

# Nagyszilárdságú acélok a hídépítésben

Dr. Kövesdi Balázs, egyetemi docens  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidak és Szerkezetek Tanszék  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.  
E-mail: kovesdi.balazs@epito.bme.hu, telefon: +36-30-3361384

Dr. Kövesdi Balázs 2007-ben az építőmérnöki oklevél megszerzését követően a BME Hidak és Szerkezetek Tanszéken lett doktori ösztöndíjas, ahol 2010-ben védte meg doktori disszertációját. 2010-ben adjunktusi, 2014-ben docensi kinevezést kapott, jelenleg a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék oktatója. Oktatói és kutatói tevékenységének középpontjában az acél-, és öszvérhidak szerkezeti, stabilitási és fáradási kérdései állnak. Az elmúlt 5 évben kutatási tevékenységének meghatározó területe a nagyszilárdságú acélszerkezetek hídépítési alkalmazása, szerkezeti viselkedésének és gazdaságosságának elemzése.

## 1. Bevezetés

Napjainkban a nagyszilárdságú acél jelenti az építőmérnöki gyakorlatban az egyik legújabb anyagszerkezeti újítást, melyet négy globális cél mozgat [1]:

- *gazdaságosság*: a szilárdság növelésével a szerkezeti méretek csökkenthetők, mely megtakarítást jelenthet gyártási és kivitelezési oldalon;
- *építészeti megjelenés*: a szerkezet méreteinek csökkentésével karcsúbb, esztétikusabb, szabadabb formavilágú szerkezetek építhetők, melyek jobban illeszthetők az adott környezetbe;
- *környezettudatosság*: kisebb anyagfelhasználás kisebb káros anyag kibocsátáshoz vezet, mind gyártásban, szállásban, szerelésben;
- *biztonság*: modern nagyszilárdságú acél anyagok nem csak nagyobb szilárdsági jellemzőkkel rendelkeznek, hanem nagyobb a környezeti ellenálló képességük is, jobb a szívóssági tulajdonságuk, mely eredményeként nagyobb biztonsággal lehet felhasználni ezeket az anyagokat építőmérnöki szerkezetekben (modern off-shore szerkezetek a legjobb példák ezen a téren a nagyszilárdságú acél felhasználására).

A nagyszilárdságú acél anyagok alkalmazása már széles körben elterjedt a járműiparban, mobildaru szerkezeteknél, offshore szerkezetekben, illetve a hajóiparban. Építőmérnöki felhasználása azonban ezeknek az új és nagy teljesítőképességű acél anyagoknak napjainkban még csekély, azonban egyre 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 nagyszilárdságú acél felhasználásának elterjedését hivatottak szolgálni számos nyugat-európai, amerikai és ázsiai egyetemen nagy ütemben zajlanak, köztük a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén is. Jelenleg a világon a nagyszilárdságú acél építőmérnöki szerkezetek esetén leggyakrabban nagy fesztávú hídszerkezetekben kerül alkalmazásra súlycsökkentés és ezáltal igénybevétel csökkentés céljából. Másik lehetséges, manapság gazdaságosnak tűnő felhasználási terület a szintén nagy fesztávú térbeli felületszerkezetű rácsos tartók, esetleg rácsos gerendák.

Korábban a nagyszilárdságú acél termékek csak lemez formájában voltak kaphatók, napjainkban azonban megjelentek a melegen hengerelt, vagy hidegen alakított acélszerkezeti gyártmányok is (I-szelvények, zárt szelvények) nagyszilárdságú acél anyagból. Elsősorban a zárt szelvények alkalmazása terjedt el az acél rácsos tartók körében, ahol a nagyszilárdságú acél számos előnyös tulajdonsága kihasználható. Egyrészt a nagyobb szilárdsági jellemzők keresztmetszeti méretcsökkentést tesznek lehetővé, amely súlycsökkenéshez, ezáltal

igénybevétel csökkenéshez vezet, mely versenyképesebb szerkezetek előállítását teszi lehetővé. Ezen kívül a keresztmetszeti méretcsökkenés a festendő felület és a tűzvédelmi bevonat csökkenését is jelenti, ami tovább csökkenti az össz-építési költséget. 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 nagyszilárdságú acélok gyártása, hengerlése, hegesztése a folyáshatárhoz képest kisebb sajátfeszültséget eredményez a normál szilárdságú acélokhoz képest, ezáltal lényegesen kedvezőbb lehet a nagyszilárdságú acél anyagból készült szerkezeti elemek stabilitási viselkedése. Ezen kívül a hagyományos méretezési eljárások alkalmazása jelentősen alul becsülheti a tényleges teherbírást, mely rontja a gazdaságos felhasználást. Ennek érdekében a globális és lokális stabilitási jelenség és teherbírás meghatározása nagyszilárdságú acélból készült szerkezeti elemek esetén felülvizsgálatra szorul. Korábbi saját és nemzetközi szakirodalomban talált kutatási eredményeink azt igazolják, hogy a különösen nagyszilárdságú acél anyagok (S500-S960) stabilitási ellenállása lényegesen meghaladja a hagyományos (S235-S355) acél anyagból készült szerkezetek teherbírását.

A nagyszilárdságú acél világviszonylatban legjelentősebb építőipari felhasználási területe a nagy fesztávú hídszerkezet (pl: *Tokyo Gate Bridge – 1. ábra*). Napjainkig az építőmérnöki célból felhasznált nagyszilárdságú acélok jelentős része hídszerkezetekben lett alkalmazva. A nagy fesztávolságú hídszerkezeteket a jelentős önsúly/hasznos teher arány jellemzi, ami azt jelenti, hogy önsúlycsökkentéssel jelentős maximális igénybevétel csökkentést lehet elérni, ami további anyagfelhasználás csökkenéshez vezethet. A keresztmetszeti méretek csökkentése azonban magával vonja a szerkezet merevségének csökkenését, valamint a járműteherből származó feszültségflingések nagyságának növekedését. Az anyagfelhasználás további csökkentésének általában a használhatósági, valamint a fáradási határállapot szab korlátot, ami azt is jelenti, hogy a hídépítésben alkalmazott nagyszilárdságú acélszerkezetek esetén szinte mindig a használhatósági és/vagy fáradási határállapot a mértékadó. Mivel a fáradásvizsgálati eljárások és méretezési módszerek függetlenek az acél anyag szilárdsági tulajdonságától, ezért elengedhetetlen a nagyszilárdságú acél hídszerkezetek gazdaságos alkalmazáshoz, hogy tovább fejlesszük a tervezésükhöz alkalmazott méretezési eljárásokat. 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.



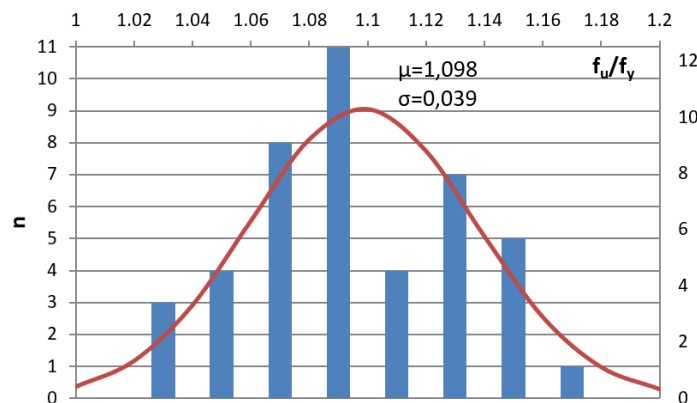
*1. ábra: Tokyo Gate Bridge oldalnézete – BHS500 és BHS700 anyagból készült [1].*

Magyarországon jelenleg S235-S355 (S420/S460) acél anyagok érhetők el széles körben a piacon. Ugyanakkor külföldön már szélesebb körben elérhetők az S500 – S960 acél anyagból készült szerkezeti elemek is, így középtávon várható ezen acél anyagok hazai építőipari térnyerése is.

## 2. Nagyszilárdságú acélok anyagjellemzői

A nagyszilárdságú acélok fejlesztése már az 1950-es években megindult. Az első nagyszilárdságú acélok esetén ugyan a nagy (>500 MPa) szilárdságot sikerült elérni, de közben más jellemzői az acélnak nem voltak kedvezőek, mint például a hegeszthetősége, korrózióállósága, vagy duktilitása. Ugyanakkor a mai nagy szilárdságú acélok esetén sok hátrányos tulajdonságot sikerült felszámolni az anyagtudomány fejlődésének köszönhetően. Az úgynevezett nagy teljesítőképességű acéloknak már nem csak a szilárdsága magasabb, hanem kedvezőbb a hegeszthetősége, valamint a korrózióállósága is. A továbbiakban bemutatjuk azokat a legfontosabb jellemzőket, amelyekben szignifikánsan eltér a nagyszilárdságú acél anyag viselkedése a normál szilárdságú acéloktól.

1. Megnövekedett szilárdság: az általánosan alkalmazott S235 / S355 acélokhöz képest akár 3-4-szeres szilárdsági növekedés is elérhető (S960 / S1100).
2. Nincs folyási plató, emiatt az anyag folyáshatárát a 0,2%-os maradó nyúláshoz tartozó egyezményes folyáshatárral jellemezzük.
3. Kisebb a felkeményedési mérték: míg az EN 1993-1-1 [2] előírásai alapján S460-as anyagminőségig a szakítószilárdság és a folyáshatár hányadosának nagyobbnak kell lennie, mint 1,10 ( $f_u/f_y \geq 1,10$ ), addig ezt az értéket a nagyszilárdságú acélok nem minden esetben teljesítik. A BME korábbi anyagvizsgálati kísérletei, melyet 22 nagyszilárdságú acél anyagon végzett (összesen 42 db próbapálcán különböző gyártó, anyagminőség vagy anyagvastagság esetén), azt mutatták, hogy a vizsgált nagyszilárdságú acél anyagok átlagos  $f_u/f_y$  arányának átlaga kisebb, mint 1,1.
4. Az EN 1993-1-12 [3] előírása alapján az S460 és S700 közötti acél anyagminőségek esetén a minimális  $f_u/f_y$  arány határértéke 1,05. A korábban a BME által vizsgált anyagok nagy része ezt a feltételt kielégíti. A vizsgált próbatestek statisztikai kiértékelését a 2. ábra mutatja be.



2. 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 ( $\epsilon_u \geq 15\epsilon_y = 15f_y/E$ ). Az S460-tól S700-ig terjedő anyagminőségek esetén az EN 1993-1-12 az első feltételt 10%-ra csökkenti, míg a másodikat változatlanul hagyja. Saját laboratóriumi kísérleti eredményeink azt mutatták, hogy 10%-os szakadónyúlást az S500-as és S700-as acélok minden esetben teljesítették.

A képlékenységi követelmények biztosítják a törés jellegű 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 következtében jelentősen lecsökken a duktilitás mértéke. Mivel az alacsony szilárdságú acélszerkezetekre kidolgozott méretezési eljárások közül számos kévelt kihasználja a képlékeny teherbírási tartalékot, illetve a képlékeny tartományban bekövetkező feszültségátrendeződést, ezért az eltérő anyagjellemzőkkel bíró nagyszilárdságú acélszerkezetek esetén ezen méretezési eljárások felülvizsgálatra, pontosításra szorulnak.

### **3. Nagyszilárdságú acélszerkezetek előnyei, jellemzői, gazdaságossága**

Nagyszilárdságú acélszerkezetek napjainkig elsősorban hídépítésben terjedtek el, magasépítési felhasználásuk csekély. Költségelemzések azt mutatják, hogy a jelenlegi árszinteken még egyértelműen nem igazolható a nagyszilárdságú acélszerkezet gazdaságossága sem hídépítésben, sem magasépítésben. Hidaknál azonban előtérbe kerülhetnek előnyös tulajdonságai, önsúly csökkentés és ezáltal igénybevétel csökkentés révén, illetve szükség esetén a szerkezeti magasság csökkentése érdekében. A nagyszilárdságú acélszerkezetek előnyei a hagyományos szilárdsági osztályú szerkezetekkel szemben a következők:

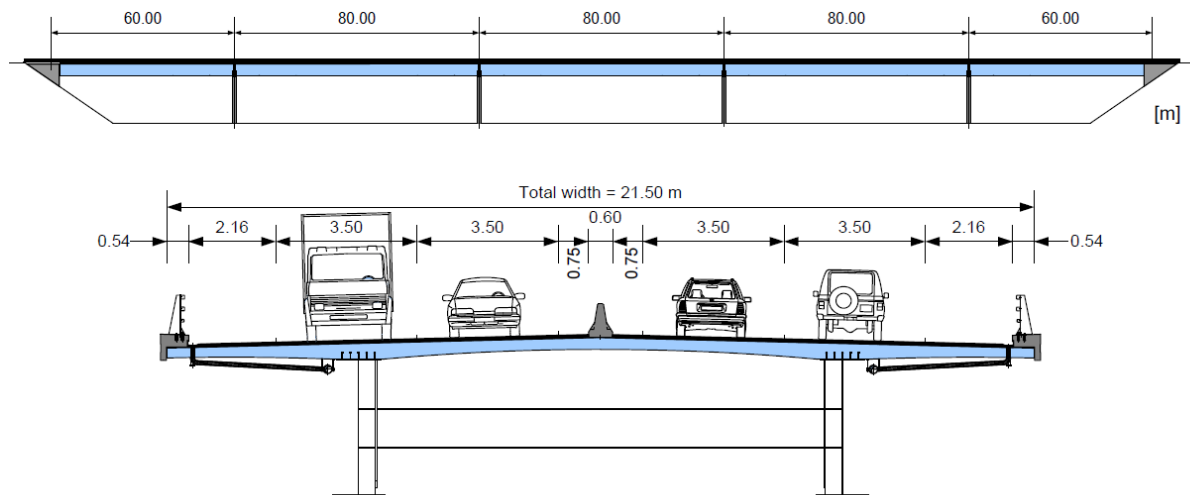
- kisebb önsúly és anyagmennyiség,
- karcsúbb és ezáltal kedvezőbb megjelenésű szerkezetek,
- fesztávnyövelés és ezáltal esetleg pillérszám csökkentés lehetősége,
- kisebb szerelési költség (kisebb varratméretek vékonyabb lemezek miatt, kisebb előmelegítési igény kedvezőbb hegeszthetőség miatt),
- egyszerűbb szállíthatóság és összeszerelhetőség a kisebb önsúly következtében,
- kedvezőbb szívóssági tulajdonság csökkenti a ridegtörési kockázatot, és növeli a szerkezet megbízhatóságát az élettartama alatt,
- kedvezőbb fenntarthatóság, jobb korrózióállóság, mely növeli a szerkezet élettartamát.

Több korábbi nemzetközi szakirodalomban publikált tanulmány is arra az eredményre jutott, hogy a nagyszilárdságú acél anyag más, alacsonyabb szilárdságú anyaggal együtt lehet igazán gazdaságos, például hibrid tartókban (övlemez nagyszilárdságú, gerinclemez normál szilárdságú acélból készül), vagy öszvér szerkezetekben felső vasbeton pályalemezzel, ahol a nagyszilárdságú szerkezeti elemek dominánsan húzóttak [4]. További felhasználási alternatíva, hogy szerkezetek bizonyos részei nagyszilárdságú, bizonyos részei normál szilárdságú acélból készülnek (például nagy fesztávolságú hidak mezőközépi része nagyszilárdságú acélból, támasz közeli 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 acél anyag 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 a nagy teljesítőképességű acél anyagok felhasználásával a várható költségcsökkenés meghatározására [1]. Két kialakítású hídszerkezetet vizsgáltak, egy 53 m fesztávolságú két főtartós autópályahídat és egy rácsos, ortotróp pályaszerkezettel rendelkező 69 m fesztávolságú hídat. A számítások azt mutatták, hogy a kis fesztávú szerkezetek esetén az S355-ös acél anyaghoz 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 S600-as acél anyagig jelentősen csökkenthető a szerkezet önsúlya és ezáltal az anyagfelhasználás mennyisége.

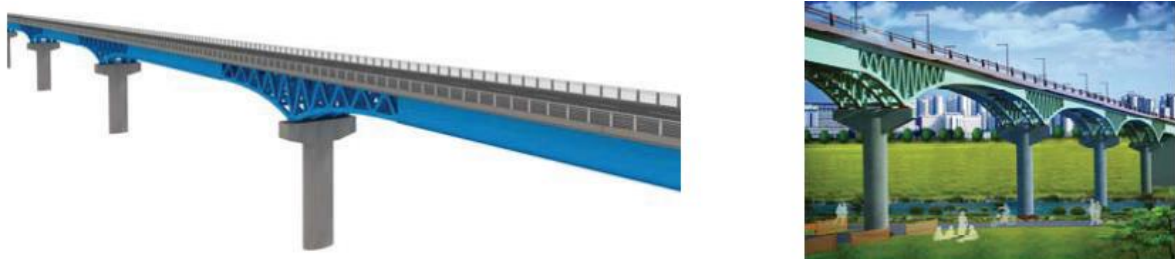
Jelentős kutatást és gazdaságossági számításokat végeztek Portugáliában 2014-2018 között S690-es acél anyag közúti hidépítésben való alkalmazására [5]. Egy összehasonlító tanulmány készült egy 21,5 m kocspálya szélességű, 80 m fesztávolságú folytatódó többtámaszú, két főtartós nyitott keresztmetszetű öszvérszerkezetben a nagyszilárdságú acél anyag alkalmazásának elemzésére. A kutatók két szerkezeti alternatívát dolgoztak ki és hasonlították össze, melyből az első S355 NL, a második variáns S690 QL acél anyagból készült. A gazdaságossági számításhoz alkalmazott szerkezet geometriáját a 3. ábra mutatja be.



3. ábra: Gazdaságossági számításhoz alkalmazott öszvérhid geometriája.

A számítás eredménye azt mutatta, hogy a nagyszilárdságú acél alkalmazásával közel 25%-os acélsúly megtakarítás érhető el. Ezen kívül a kutatók még arra jutottak, hogy a nagyszilárdságú acél alkalmazásának révén a megtervezett hídszerkezet lemezei horpadás szempontjából érzékenyebbek, a lemezvastagság csökkentések következtében ugyanakkor ridegtöréssel szemben kismértékben kedvezőbbek lettek. A mértékadó határállapot a nagyszilárdságú acél alkalmazása esetén a fáradás volt a 80 m-es fesztáv ellenére. További előnye a nagyszilárdságú variánsnak, hogy a tompavarratok mennyisége a hídban a lemezvastagságok csökkenése miatt jelentősen csökkent (közel 35%-kal), mely jelentős építési költségcsökkenéshez vezethet.

2011-ben koreai kutatók igyekeztek optimalizálni a nagyszilárdságú acél anyag felhasználását hídszerkezetekben [6]. Három különböző acél anyagot vizsgáltak (S500, S600 és S800-as acél anyagokat). Az optimalizálás során kidolgozott öszvér szerkezeti variánst az 4. ábra mutatja be, mely kombinálja a rácsos szerkezeti kialakítást a tömör gerincű tartókkal.



4. ábra: Gazdaságossági számítással optimalizált hídszerkezeti megoldás [6].

#### 4. Fáradási specifikumok és fáradási élettartamot növelő eljárások

Mivel a nagy teljesítőképességű hegesztett acélszerkezetek folyáshatára és fáradási élettartama között a laboratóriumi kísérletek alapján az eddigi kutatások eredményei alapján nem lehetett egyértelmű összefüggést találni, a nagy teljesítőképességű acélok alkalmazásával együtt elterjedtek a fáradási élettartamot javító eljárások. A nemzetközi szakirodalom [7] és [9] a fáradási élettartam növelő technikáknak három csoportját különbözteti meg, melyekről magyar nyelven [8] ad átfogó leírást. A három csoport a következő:

- varratalak módosítása (éles sarkok, mikrohibák lemunkálása – feszültség-koncentráció csökkentése érdekében),
- varratalak módosítása – maradó feszültségek csökkentése,
- környezeti hatások minimalizálása.

Az első csoportba a következő eljárások tartoznak:

- tompavarratok dudorjának síkba munkálása,
- sarok-, és tompavarratok varratszegélyének kiköszörülése,
- varratszegély újraolvasztása (AWI, plazma, vagy lézer technológiával).

A második csoportba tartoznak a varratalak mechanikai deformálásának módszerei:

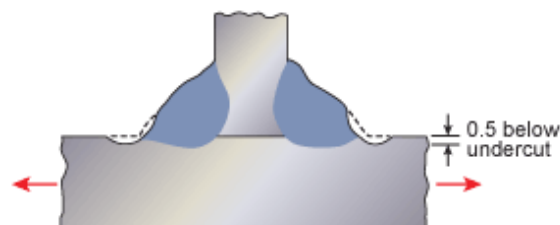
- gépi kalapálás (hammer peening),
- tűskézés/verőcézés (needle peening),
- szemcseszórás,
- nagyfrekvenciás kalapálás (Ultrasonic impact treatment, UIT).

A harmadik csoportba az aktív és passzív korrózióvédelem tartozik.

A laboratóriumi vizsgálatok alapján ezek az élettartamot növelő eljárások általában a nagy ismétlésszámú fáradási tartományban tudnak hatékonyak lenni és jelentős fáradási élettartam növekedést elérni. Ezek az eljárások azoknál a szerkezeti részletosztályoknál hatékonyak, melyeknél a fáradt repedés a varratszegélytől indul [6]. Azon szerkezeti kialakításoknál, melyeknél varratrepedés a jellemző tönkremeneteli mód, a fent felsorolt eljárások csak kis hatékonysággal alkalmazhatók. A nemzetközi szakirodalomban található fáradási ellenállást növelő technikák közül a jelen cikkben hármát mutatunk be.

#### Szegélyköszörülés

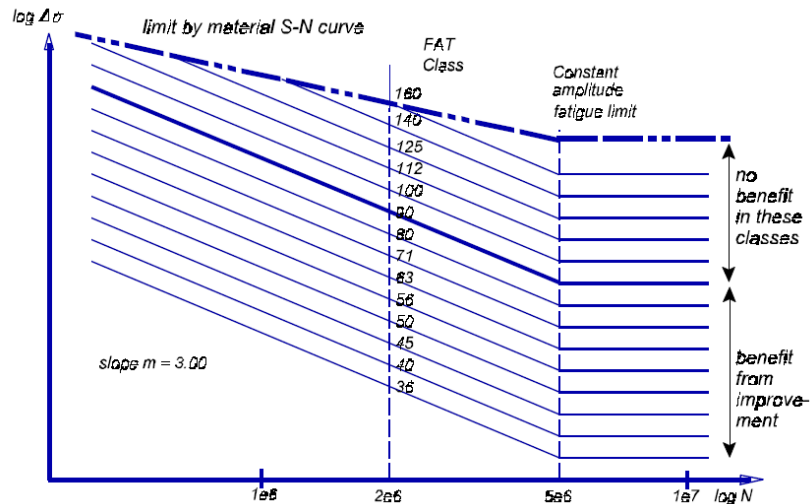
A szegélyköszörülés célja a varratalak módosítása révén a feszültségkoncentráció csökkentése, a szegélybeégések, a hideg ráfolyások, a mikrorepedések megszüntetése és kedvezőbb varratalak profil kialakítása. Az eredeti és a szegélyköszörüléssel módosított varratalakot és a köszörülés javasolt méretét az 5. ábra mutatja be. A kiköszörülés mértékének minimálisan 0,5 mm-nek kell lennie, 40 mm vastag lemezeken a maximális mérete a lemezvastagság 7%-a lehet. A 40 mm-nél vastagabb lemezek esetén a szegélyköszörülés mélysége maximum 3 mm lehet [9].



5. ábra: Eredeti és szegélyköszörüléssel módosított varratalak [9].

A kiköszörülés sugarát a köszörülési mélység és a lemezvastagság függvényében kell meghatározni. A köszörülési sugár minimális mértékének  $r/t \geq 0,25$  és  $r/d \geq 4$  összefüggéseket kell kielégítenie. Ennek megfelelően egy 10 mm vastag lemez és 5 mm mély köszörülési mérték

esetén a köszörülési sugárnak 2,5 mm-nél nagyobbak kell lennie. A szegélyköszörüléssel a fáradási osztály az IIW ajánlása alapján [7] az eredeti fáradási osztály 1,3-szorosára növelhető S235 – S355 acélok esetén (mely 2,2-szeres élettartam növekedésnek felel meg  $m=3$ -mal számolva). Ennél magasabb szilárdsági osztályú szerkezetek esetén a növelő tényező értéke 1,5 (mely 3,4-szeres élettartam növekedésnek felel meg  $m=3$ -mal számolva) [8].

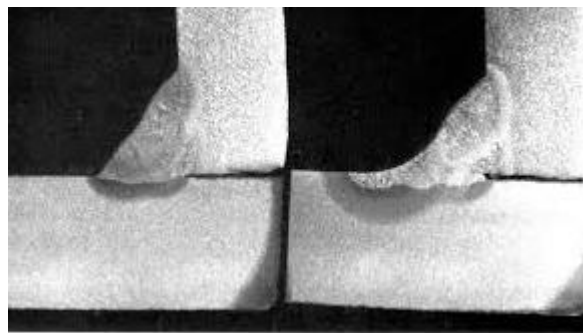


6. ábra: Köszörülés fáradási osztályt módosító hatása [9].

Ez a varratjavító eljárás csak 90-es részletosztályig alkalmazható (6. ábra), mert ennél magasabb részletosztályok már nem a varrat szegélyétől kiinduló repedésekre vonatkoznak. Ennek megfelelően a varratjavítással maximálisan 112-es fáradási osztály érhető el.

### AWI újraolvasztás

A varratszegélynél lévő hibák nem csak köszörüléssel, hanem AWI újraolvasztással is javíthatók. Az újraolvasztás hagyományos AWI hegesztőgéppel történik, amit hegesztőhuzal nélkül alkalmaznak a varratjavítás során. Az IIW ajánlásaiban pontosan rögzített hegesztési paraméter beállításokat adnak meg a pontos hőbeviteli mennyiség meghatározása és a kedvező varratalak elérése érdekében [8]. Egy jellemző eredeti és egy újraolvasztás utáni varratkép látható a 7. ábrán.



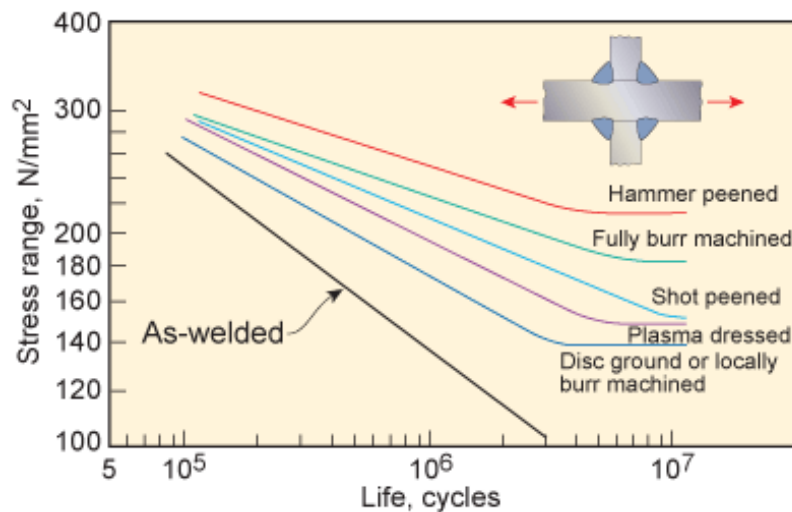
7. ábra: Jellemző eredeti és újraolvasztás utáni varratalak [9].

Megjegyzendő, hogy az AWI újraolvasztás technikája nagyon érzékeny a szennyeződésekre, melyek az újraolvasztás során bekerülhetnek a varratba, illetve az alapanyagba. Fontos, hogy az újraolvasztás előtt a felületről és környezetéből minden szennyeződést el kell távolítani (festék, homok, szemcseszórás, stb...) csiszolással, vagy más módon [8]. Továbbá ezzel a varratalak módosító eljárással is csak maximálisan 90-es fáradási osztályú szerkezeti részletek javíthatók. Az AWI újraolvasztással a fáradási osztály az IIW ajánlása alapján [9] az eredeti

fáradási osztály 1,3-szorosára növelhető S235 – S355 acélok esetén, ennél magasabb szilárdsági osztályú szerkezetek esetén a növelő tényező értéke 1,5.

### **Kalapácsolás és verőcézés**

A kalapácsolás és verőcézés varratjavító technikák célja a varratban lévő húzó sajátfeszültségek megszüntetése. Ezen kívül a nagy erejű, nagy sebességű kalapálás zárja a mikrorepedéseket, és képlékeny alakváltozást hoz létre a varratszegély felületén. Ennek eredményeként a nyomófeszültségek semlegesítik a fáradás szempontjából kedvezőtlen húzófeszültségeket, ezáltal késleltetik a fáradt repedések kialakulását. Emellett a varratprofil is javul a képlékeny alakváltozással és a feszültségkoncentráció is csökken a mikrorepedések zárásával. Kalapácsolásnál fontos megjegyezni, hogy a sajátfeszültségek változásával változik a feszültségváltozás arányszáma is. Ismert, hogy  $R=0,5$  értéknél a legnagyobb a szerkezetek fáradási élettartama, mely egyre csökken  $R=0$ , illetve  $R=-1$  irányba. Mivel azonban a kalapácsolással nyomó sajátfeszültséget viszünk a szerkezetbe, a feszültségváltozási tartományt az  $R=0,5$  irányából az  $R=-1$  irányába mozdítjuk el, mely lényegesen kedvezőtlenebb fáradási viselkedést eredményez. A nagyszilárdságú acélból ( $f_y > 355$  MPa) készült hegesztett szerkezetek legmagasabb fáradási osztálya kalapácsolás és verőcézés révén is egyaránt a 125-ös fáradási osztály lehet. Ugyanakkor ez az egyik leghatékonyabb varratmódosító eljárás, amit a 8. ábra is szemléltet. A diagramon látható, hogy a fáradási tartamszilárdság a varratmódosító eljárás révén jelentősen javul és a jellemző S-N görbe nem csak párhuzamosan eltolódik, hanem a mereksége is megváltozik, mely különösen hatékony főleg a kis feszültséglengéssel terhelt hídszerkezetek esetén.



8. ábra: Fáradási élettartam növelési lehetőségek hatékonysága [9].

## **5. Nagyszilárdságú acélok alkalmazási példái és az alkalmazás előnyei**

Ebben a fejezetben bemutatok néhány, a világ különböző pontján alkalmazott nagyszilárdságú acél felhasználási példát és bemutatom a hozzájuk kötődő előnyöket a [10] szakirodalom alapján. Megjegyzendő, hogy Magyarországon is többször alkalmaztak tervezők az elmúlt években nagyszilárdságú acélt hídépítésben (pl: Pentele híd – Dunaújváros, Hárosi Duna-híd betolópályája, M30 sz. főút Sajó-híd), ugyanakkor a jelen cikkben kizárólag a külföldi alkalmazásokat ismeretem, melyek talán kevésbé ismertek az olvasó számára.

### ***Fast Bridge 48 (katonai hídszerkezet)***

Fast Bridge 48 egy 48 m fesztávú katonai célra kifejlesztett szerkezet, melyet a NATO szabványainak megfelelően dolgoztak ki. A szerkezetet különösen nagyszilárdságú acélból



tervezték S960 és S1100 anyagok felhasználásával. A szerkezet kevesebb, mint 90 perc alatt összeszerelhető és használatba vehető. A híd üzemszerű állapotát a 9. ábra mutatja be.



9. ábra: Fast Bridge 48 összeszerelt és üzem közbeni állapotban [10].

A szerkezet 8 m-es modulokból áll, ennek megfelelően 32 m és 48 m hosszú szerkezet szerelhető össze belőle. A szerkezet szélessége 4 m, szerkezeti magassága 1,6 m. A pályaszerkezet 5 mm vastag S1100 szilárdsági osztályú acél anyagból készült. A rácsos tartó alsó övei S460 szilárdságú négyzetes zárt szelvények. A modulokat összekapcsoló csomólemezek S960 szilárdsági osztályú 50 mm vastag lemezekből készültek. Ennél a hídszerkezethnél a nagy teljesítőképességű acélok előnyei a következők:

- súlycsökkentés, ami a szállíthatóságot és szerelést könnyíti,
- kedvezőbb élettartam korrózióállóság miatt,
- csökkentett építési költség és gyorsabb kivitelezhetőség a kisebb önsúly következtében.

A katonai célú hídszerkezet esetén az a két határállapot, ami egyébként a nagyszilárdságú acélok alkalmazását korlátozza hídszerkezetek esetén (fáradási és használhatósági határállapot) nem jelentenek korlátot, mivel nincs rajtuk nagyszámú járműforgalom, illetve nincsen előírt lehajlási kritérium. Ennek következtében a nagy teljesítőképességű acél minden kedvező tulajdonsága kihasználható, ugyanakkor a hátrányai nem okoznak méretezési problémát [10].

#### ***Airport-Bridge a Rajna felett (Düsseldorf-Ilverich, Németország)***

Az Airport-Bridge Düsseldorf közelében vezeti át az A44 autópályát a Rajna felett (10. ábra). A híd egy ferdekábeles híd, melyet 1998-2002 között építettek 7180 tonna S355 illetve 520 tonna S460 acél anyag felhasználásával. A pilon magasságának csökkentése érdekében (melyre a közeli repülőtér miatt volt szükség) V-alakú pilonokat terveztek, melyeket S460 szilárdsági osztályú acélból készítettek.

A nagyszilárdságú acél előnyei ebben az esetben a ferde kábelekből származó nagy erők felvételére szolgáló összekötő rúd falvastagságának csökkentése, ezáltal a hegeszthetőség kedvezőbbé tétele volt. Továbbá a nagy teljesítőképességű acél alkalmazásával megvalósítható volt az előmelegítés nélküli hegesztés, mely csökkentette a kivitelezési költséget [10].



10. ábra: Airport-Bridge oldalnézete (Düsseldorf-Ilverich, Németország) [10].

### ***Öszvérhíd Ingolstadt mellett (Németország)***

A hídszerkezet egy folytatódó többtámaszú öszvérhíd  $24+5 \times 30+20$  m fesztávokkal. A kocsipálya szélessége 15 m, mely minden támaszon két különálló pilléren fekszik. A híd integrált szerkezetként lett kialakítva, saruk nélkül. A pályaszerkezet fix kapcsolattal csatlakozik a pillérekhez egy kis merevségű acél lemezen keresztül. Ennek a félmerev kapcsolatnak a kialakítására alkalmaztak S690 QL szilárdsági osztályú acél anyagot. Az adott szerkezetnél a nagyszilárdságú acél előnye abban mutatkozott meg, hogy nagy teherbírást lehetett elérni viszonylag kis merevség elérése mellett. A nagy teherbírás fontos volt a reakcióerők (normál és nyíróerő) továbbítására, míg a kis merevség fontos volt a csuklóhoz közeli kapcsolat kialakításának érdekében [10].

### ***Verrand Viadukt (Olaszország)***

A Verrand Viadukt felszerkezete szekrény keresztmetszetű ortotróp pályalemezes szerkezet. A híd nyílásbeosztása  $97,5+3 \times 135+97,5$  m, a kocsipálya szélessége 20 m. A szerkezetet betolós technológiával készült 85 m hosszú betolócsőr alkalmazásával. A nagyon hosszú betolócsőr esetén kiemelt fontosságú volt a betolócsőr súlycsökkentése, melyet S690 acél anyag felhasználásával értek el a tervezők. Ennek következtében az eredetileg végleges állapotra tervezett és optimalizált felszerkezetet nem kellett megerősíteni a betolós építésmód alkalmazása miatt, mely jelentős kivitelezési és gyártási előnyöket jelentett [10].

### ***Hibrid szerkezetek (Svédország)***

A svéd tervezési gyakorlatban nagyon elterjedt a különböző szilárdsági osztályok kombinációja, ezáltal a szerkezet teherbírásának optimalítása. Általában nagyobb szilárdsági osztályt alkalmaznak az övlemezben és kisebbet a gerinclemezben. Az általános kritérium az, hogy az övlemez folyáshatára ne haladja meg 50%-nál nagyobb mértékben a gerinclemez folyáshatárát. 1995-ben egy egynyílású, 20 m fesztávú hídszerkezet épült Mttadalen-ben. Az alsó övlemez S690 szilárdsági osztályú acélból, a felső övlemez és a gerinclemez S460-as acélból készült. A különböző anyagelosztású hibrid tartókon végzett költségelemzés egyértelműen azt mutatta ki, hogy a hibrid kialakítás költséghatékony megoldás lehet [10].

### ***Gyalogoshíd a Bayerstrasse felett (München, Németország)***

2005-ben készült el a 11. ábrán látható gyalogoshíd Münchenben. A felszerkezet fesztávja 38,7 m, szélessége 4 m. A főtartó szerkezete két rácsos szerkezetű gerenda, melyre vasbeton

pályaszerkezet került. A rácsos főtartó rúdjai S690 QL szilárdsági osztályú acélból készültek 127x30 mm keresztmetszeti jellemzőkkel. A nagyszilárdságú acél alkalmazásával a főtartó lényegesen karcsúbb megjelenésű, mely fontos volt építészeti szempontból [10].



11. ábra: Gyalogoshíd a Bayerstrasse felett [10].

### **Sony Center rácsos tetőszerkezete (Berlin, Németország)**

A Sony Center tetőszerkezete egy érdekes rácsos kialakítás (12. ábra), mely célja a régi falazott szerkezetek épület felújítás utáni terhelésének csökkentése és a terhek új szerkezeti elemekre való átterhelése. A rácsos tartót S460 és S690 szilárdsági osztályú anyagból készítették. A nagyszilárdságú acél alkalmazásának oka a keresztmetszetek méretének csökkentése volt, mely egyrészt kedvezőbb megjelenést, másrészt kevesebb tűzvédő bevonat alkalmazását tette szükségessé [10].



12. ábra: Sony Center épülete, Berlin [10].

### ***HST híd a Hollandsch Diep felett (Dordrecht – Breda, Hollandia)***

A Hollandsch Diep HST hídja (13. ábra) nagysebességű vasútvonalat visz át az 1200 m szélességű Hollandsch Diep folyó felett. Az acél felszerkezet szekrény keresztmetszetű, mely S355 J2 és S460 N jelű acél anyagok felhasználásával készült. A szerkezet érdekessége, hogy a magas szilárdsági osztály ellenére a híd nagy részén 100 – 210 mm vastag lemezek alkalmazására volt szükség. A nagyszilárdságú acél anyag alkalmazásának előnye ennél a hídnál abban jelentkezett, hogy sikerült 500 t alatt tartani a gyártási egységek súlyát, mely lehetővé tette a folyón való szállítást és a szerkezet úszódaruval való beemelését [10].



13. ábra: Hollandsch Diep HST hídja, Hollandia [10].

### ***Enneus Heerma híd (Hollandia)***

Az Enneus Heerma híd (14. ábra) egy különleges vonalvezetésű ívhíd, melynek fesztávja 230 m, szélessége 38 m, és ívmagassága 26 m. A hídon 4 sávos autópályát, 2 vasúti vágányt, két biciklis és két gyalogos sáv kapott helyet. A szerkezetet 2001-ben készítették el thermo-mechanikusan hengerelt S460-as acél anyagból [10].



14. ábra: Enneus Heerma híd, Hollandia [10].

## **6. Összefoglalás**

Összefoglalóan elmondhatjuk, hogy a nagyszilárdságú acélok az acélszerkezeti építőmérnöki gyakorlatban alkalmazott acél anyagok új generációját jelentik, melyek jelentősen javított mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, növelt folyáshatár és szakítószilárdság, kedvezőbb szívóssági tulajdonság, hegeszthetőség és korrózióállóság jellemzi őket.

Az EN1993-1-12 [3] szabvány S700-as anyagminőségig ad méretezési eljárást, gyártási minőségi szabványok pedig S960 szilárdsági osztályig állnak napjainkban rendelkezésre. A hiányos szabványi háttér jelentős limitációt jelent és gátolja a nagy teljesítőképességű acélok

széleskörű elterjedését. Ennek a hiánynak a pótlásával foglalkoznak kutatók világszerte napjainkban. A nagyszilárdságú acél hídépítési felhasználásának szempontjából komoly korlátot jelent, hogy acél és öszvér hidak esetén a fáradási határállapot jelenti a mértékadó határállapotot, a hegesztett szerkezeti részletek esetén azonban a legtöbb nemzetközi szakirodalomban fellelhető kutatási eredmények szerint nincs számottevő különbség a különböző folyáshatárú acél anyagok fáradási élettartamában. Ugyanakkor fáradás szempontjából három tényező a nagyszilárdságú acél mellett szól:

- kisebb lemezvastagságú és kisebb hegesztési varrattal kialakítható szerkezeti részleteket lehet nagyszilárdságú acélból készíteni, mely a varratméret csökkenés és a mérhető miatt kedvezőbb fáradási jellemzőket eredményez,
- alapanyag fáradási viselkedése a nagyszilárdságú acélnek lényegesen jobb, mint a normál szilárdságú acélnek, folyáshatár növelésével a fáradási osztály közel lineárisan nő, ennek köszönhetően, gondos részlettervezéssel a nagyszilárdságú acélból készült szerkezetek fáradási viselkedése javítható,
- minden varratjavító eljárással kapcsolatos eddigi kutatás azt igazolta, hogy minél nagyobb a szilárdsági osztály, annál nagyobb mértékben javul a szerkezet fáradási viselkedése, mivel a javított varrattal kialakított szerkezet közelebb kerül az alapanyagszerű viselkedéshez.

Nagyszilárdságú acélszerkezetek stabilitási viselkedése szintén kedvezőbb, mint a normál szilárdsági osztályú szerkezeteké. Ennek oka a folyáshatárhoz képest arányosan kisebb nyomó sajátfeszültségek kialakulása az acél gyártmányokban. Figyelembe véve a fent leírt kedvező tulajdonságokat, körültekintő tervezéssel és helyes szerkezeti megoldások alkalmazásával költségcsökkentést lehet elérni a nagyszilárdságú acél anyag alkalmazásával, mely jelentős előnyökkel kecsegtet a felhasználás jövőjét illetően.

## 7. Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton fejezi ki köszönetét az Emberi Erőforrások Minisztériumának a számára nyújtott támogatásért. Jelen kutatás és cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4-III kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A kutatást ezen kívül támogatta az *MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíja* is, melyért a szerző szintén köszönetét fejezi ki.

## 8. Hivatkozások

- [1] IABSE-AIPC-IVBH: Structural Engineering Documents, Use and application of High-Performance Steels for Steel Structures - 8, 2005.
- [2] EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings. CEN. 2009.
- [3] 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.
- [4] K. Mela, M. Heinesuo: Weight and cost optimization of welded high strength steel beams, *Engineering Structures*, Vol. 79, pp. 354-364, 2014.
- [5] J.O. Pedro, A.J. Reis: High strength steel (HSS) S690 in highway bridges: Comparative design, *Proceedings of the 8th European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel 2017)*, September 13-15, 2017, Copenhagen, Denmark.
- [6] C.S. Shim, J.W. Whang, C.H. Chung, P.G. Lee: Design of double composite bridges using high strength steel, *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 1825-1829, 2011.
- [7] A. Hoobacher: Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW document XIII-1965-03 / XV-1127-03, 2003.

- [8] A. Gál: A hegesztési varratok fáradási szilárdságának növeléséről, MAGÉSZ Acélszerkezetek, Vol 4. pp.50-57, 2014.
- [9] P.J. Haagenzen, S.J. Maddox: IIW recommendations on post weld improvement of steel and aluminium structures, IIW-XIII-2200r7-07 Revised, July 2010.
- [10] E. Gogou: Use of high strength steel grades for economical bridge design, MSc thesis study, TU Delfth, 2012.