfeszültségek jelennek meg, melyek értéke eléri, illetve akár enyhén meg is haladhatja az alapanyag mért folyáshatárát. A lemezek közbenső tartományán nyomó sajátfeszültség alakul ki, melynek átlaga a folyáshatár 10%–56%-a között változott.

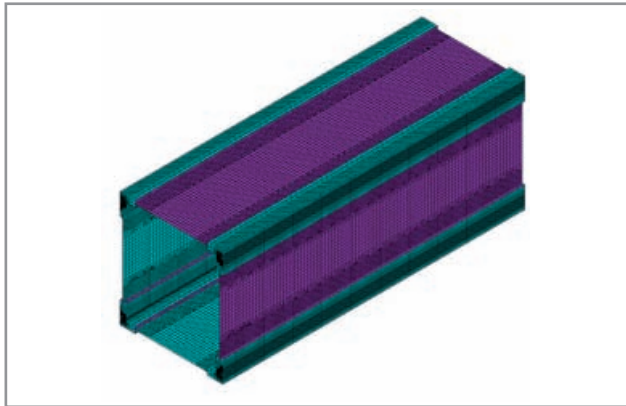
A mérések igazolták, hogy a nyomó sajátfeszültség nagysága nem változik jelentősen az anyag szilárdsági osztályának függvényében. Az S235-ös, az S460-as és az S960-as acélananyagból készült próbatesteken mért nyomó sajátfeszültségek értékei között nincs jelentős különbség, ami igazolja a nyomó sajátfeszültségek szilárdsági osztálytól való függetlenségét. Megjegyzendő továbbá, hogy a kísérletek azt mutatták, hogy a zárt szelvény sarkaiban kialakuló húzó sajátfeszültségek értékei szilárdsági osztálytól függetlenül elérhetik a folyáshatár értékét. Mivel az egyensúlynak és az összegzett feszültségek zérus értékének teljesülnie kell minden szelvény és minden anyagminőségű próbatest esetén, ezért a nagy szilárdságú acél szerkezetekben, mivel a húzott zónában folyáshatár függvényében nőnek a feszültségek, a nyomott zónában érdemben nem változnak, ezért a nagy szilárdságú szelvényben nagyobb kiterjedésű kell legyen a nyomott zóna és kisebb a húzott zóna. Ez azt jelenti, hogy a nyomott zónában a nyomó sajátfeszültség értéke folyáshatártól független érték, míg a sajátfeszültség ábra jellege, a sajátfeszültségi nyomott zóna szélessége jelentősen függ a szilárdsági osztálytól, az alkalmazott anyag folyáshatárától.

4.3. Sajátfeszültség-eloszlás hegesztés numerikus szimulációja alapján

Mivel a kísérleti eredményekben jelentős szórás tapasztalunk, melyek jelentős része mérési bizonytalanságból származik, ezért a végleges konklúziók megállapításához a hegesztett zárt szelvényben fellépő sajátfeszültségeket meghatároztuk numerikus modell segítségével is. Kidolgoztunk egy kombinált hég- és testeles végeselemes modellt, melyen a hegesztési folyamatot szimuláltuk. Ehhez *Goldak*-féle dupla ellipszoid hőforrásmodell alkalmaztuk, melyet nagyszámú hőmérsékletmérés és sajátfeszültség-mérés alapján kalibráltunk kézi ivhegesztés modellezésére. Ennek a hőforrásmodellnek az egyik sajátossága, hogy könnyen megváltoztatható a kis behatolási mélységű ivhegesztés és a mélyebb behatolású lézersugaras hegesztési technológiákhoz is. A hőáram *Gauss*-eloszlású a hossztengety mentén. A hőforrás első fele egy körnegyede egy ellipszoidnak, míg a hátsó fele egy másik ellipszoid hőforrás körnegyede. Négy paraméter definiál egy ellipszoidot, melyek fizikailag a megolvadt zóna méreteit tükrözik. Az olvadt zóna keresztmetszetét kísérletekből ismerve a hőforrás paraméterei meghatározhatók. Számos mérési eredmény alapján kidolgoztunk egy parametrizált hőforrásmodellt, mellyel kézi ivhegesztés nagy pontossággal modellezhető. Az alkalmazott hőforrásmodellt és a kidolgozott numerikus modellt a 7–8. ábrák mutatják be.

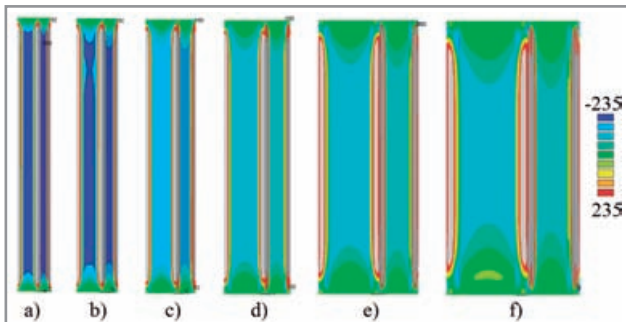


7. ábra: *Goldak*-féle dupla ellipszoid hőforrás paraméterei [15]; az energiasűrűség eloszlása egy adott vízszintes metszetre nézve (Y fix koordináta) és a hőforrás feltülnézete



8. ábra: Tipikus végelemes modell felépítése
($t=16\text{ mm}$, $b_0/t=15$, $f_y=235\text{ MPa}$)

A kidolgozott és verifikált numerikus modellen paramétervizsgálatot hajtottunk végre különböző b/t arányú és különböző szilárdsági osztályú acél zárt szelvényeken és meghatároztuk az azonos hegesztéstechnológia hatására kialakuló sajátfeszültségek nagyságát. Néhány, különböző b/t arány esetén meghatározott sajátfeszültség ábrát a 9. ábra mutat be. A numerikus szimuláció eredményei azt mutatták, hogy állandó folyáshatár mellett a b/t arány növelésével a lemezmező közepén egyre nagyobb átlagos nyomó sajátfeszültség alakul ki. A szilárdsági osztály növelése azonban nem volt jelentős hatással a számított nyomó sajátfeszültségek nagyságára. Összefoglalásként tehát elmondható, hogy a kísérleteknél tapasztalt tendenciákat a numerikus modell eredményei megerősítették és igazolható volt, hogy a nyomó sajátfeszültség értékei a szilárdsági osztálytól függetlenek, míg a húzó sajátfeszültségek értéke közelítően megegyezik az alapanyag folyáshatárának értékével.



9. ábra: Hosszirányú sajátfeszültség ábrák S235 alapanyag és $b_0/t=15$ esetén a következő lemezvastagságokkal:
a) 4 mm; b) 5 mm; c) 6 mm; d) 8 mm; e) 12 mm; f) 16 mm

4.4. Kidolgozott sajátfeszültség-modell

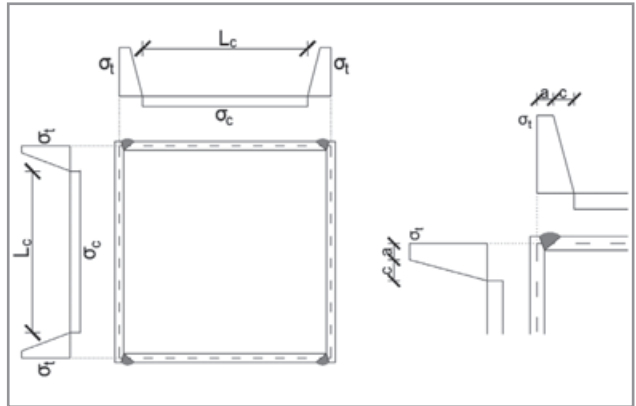
A kísérleti eredmények és a numerikus számítások alapján kifejlesztettünk egy sajátfeszültség-modellt a hegesztett zárt szelvények sajátfeszültség-eloszlásának meghatározására és a méretezési gyakorlatban való figyelembevételére. A sajátfeszültség-modell alakját a 10. ábra mutatja be.

A modellben használatos húzó sajátfeszültséget az alábbi egyenletek írják le:

$$\sigma_{rt,S355-S420} = f_y$$

$$\sigma_{rt,S460-S960} = \min \left[\left(1,2 - \frac{t}{30\text{ mm}} \right) \cdot f_y; f_y \right]$$

A nyomott zónában konstans, egyenletes feszültséget feltételezünk; a nyomó sajátfeszültség értéke független az anyagminőségtől, de függ a b/t aránytól és a lemezvastagságtól (t).



10. ábra: Kidolgozott sajátfeszültség-modell

A nyomó sajátfeszültség értéke az alábbi egyenletekkel számítható:

ha $t \leq 5\text{ mm}$:

$$\sigma_{rc} = 70 - 21t + t^2 - (2900 - 3600 \cdot (t - 5)) \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^{-1}$$

ha $t \geq 5\text{ mm}$:

$$\sigma_{rc} = 70 - 21t + t^2 - (2900 - 290 \cdot (t - 5)) \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^{-1}$$

A húzott zóna alakja és a nyomott zóna szélessége az anyagminőség függvénye, valamint az egyensúlyi egyenletek alapján számítható. Mivel a nyomó sajátfeszültség abszolút értéke független az anyagminőségtől, a húzó sajátfeszültség pedig lineáris függvénye a folyáshatárnak, ezért ahhoz, hogy fennálljon a keresztmetszet egyensúlya, nagyobb szilárdságú acél esetén a húzott zóna mérete kisebb kell legyen. A húzófeszültséghez tartozó trapéz alakú feszültségtest konstans részének a hosszát (a) az anyagminőség és a lemezvastagság (t) függvényében a 2. táblázat adja meg.

2. táblázat: Húzófeszültségi feszültségtest konstans részének szélessége

Anyagminőség	a
S235–S460	$2t$
S500	$1,5t$
S960	0

5. NAGY SZILÁRDSÁGÚ ACÉL ZÁRT SZELVÉNYEK KIHAJLÁSI ELLENÁLLÁSA

5.1. Kísérleti vizsgálatok

Az Eurocode az acélszerkezeti méretezésben két csoportot különböztet meg, az S235–S420-ig terjedő acélokat (EN 1993-1-1 [3]) és az S460–S700-ig terjedő acélokat (EN 1993-1-12 [4]). S700-as szilárdsági osztály felett jelenleg nincsen építőmérnöki célú acélszerkezeti Eurocode szabvány. Ugyanakkor a két csoport között a szabványban a kihajlási ellenállás tekintetében eltérés csak hengerelt I szelvények és melegen hengerelt zárt szelvények esetén van. Ezekben az esetekben a nagyobb szilárdságú osztályból készült szerkezeti elem 1 vagy esetenként 2 kihajlási görbével kedvezőbb kihajlási görbe alapján méretezhető. Ezzel szemben hegesztett szelvényeknél, hidegen alakított zárt szelvényeknél és bármilyen egyéb szelvényről a szabvány semmilyen különbséget nem tesz a két szilárdsági csoport között. A kihajlás jelensége ekkor a hagyományos acélananyagokra kidolgozott szabványos méretezési eljárás szerint végezhető el. Ugyanakkor

korábbi vizsgálatokból ismert, hogy a nagy szilárdságú acél szelvények stabilitási viselkedése kedvezőbb, mint az alacsonyabb szilárdsági osztályú acél szelvényeké. A különbség az eltérő sajátfeszültség-eloszlásból és a különböző mértékű kezdeti imperfekcióból ered. A kihajlás jelenségénél a teherbírás-csökkenés mértékét pedig a sajátfeszültség folyáshatárhoz arányosított értéke határozza meg, nem pedig a sajátfeszültség abszolút értéke. Így magasabb szilárdsági osztályú szelvények esetén magasabb kihajlási görbe használata lehet indokolt. A kutatásaink keretében célunk egy olyan kísérleti program végrehajtása, mely alapján a hegesztett és hidegen alakított zárt szelvényű oszlopok kihajlási ellenállása nagy pontossággal meghatározható, illetve megállapítható, hogy az S235–S960 szilárdsági osztályok között van-e lényeges különbség a kihajlási viselkedésben, lehet-e magasabb szilárdság esetén kedvezőbb kihajlási görbét használni a tervezés során.

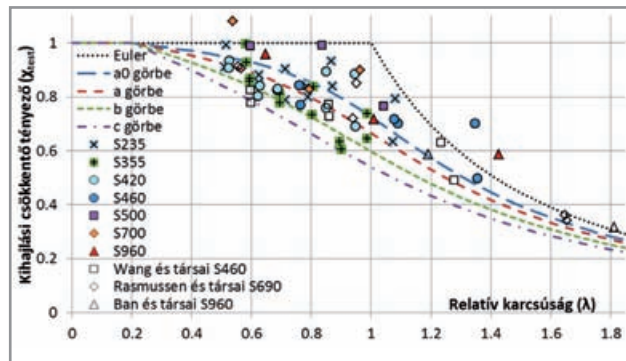
Összesen 49 darab próbatest kísérleti vizsgálatát végeztük el, melyet numerikus modell segítségével több száz vizsgált geometriára terjesztettünk ki. A kihajlási kísérletek nemcsak a kihajlási ellenállás értékének meghatározását jelentették, hanem minden egyes próbatesten imperfekciómérést hajtottunk végre annak érdekében, hogy ismerjük az adott próbatesthez tartozó gyártási imperfekció (kardosság) amplitúdójának nagyságát. Ezenkívül mértük a próbatest terhelése közben kialakuló véletlen külponosság mértékét is. Továbbá minden vizsgált keresztmetszethez meghatároztuk a szelvény jellemző sajátfeszültség-eloszlását, valamint minden lemezvastagság és vizsgált szilárdsági osztály esetén az anyagjellemzők értékét. A kísérleti elrendezést és egy jellemző tönkremeneteli alakot a 11. ábra mutat be.



11. ábra:
Kihajlási vizsgálatok
kísérleti elrendezése

Az előkészítő mérések eredményei alapján azt tapasztaltuk, hogy a próbatestek maximális görbesége kisebb, mint $L/1000$, mely megfelel az Eurocode szerinti gyártási toleranciának ($L/750$). Az átlagos görbeség $\sim L/3000$ volt. A mérési eredmények alapján nem találtunk összefüggést az anyagminőség és a kezdeti görbeség között. Ez azt jelenti, hogy ugyanolyan mértékű imperfekció várható S235-ös és S960-as anyagminőség esetén is. E megfigyelés alapján arra következtethetünk, hogy végeselemes modellen alapuló tervezésénél ugyanazt a geometriai imperfekciót lehet figyelembe venni szilárdsági osztálytól függetlenül. A kísérleti eredmények alapján meghatározott kihajlási csökkentő tényező értékeket a 12. ábra mutatja be a viszonyított karcsúság függvényében. Az EN993-1-1 szabvány szerint minden vizsgált oszlop a c kihajlási görbéhez tartozik. Jól látható, hogy minden kihajlási eredmény a c kihajlási görbe felett helyezkedik el, de átlagos értelemben ennél jóval maga-

sabb teherbírási értékeket tapasztaltunk. Ezenkívül jelentős teherbírás-növekedési tendencia figyelhető meg a szilárdsági osztály növelésével.



12. ábra: Kihajlási vizsgálatok kísérleti eredményei
a viszonyított karcsúság függvényében

5.2. Numerikus vizsgálatok

A numerikus modellezéssel a vizsgálataink célja, hogy végeselemes modell alkalmazásával kiterjesszük a laboratóriumi vizsgálatainkat és részletesen elemezzük a szerkezeti viselkedést és meghatározzuk, hogy a zárt szelvényű nyomott acél oszlopok melyik kihajlási görbe alapján méretezhető a különböző vizsgált szilárdsági osztályok esetén. A vizsgálatokhoz ANSYS 14.5 végeselemes szoftverrel fejlesztett numerikus modellt alkalmaztunk. A vizsgálatok első lépéseként megvizsgáltuk a normál és nagy szilárdságú acélok közti különbségek hatását a kihajlási viselkedésre vonatkozóan. A numerikus paramétervizsgálat keretében az alábbi jellemzőket vizsgáltuk részletesen: (i) folyáshatár értéke, (ii) a sajátfeszültség ábra alakja és értéke (a nyomott sajátfeszültség értéke), (iii) az anyagmodell típusa (a feszültség–nyúlás diagram karakterisztikája). A számítások eredményei alapján a következő következtetésekre jutottunk:

- a nagy szilárdságú acél oszlopokra vonatkozó kihajlási csökkentő tényező értéke magasabb lehet a megnövekedett folyáshatár miatt,
- a nagy szilárdságú acél oszlopokra vonatkozó kihajlási csökkentő tényező értéke magasabb lehet a nyomott sajátfeszültség nagysága miatt (nagy szilárdságú acéloknál a nyomott sajátfeszültség folyáshatárhoz arányosított értéke kisebb),
- a nagy szilárdságú acél oszlopokra vonatkozó kihajlási csökkentő tényező értéke csökkenhet az anyagmodell jellege miatt, mivel a kihajlási ellenállásra negatív hatással van a karcsúságtól függően az, hogy az anyagnak nincsen folyási platója és a rugalmas határt az anyag a folyáshatár előtt eléri,
- a nagy szilárdságú acél oszlopokra vonatkozó kihajlási csökkentő tényező értéke magasabb lehet az anyagmodell jellege miatt, mivel a sajátfeszültség jelenlétének kisebb teherbírás-csökkentő hatása van a nagy szilárdságú anyagokra jellemző Ramberg–Osgood típusú anyagmodell esetén, mint az normál szilárdságú anyagokra jellemző lineárisan rugalmas – keményedően képlékeny anyagmodell esetén.

Felhasználva a numerikus modellt, végrehajtottunk egy további paraméter-vizsgálatot is, amely keretében meghatároztuk 7 különböző keresztmetszetű zárt szelvényű oszlop numerikus kihajlási görbéit 0,2 és 2,0 viszonyított karcsúsági tartományban, figyelembe véve a tényleges szerkezeti jellemzőket (anyagtulajdonságok, sajátfeszültség) a szilárdsági osztály függvényében. A szimuláció során a következő paramétereket használtuk fel: (i) szinuszhullám alakú $L/1000$ -es amplitúdójú geometriai imperfekció minden anyagminőségre vonatkozóan, (ii) sajátfeszültség a jelen kutatásban kidolgozott sajátfeszültség-modell alapján, (iii) lineárisan rugalmas, folyási platóval rendelkező keményedően képlékenyen anyagmodell S460 anyagminőségig,

illetve Ramberg–Osgood típusú anyagmodell S500-tól S960 anyagminőségig. A numerikus szimuláció alapján az alábbi konklúziókat állapítottuk meg:

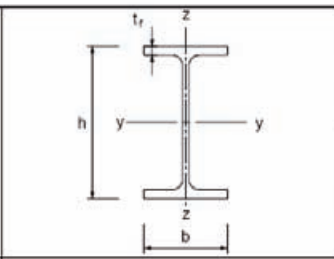
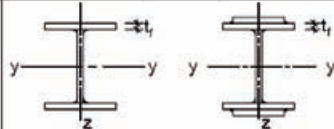
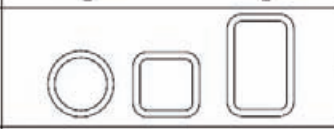
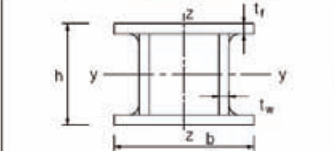
- 1., 2. és 3. keresztmetszeti osztályba tartozó keresztmetszetek esetén a szelvényekre vonatkozó kihajlási görbe független a vizsgált keresztmetszet geometriájától, valamennyi anyagminőség esetén (S235–S960),
- S235–S460 szilárdsági osztály tartományban az EN1993-1-1 által javasolt **c kihajlási görbe** megfelelő biztonsággal alkalmazható a kihajlási ellenállás meghatározására.
- S500–S700 szilárdsági osztály tartományban a várható kihajlási ellenállás minden esetben nagyobb, mint a **b kihajlási görbe** által megadott értékek, így ezen esetekben a b görbe használata javasolt.
- S960, illetve ennél magasabb szilárdsági osztály esetén a várható kihajlási teherbírási értéke meghaladja az **a kihajlási görbe** által kapható értékeket, így ezen szilárdságok esetén az a görbe használata javasolt.

A numerikus szimuláció eredményeit összehasonlítottuk egy, a szakirodalomban megtalálható módosított méretezési eljárással is [2]. A vizsgált módszert az eredményeink alapján újra kalibráltuk, és megállapítottuk, hogy az EN1993-1-1 szabványban szereplő eljárás megfelelő biztonsággal használható S235 és S960 szilárdsági osztály tartományban úgy, hogy az α imperfekció-paraméter értékét az alábbi egyenlet alapján módosítjuk:

$$\alpha = 0.49 \cdot \left(\frac{235 \text{ MPa}}{f_y} \right)^{0.6}$$

5.3. Méretezési eljárás fejlesztése

A numerikus szimuláció eredményei jó egyezést mutatnak a kísérleti eredményekkel és azok statisztikai kiértékelés alapján tett megállapításaival is. Az eredményeink alapján az EN1993-1-1 szabvány kihajlási görbeválasztó táblázatát a 13. ábrának megfelelően fejlesztettük tovább, mely kihajlási görbék a jelenlegi normál szilárdságú acélszerkezetekre kidolgozott méretezési görbékkel azonos megbízhatósági szintet garantálnak.

Cross section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve		S500-S700	S960
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460		
 Rolled sections	h/b > 1.2	y-y z-z	a	a ₀		
			b	a		
	h/b ≤ 1.2	y-y z-z	b	a		
			c	a		
 Welded I-sections	t _f ≤ 40 mm	y-y z-z	b	b		
	t _f > 40 mm	y-y z-z	c	c		
 Hollow sections	hot finished	any	a	a ₀	b	b
	cold formed	any	c	c		
 Welded box sections	generally (except as below)	any	b	b	b	a
	thick welds: a > 0,5t _f b/t _f < 30 h/t _w < 30	any	c	b		

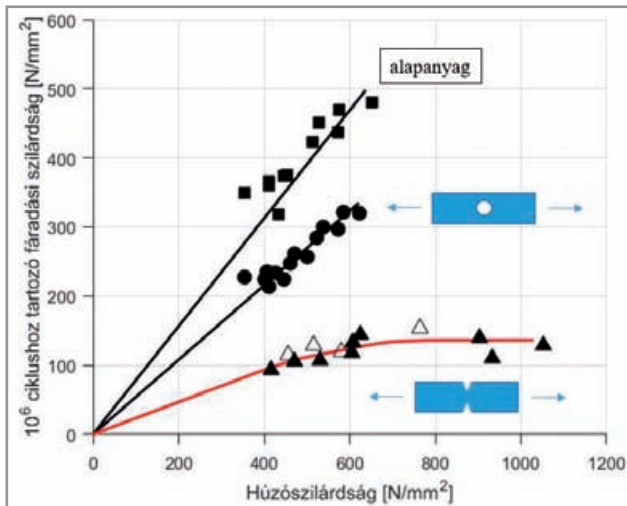
13. ábra:
Kihajlási görbeválasztó táblázat kiterjesztése nagy szilárdságú acélszerkezetre

6. NAGY SZILÁRDSÁGÚ ACÉL-SZERKEZETEK FÁRADÁSI JELLEMZŐI

6.1. Korábbi szakirodalmi vizsgálatok tapasztalatai

Számos, szakirodalomban publikált kísérleti kutatás azt mutatja, hogy a nagy teljesítőképességű acélananyag fáradási ellenállása lényegesen jobb, mint a normál szilárdsági osztályú acélananyagé, a fáradásiélettartam-növekedés a folyáshatárral közel lineáris. A hegesztett szerkezeteken végzett kísérletek azonban azt mutatják, hogy a nagy szilárdságú acélból készült próbatestek fáradási viselkedése nem okoz ugyanilyen mértékű fáradásiélettartam-növekedést. Egyes kísérleti eredmények azt igazolják, hogy a nagy szilárdságú acélananyagból készült próbatestek fáradási élettartama kismértékben magasabb, mások szerint nincs különbség a nagy szilárdságú és normál szilárdságú próbatestek fáradási viselkedése között. Más kísérleti eredmények azonban azt mutatják, hogy a 800 MPa alatti szilárdsági osztályok esetén kismértékben nő a fáradási élettartam, majd 800 MPa feletti szilárdsági osztályok esetén csökken [1], [2]. A vizsgált próbatestek fáradási élettartamát a folyáshatár függvényében a 14. ábra mutatja be. A magyarázat az alapanyag és a hegesztett szerkezetek gyökeresen eltérő viselkedésére jelenleg az, hogy a fáradt repedés kialakulásának két lényegesen különböző fázisa van. Az első a repedés kialakulásának két lényegesen különböző fázisa van. Az első a repedés kialakulásának két lényegesen különböző fázisa van. Az első a repedés kialakulásának két lényegesen különböző fázisa van.

A második fáradási fázis a repedésterjedési fázis, mely a kialakult repedés fásasztó teher hatására való folyamatos megnyílása és záródása hatására alakul ki jelentős képlékeny alakváltozásokkal. A repedésterjedés egészen addig képlékenyen zajlik, míg el nem éri a szerkezet instabilitásához tartozó kritikus repedéshosszt, majd rideg módon elszakad az anyag. A tudomány jelenlegi állása szerint a repedés kialakulásának



14. ábra: Folyáshatár hatása a fáradási élettartamra [1]

fázisa elsősorban az anyagszerkezettől, és az anyag mechanikai tulajdonságaitól függ, melynek fáradási viselkedésére a jól ismert Manson–Coffin, illetve a Monrow-összefüggéssel írható le. A repedésterjedési fázisban azonban az anyagjellemzők hatása lényegesen lecsökken és a fáradási viselkedést a repedésterjedés vezérli, melyben a fő befolyásoló paraméter a repedések geometriája (nagysága, alakja). Ez azt is jelenti, hogy ha a nagy teljesítőképességű acélok fáradási viselkedése lényegesen jobb, mint a normál szilárdságú acéloké, az csak a repedés kialakulási fázisban számít, és a repedésterjedési fázisban hatása lecsökken. Ennek következtében az alapanyagra vonatkozó fáradási kísérletek azért mutatnak kedvezőbb élettartamot a nagy teljesítőképességű acélok esetén, mert itt a repedéskialakulási fázis lényegesen hosszabb, ez a domináns a fáradási élettartam meghatározásánál. A hegesztett szerkezetek esetén azonban a hegesztés során kialakulnak a szerkezetben a mikrorepedések, így a fáradási élettartamot nem a repedéskialakulás, hanem a repedésterjedés határozza meg, melyre nincsenek számottevő hatással a nagy teljesítőképességű acél mechanikai jellemzői. Ennek a gondolatmenetnek az értelmében a normál és nagy szilárdságú acélszerkezetek fáradási viselkedése között számottevő különbség nem várható. Ebből következik, hogy hegesztett szerkezeteknél (hídszerkezetek mindig ilyenek) a hasznos teherből származó feszültség növekedés azt eredményezi, hogy a fáradási határállapot jelentősen korlátozza a nagy teljesítőképességű acélszerkezetek felhasználhatóságát. A kutatók ezt a korlátozást eddig 3 különböző módon próbálták feloldani:

- módosított részlettervezéssel, kedvezőbb részletosztályú megoldások alkalmazásával,
- a hegesztéstechnológia javításával, homogénebb varratkép és varratanyag, beégés csökkentésével,
- hegesztési varrat javító/módosító eljárások alkalmazásával.

Ugyanakkor a nagy szilárdságú acélszerkezetek esetén két fontos előny mégis megjelenik fáradás szempontjából, ami kedvezőbbé teheti a fáradási viselkedést. Az egyik előny, hogy kisebb vastagságú lemezekből lehet építeni a szerkezetet, ami kisebb varratok alkalmazását igényli, ami növeli a fáradási élettartamot. A másik előny, hogy nagy szilárdságú acélszerkezetek gyártását általában felkészültebb és jobb minőségellenőrzési rendszerrel rendelkező gyártók végzik, akiknek fejlett hegesztési eljárások állnak rendelkezésükre, ami szintén javítja a szerkezetek fáradási élettartamát. Nagyrészt ennek köszönhető, hogy számos tanulmány arra a következtetésre jut, hogy a nagy teljesítőképességű acélokból készült hegesztett szerkezetek fáradási élettartama lényegesen meghaladja a szabványos fáradási osztályok értékeit, azonban nem tudnak egyértelmű kapcsolatot kimutatni a folyáshatár és a fáradási élettartam között. Másik előnye a nagy teljesítőképességű acéloknak, hogy lényegesen jobb a szívós-

sági jellemzőik, mint a normál szilárdsági osztályú acéloknak. A szívósságnak viszont jelentős szerepe van a repedésterjedésben. Nagyobb szívóssággal rendelkező anyagban kisebb a repedésterjedés sebessége, mely hosszabb élettartamhoz és nagyobb globális megbízhatósági szinthez vezet, esetleges későbbi javítást tesz lehetővé, illetve csökkenti a repedés szerkezet összeomlására vonatkozó kockázatát.

6.2. Kísérleti vizsgálatok

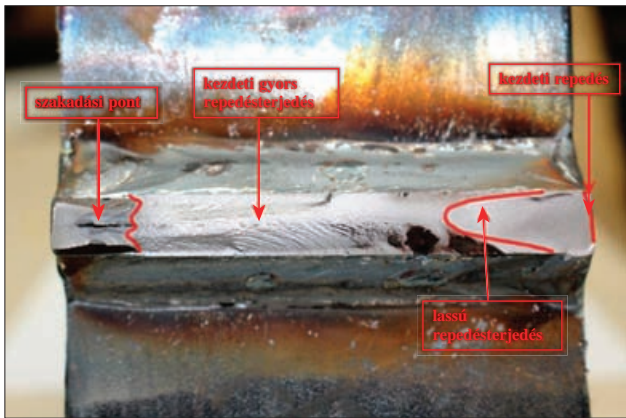
A BME Hidak és Szerkezetek Tanszék által a nagy szilárdságú acélszerkezetek témakörében végzett laboratóriumi fáradási kísérletsorozatnak hármast célja volt. Egyrészt célunk a nagy szilárdságú acélszerkezetek felsorolt kedvező tulajdonságainak vizsgálata és számszerű meghatározása néhány, az építőmérnöki gyakorlatban alkalmazott tipikus szerkezeti részlet esetén (alapanyag – referencia; csomólemez / keresztartó-bekötés a főtartóba; keresztirányú hegesztett bekötés). Az alapanyag fáradási viselkedését 3 különböző szilárdsági osztályú acél esetén (S235, S355, S420) vizsgáltuk a folyáshatár és a fáradási élettartam tendenciájának meghatározása érdekében. A fáradási kísérleteket húzó próbapálcá jellegű próbatesteken hajtottuk végre. A csomólemez-bekötés és a keresztirányú hegesztett kapcsolatok esetén a vizsgálat célja kettős. Egyrészt vizsgáltuk a mérethatás jelentőségét a nagy szilárdságú acélok fáradási viselkedésére, valamint a varratalak-módosítási eljárások közül vizsgáltuk a köszörülés hatását a fáradási élettartamra. Mindkét vizsgált szerkezeti részlethez referenciaként szolgál egy S235-ös acélszerkezetből készített, 18 mm lemezvastagságú próbatest. Ennek a fáradási élettartamához viszonyítjuk az S420 és S235 anyagból készült, 10 mm lemezvastagsággal készült próbatestek élettartamát. A vizsgálat célja az, hogy meghatározzuk, hogy a mérethatás milyen mértékben jelentkezik a vizsgált szerkezeti részleteknél normál és nagy szilárdságú acélszerkezetek esetén. Az alkalmazott lemezvastagság-csökkentés értéke megegyezik a folyáshatár arányával, így egymással equivalentes teherbírású próbatesteket vizsgáltunk, melyek hozzávetőlegesen megfelelnek a húzott elemekben a szilárdsági osztály növelésének megfelelő, várható lemezvastagság csökkenés mértékének. Ezenkívül mindkét szerkezeti részletnél a 10 mm lemezvastagságú próbatesteknél megvizsgáljuk, hogy amennyiben a varratalakat utólag köszörüléssel módosítjuk az IIW ajánlásainak megfelelően, akkor milyen mértékű fáradási élettartam-növekedés várható normál, illetve nagy szilárdságú acélszerkezetek esetén. Tekintettel a fáradási kísérletek ismert jelentős szórására, minden vizsgált geometriai és anyagi konfigurációt legalább 5 próbatesttel vizsgáltunk, melyek statisztikailag megbízhatóan kiértékelhetők. A vizsgált próbatestek képe és a kísérletben tapasztalt tipikus fáradási tönkremental a 15–17. ábrákon látható. A kísérletek során elszakadt próbatestek törésképét elemezve megállapíthatók a kezdeti repedések helyei, a repedés terjedésének iránya és az adott zónában a repedés terjedésének sebessége (lassú repedésterjedés / progresszív repedésterjedés / szakadás).



15. ábra: Keresztirányú bekötés vizsgálati próbatestje

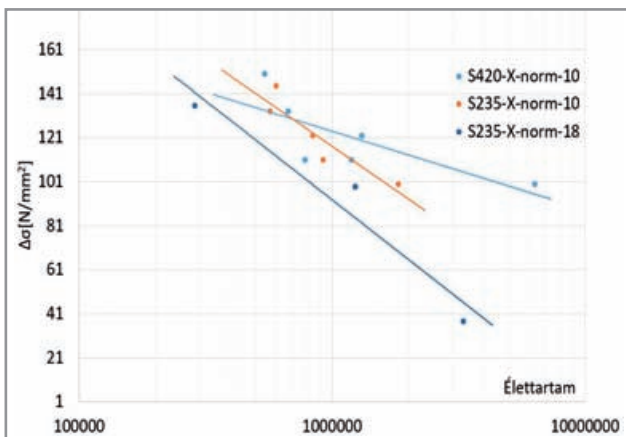


16. ábra: Keresztartó főtartóba való bekötésének vizsgálati próbatestje



17. ábra: Kísérleti töréskép, repedési zónák jelölésével

A számos kísérleti eredményből csupán néhányat közlünk a cikkben. A fáradási kísérletek a Hidak és Szerkezetek Tanszék Szerkezet és Anyagvizsgáló Laboratóriumában jelenleg is tartanak, az eredményeink folyamatosan bővülnek. A keresztirányú bekötés vizsgálatára végrehajtott kísérletek eredményeit a 18. ábra mutatja be az alkalmazott feszültségváltozási szint és a mért fáradási élettartam függvényében. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy az azonos anyagminőségű próbatestek esetén (S235-X-norm-10 és S235-X-norm-18) a görbék lefutása azonos, a logaritmikus ábrázolásban meredekségük közel azonos. A vastagabb $t = 18$ mm) próbatest fáradási élettartama nem éri el a vele azonos kialakítású, de vékonyabb elemekét ($t = 10$ mm). Illetve ennél a kialakításnál a nagyobb szilárdságú elemek fáradási ellenállása meghaladja a normál szilárdságú elemekét. Ennél is fontosabb, hogy a kísérleti pontokra illesztett görbék meredekségében is eltérés van a két anyagminőségű próbatest között. Jól láthatóan a magasabb szilárdsági osztály kísérleteihez tartozó görbe meredeksége kisebb, vagyis a nagyobb szilárdságból származó teherbírás-növekedés a feszültséglengés amplitúdójának csökkenésével, azaz az egyre magasabb ciklusszámmal egyre javul, mely különösen hídépítési szerkezetekben jelentős előnyt jelent.



18. ábra: Keresztirányú bekötés vizsgálatának eddigi eredményei

6.3. Következtetések

Az eddigi laboratóriumi vizsgálatok alapján látható, hogy bizonyos szerkezeti részletosztályok esetén (melyeknél a repedéskialakulási fázis dominál a teljes élettartamban) a nagy szilárdságú acélszerkezetek fáradási élettartama jelentősen meghaladhatja az alacsony szilárdságú acélszerkezetek fáradási élettartamát az alacsony feszültséglengési tartományban, mely jellemző a hídépítési gyakorlatban. A kísérletek azt mutatják, hogy ezen szerkezeti részletosztályok esetén az S-N görbék meredeksége a szilárdsági osztály növelésével csökken, mely kedvezőbb fáradási élettartamhoz és gazdaságosabb tervezéshez vezet. Természetesen a fáradásvizsgálatnál megszokott jelentős bizonytalanság miatt végleges következtetések levonásáig további kísérleti vizsgálatokra van szükség, melyek jelenleg is zajlanak.

Ezenkívül minden kísérleti eredmény igazolta, hogy azon szerkezeti részleteknél is, melyeknél a szilárdsági osztály növelésével nem nő jelentős mértékben a fáradási élettartam (repedésterjedési szakasz a domináns) a mérhető fáradási élettartamot befolyásoló hatásának következtében az egyenteherbírású szerkezetek esetén a nagy szilárdságú acélszerkezetek fáradási élettartama meghaladhatja az alacsony szilárdságú acélszerkezetek készült szerkezetek élettartamát. Mindezek mellett a nemzetközi szakirodalom is, és a saját kísérleteink is azt igazolják, hogy jelentős mértékű fáradási élettartam növekedés csak az utólagos varratmódosító módszerek alkalmazása esetén érhető el, mely a nagy szilárdságú acélszerkezetek gyártásával párhuzamosan nagy ütemben fejlődik. Jelenleg ilyen varratmódosító technikák elemzésével (pl. utólagos varratköszörülés) is foglalkozunk, melyek laboratóriumi kísérleti vizsgálatai jelenleg is folynak.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék által az elmúlt 3–4 évben a nagy szilárdságú acélszerkezetek területén végzett jelentősebb kutatási eredményeket és azok gyakorlati tervezésben való alkalmazhatóságát mutatja be. Jelenleg a nagy szilárdságú acélszerkezetek széles körben való elterjedését a kedvezőtlen stabilitási és fáradási méretezési eljárások korlátozzák. Kutatásaink ezért ennek a két területnek a fejlesztésre irányultak. A nagy szilárdságú acél zárt szelvényű oszlopok kihajlási görbeválasztó táblázatát kiterjesztettük S235–S960 szilárdsági osztály tartományra, mely lehetővé teszi az eredményeink egyszerű és gazdaságos alkalmazását a hétköznapi tervezési gyakorlatban. Ezenkívül a rendelkezésünkre álló szakirodalmi adatok alapján egyedülálló módon a jelenleg elérhető teljes acél szilárdsági tartományban (S235–S960) meghatároztuk a hegesztett zárt szelvényekben kialakuló sajátfeszültségek nagyságát, rámutattunk a szilárdsági osztálytól való függésekre, illetve kidolgoztunk egy olyan sajátfeszültség-modellt, mely alkalmazható végeelem alapú méretezési eljárásokban. Ezenkívül 2 tipikus hídépítési szerkezeti részleten végzett kísérletek alapján elemeztük a nagy szilárdságú és alacsony szilárdságú acélszerkezetek fáradási élettartama közti különbségeket. Rámutattunk a nagy szilárdságú acélszerkezetek fáradási viselkedését kedvezően befolyásoló tényezőkre (mérethatás, nagyobb szívósság), illetve bemutattuk azt a kutatási irányt, mely a varratalak-módosító technikák alkalmazásával teszi még jobban kihasználhatóvá a nagy szilárdságú acélszerkezeteket. Kutatásaink igazodnak és jelentősen hozzájárulnak a napjainkban Európában folyó nagy szilárdságú acélszerkezetek témakörében végzett fejlesztésekhez és elősegítik a nagy szilárdságú acélszerkezetek gazdaságosabb felhasználását. A kutatást a nagy szilárdságú acélszerkezetek témájában a BRIDGEBEAM nevű ipari K+F projekt keretében folytatjuk, ahol nagy teljesítőképességű öszvér- és hibrid hídgerenda fejlesztésben alkalmazzuk a kutatási eredményeinket.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben bemutatott kutatást részben a RUOSTE: Rules On High-Strength Steel; RFCS Project RFSR-CT-2012-00036, keretében végeztük, melyet az EU RFCS Research Fund for Coal and Steel támogatott. A kutatásainkat másrésztől a STEELBEAM K+F projekt (No. PIAC_13-1-2013-0160) és a BRIDGEBEAM K+F projekt (No. GINOP-2.1.1-15-2015-00659) keretében végeztük, melyért a szerző ezúton is köszönetet mond. A kutatást ezenkívül támogatta az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíja.

A kutatásban számos tanszéki kolléga és doktorandusz vett részt. A cikkben név szerint csak azokat említem meg, akik PhD kutatási témája az adott témakörhöz tartozik. A nagy szilárdságú acél oszlopok sajátfeszültség- és kihajlási ellenállásának meghatározását Somodi Balázs doktoranduszommal végeztük. A hegesztésszimulációs számításokat Kollár Dénes doktoranduszommal hajtottuk végre, míg a fáradási kísérleteket Mecséri Balázssal együtt végeztük el. Várhatóan a kutatási témákból a következő években doktori disszertációk készülnek. Ezúton is köszönöm munkájukat. Ezenkívül köszönet jár minden kollégámnak, a labor személyzetének, akik részt vettek a *RUOSTE*, a *STEELBEAM* és a *BRIDGEBEAM* projektekben, és munkájukkal hozzájárultak eredményeinkhez. Külön köszönet jár Dr. Dunai László professzor úrnak, aki irányította a projektekben végzett kutatómunkát.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] E. Gogou: Use of high strength steel grades for economical bridge design, Master thesis study, TU Delft, Holland, 2012.
- [2] IABSE, AIPC, IVBH: Use and Application of High-Performance Steels for Steel Structures. Structural Engineering Documents 8. Chapter 5.3., 2005.
- [3] EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings. CEN. 2009.
- [4] EN 1993-1-12. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700. CEN. 2007.
- [5] H. Ban, G. Shi, Y. Shi, Y. Wang, Residual stress of 460MPa high strength steel welded box section-Experimental investigation and modelling, *Thin-Walled Structures* 64 (2013) 73-82.
- [6] M. Clarin, High strength steel local buckling and residual stresses, Licentiate thesis, Lulea University of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, (2004).
- [7] H. Ban, G. Shi, Y. Shi, M.A. Bradford, Experimental investigation of the overall buckling behaviour of 960 MPa high strength steel columns, *Journal of Constructional Steel Research* 88 (2013) 256-266.