

# MÉRÉSEKKEL TÁMOGATOTT HEGESZTÉSI VARRAT ÉLETTARTAMVIZSGÁLAT AZ ECON ENGINEERING KFT-NÉL

## PHYSICAL TEST AIDED NUMERICAL LIFETIME ESTIMATION OF WELDED JOINTS AT ECON ENGINEERING KFT

*Dr. Turcsán Tamás, PhD, [tamas.turcsan@econengineering.com](mailto:tamas.turcsan@econengineering.com)*

### ÖSSZEFOGLALÁS

A mérési feladat során keletkező élettartam görbék egy vasúti forgóváz hegesztett kötéseinek numerikus élettartamvizsgálata során szolgáltatott bemeneti paramétereket. A fárasztóvizsgálatok során egy tompavarrattal és egy T kötéssel rendelkező S355NL anyagminőségű acéllemezekből álló mintasorozat került tesztelésre különböző terhelési szintek mellett. A meghatározott élettartamgörbék növelték a számítási eredmények megbízhatóságát a kizárólag szakirodalmi, vagy adatbázisban fellelhető élettartamgörbék használatával összevetve.

### ABSTRACT

Presented work is connected to numerical lifetime analysis of railway bogie welded joints which calculation was aided by the measured fatigue curves of welded butt and T joints in this project. Using these fatigue curves resulted in more reliable calculated lifetime compared to the literature-based or database-given curves for welded joints of measures S355 NL steel.

### 1. BEVEZETÉS

Egy vasúti forgóváz numerikus élettartam számításánál nem csak a vonatkozó EN 13749 [1] szabvány által megadott terhelések pontos megadására van szükség. A végeelemes modell által szolgáltatott eredményeket alapvetően befolyásolják az alapanyag mérnöki konstansain felül a vizsgált hegesztett kötések élettartam görbéi a terhelő feszültség függvényében. Az élettartam görbékkel kapcsolatban az alapfém esetében általában megbízható mérési adatok állnak rendelkezésre, azonban a varratok esetében az alapfémtől eltérő, általában kisebb élettartamokra lehet számítani, amit befolyásol nem csak a varrat típusa, hanem a hegesztés során fennálló egyes technológiai paraméterek, illetve környezeti tényezők is. Mindezeket

figyelembe véve érdemes a számításokat méréssel alátámasztott élettartam görbékre alapozni, így elkerülni az esetleges tévedéseket.

### 2. A MÉRÉSI FELADAT LEÍRÁSA

A fárasztóvizsgálat során két különböző típusú S355 NL minőségű lemezanyagból készített hegesztett kötésekben vizsgáltunk mintákat. Az első típus 14 mm vastagságú lemezekből álló V varrattal rendelkező, lapos próbatestcsalád volt. A második típus egyoldalú sarokvarrattal ellátott T kötés volt 12 és 14 mm vastagságú lemezek között. A fárasztóvizsgálatokhoz használt lemezekben, még a próbatestek kivágása előtt penetrációs tesztet végeztek a hegesztések minőségének ellenőrzésére. A tesztelt minták mindegyikéről készültek töretfelületi képek, amik segítségével azonosítható volt a repedésterjedés útja. Az elvégzett statikus és dinamikus fárasztó tesztek előre meghatározott terhelési szinteken kerültek elvégzésre a későbbi számításokhoz szükséges feszültség-terhelési ciklusszám (S-N) görbék meghatározása érdekében. az S-N görbék meghatározása során sor került nem csak az élettartam/feszültség szórás figyelembevételére, hanem a közép-feszültség (Goodman) korrekcióra is.

### 3. MÉRÉSI ELRENDEZÉS

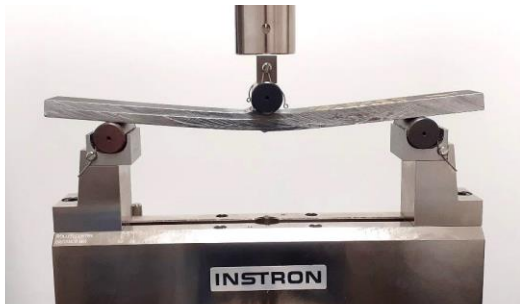
#### 3.1. Terhelő berendezés

A mérések során egy Instron 8801-es típusú szervohidraulikus terhelő berendezést használtunk, amelynek névleges terhelhetősége  $\pm 100$  kN, a terhelő munkahenger lökethossza 150 mm. A terhelőgép vezérlése és a mérési adatok kinyerése Instron 8800MT digitális kontrollor és WaveMatrix 2 dinamikus vizsgáló szoftver segítségével történt.

#### 3.2. Tompavarratok vizsgálata

A tompavarratok esetében az Instron gyári (2810-181 sorozatszámú) hárompontos hajlító

feltétjét alkalmaztuk, 250 mm-es alátámasztási távolsággal. Az S355 NL alapanyagú lapos próbatestek névleges szélessége 38 mm, hossza 352 mm, míg vastagsága 14 mm volt. Az elvégzett vizsgálat így mind a készülék, mind a próbatest méretek tekintetében megfelelt az ASTM E190 szabványnak [2] (1. ábra).



1. ábra. A tompavarratok vizsgálata során használt mérési elrendezés

A mérés során az 1. ábrán látható eszközökön felül semmilyen más berendezés nem került alkalmazásra tekintve, hogy a mérés erővezérelt üzemmódban zajlott. Az aktuátor rúd elmozdulásából mérhető lehajlás szolgált inputként a repedés kialakulásának és terjedésének elemzéséhez. A fenti elrendezést tekintve kizárólag pozitív terhelési hányaddal ( $R > 0$ ) volt módunk mérést végezni.

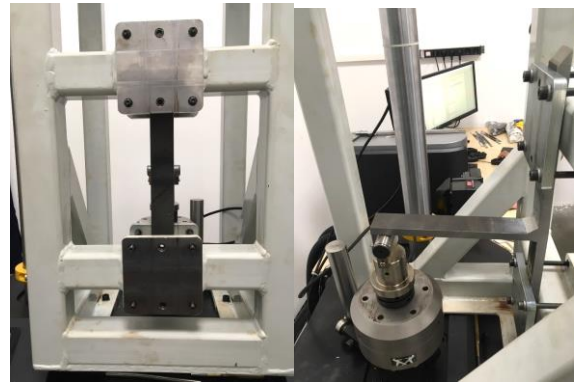
A vizsgálat során ébredő hajlítófeszültség analitikusan meghatározható az alábbi (1) egyenlet szerint [3]:

$$\Delta\sigma_{BW} = \frac{3 \cdot L \cdot (F_{max} - F_{min})}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (1)$$

ahol  $\Delta\sigma_{BW}$  [MPa] a tompavarraton ébredő feszültség tartomány,  $L$  [mm] alátámasztási távolság,  $F_{max}$ ,  $F_{min}$  [N] a berendezés által kifejtett maximum és minimum terhelések,  $b$  [mm] próbatest szélessége,  $h$  [mm] próbatest lemezvastagsága.

### 3.3. Sarokvarratok vizsgálata

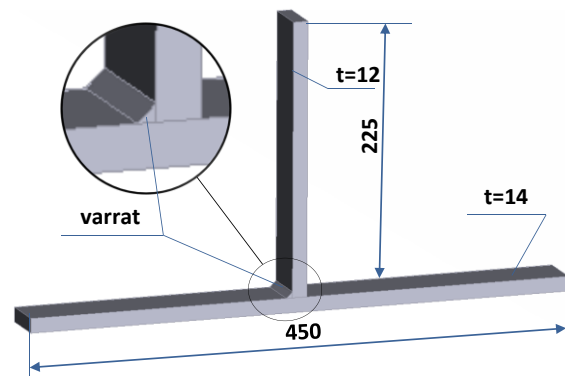
A sarokvarratok vizsgálatakor egy saját fejlesztésű acél szelvényekből álló hegesztett terhelőkeretet alkalmaztunk (2. ábra), amely úgy került megtervezésre, hogy a fázasztás során jelentkező dinamikus igénybevételekre minimális alakváltozást szenvedjen.



2. ábra. A sarokvarratok vizsgálata során használt mérési elrendezés hátulról (balra), valamint oldalnézetből (jobbra)

A T kötések befogott szárai közötti távolság 180 mm volt, ami realisztikus viselkedést biztosított a varrat környezetében, így elősegítve az élettartamvizsgálatokat.

A sarokvarratok szintén S355NL anyagminőségű lemezeket kötöttek össze, amelyek esetében az alaplemez 14 mm, az alaplemezre hegesztett egység 12 mm lemezvastagsággal bírt. A próbatestek további méreteit a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. A sarokvarrattal ellátott próbatestek befoglaló méretei CAD modellen szemléltetve

A sarokvarratban ébredő feszültség meghatározása a tompavarratos próbatesttel ellentétben, a geometriai felépítésből adódóan nem határozható meg egyszerű analitikus összefüggéssel. Ez esetben a terhelő erővel arányos feszültség előzetes végeeselemes számítások során került meghatározásra.

## 4. FÁRASZTÓVIZSGÁLATOK

### 4.1. Terhelések és ciklusszámok

A vizsgálatok erővezérelt módban, több különböző 0,1 és 0,5 közötti maximális és minimális terhelése arányát leíró R tényező

mellett kerültek kivitelezésre. Az az élettartam különböző közép feszültség melletti kimérése jó alapot szolgáltatott a közép feszültség korrekciójához a későbbi hegesztett alváz számításainál. A megcélzott terhelési ismétlésszám (>100 000 ciklus) a nagyciklusú kifáradás (high cycle fatigue, HCF) tartományába esik. Az alkalmazott terhelési frekvencia megválasztásánál szem előtt kell tartanunk a mérési időtartamot és a mérőgép korlátait is, mindezek alapján 10 Hz került beállításra. A varratokban kialakuló repedések figyelésére az erővezérlés mellett tapasztalható terhelési amplitúdó növekménye került monitorozásra. Amennyiben a terhelési ciklus függvényében ez a növekmény túl megy egy határon, akkor az a szemmel látható repedések megjelenése előtt jelezheti a merevség csökkenést, egyúttal belső repedések instabil terjedését. Természetesen minden tesztet a látható repedések megjelenéséig igyekeztünk elvinni és mindegyik töretfelületről fényképes dokumentációt készíteni.

A terhelési szintek meghatározásánál a főszempont az volt, hogy a próbatestek kritikus keresztmetszete az elasztikus tartományon belül maradjon a HCF elérése érdekében, így a becsült élettartam 5E5 és 5E6 közé esőnek ígérkezett, amely tartomány egybevág a releváns EN 13749-es szabványban [1] deklarált forgóvázakra érvényes maximális ciklusszámmal. Amely minta elérte és meghaladta az 5E6 ciklust, azt a kifáradási határt elérteként kezeltük és a ciklikus vizsgálatot megszakítottuk.

#### 4.2. Fárasztóvizsgálatok kiértékelése

Az erővezérelt terhelési módszerből kiindulva objektív kiértékelési módszernek bizonyult a teherbíróképesség monitorozására a terhelési amplitúdó változásának megfigyelése. A merevség csökkenését ez esetben az elmozdulás tartományának kiszélesedésével jár, amelynek relatív gradiense a (2) összefüggés segítségével írható le [3]:

$$(\overline{g_{\Delta}})_i = \frac{(g_{\Delta})_i}{\left(\frac{\sum_{j=1}^i (g_{\Delta})_j}{i}\right)}, \quad (2)$$

ahol  $(\overline{g_{\Delta}})_i$  [-] a relatív elmozdulás-tartomány gradiense az  $i$ -edik rögzített terhelési állapot mellett,  $(g_{\Delta})_i$  [mm/ciklus], elmozdulási tartomány gradiense az  $i$ -edik rögzített állapotban,  $j$  egy index a teszt kezdetétől a

tényleges  $i$ -edik rögzített állapotig. Az elmozdulási tartomány két egymást követő rögzített állapot között a (3) egyenlet adja meg [3]:

$$(g_{\Delta})_i = \frac{\Delta s_i - \Delta s_{i-1}}{\log(N_i) - \log(N_{i-1})}, \quad (3)$$

ahol  $\Delta s_i$  és  $\Delta s_{i-1}$  [mm] elmozdulás tartományok az  $i$ -edik és az  $(i-1)$ -edik rögzített állapotban a teszt során,  $N_i$  és  $N_{i-1}$  [ciklus] akkumulált ciklusok az  $i$ -edik és az  $(i-1)$ -edik rögzített állapotban a teszt során.

A relatív elmozdulás gradiense önmagában egy olyan mennyiség, amely képes minősíteni az elmozdulás tartomány két egymást követő ciklusban történt változását. Ezen paraméter értéke alapján két fő esemény következhet be:

- 1)  $(\overline{g_{\Delta}})_i$  értéke közel 1: ez azt mutatja, hogy az elmozdulási tartomány gradiense jó közelítéssel konstans. Ez tipikusan akkor jelentkezik, ha stabil repedésterjedés van jelen, amely a hegesztett kötések élettartamának jó részén fennállhat.
- 2)  $(\overline{g_{\Delta}})_i$  értéke  $>1$ : ez esetben az elmozdulási tartomány gyorsuló ütemben nő, ami egyértelmű jele az instabil repedésterjedésnek és a közelgő rideg törésnek.

A relatív elmozdulás tartomány értéke minden egyes terhelési ciklus esetén meghatározható. Ezen eredmény birtokában pedig maga az élettartam ( $N_f$ ) egy logaritmikuskálán végzett lineáris interpoláció eredményeként határozható meg az alábbi (4) összefüggés szerint [3]:

$$N_f = e^{N_{low} + k}, \quad (4)$$

$$k = \frac{\log(N_{up}) - \log(N_{low})}{(\overline{g_{\Delta}})_{up} - (\overline{g_{\Delta}})_{low}} \cdot ((\overline{g_{\Delta}})_{lim} - (\overline{g_{\Delta}})_{low}), \quad (5)$$

ahol  $N_{low}$  az a kisebb ciklusszám, amely annak az állapotnak felel meg, amikor az egymást követő terhelési ciklusok során először lépjük túl a határgradienst,  $N_{up}$  a ciklusok száma, amely megfelel annak az állapotnak, amikor a határgradienst először lépik túl az egymást követő terhelési ciklusok,  $(\overline{g_{\Delta}})_{up}$  a relatív elmozdulási tartomány gradiense, amely megfelel annak az állapotnak, amikor a határgradiens először lépi túl a limitet az egymást követő terhelési ciklusok során,  $(\overline{g_{\Delta}})_{low}$  az alacsonyabb relatív elmozdulási tartomány gradiense, amely

megfelel annak az állapotnak, amikor a határgradiens először lépi túl a limitet az egymást követő terhelési ciklusok során és  $(\bar{g}_\Delta)_{lim}$  a határgradiens érték, amely meghatározza az instabil repedésnövekedés kezdetét.

A kiértékelés során a határgradienst értékét 5-re választottuk, azonban ebben a nagyságrendben (1,0–10,0) a kifáradási élettartam érzéketlennek bizonyult a tényleges értékére.

#### 4.3. Valószínűségi alapú S-N görbe illesztés

A kifáradási görbéket az előállított nyers terhelés-kifáradási ciklus adatokhoz illesztettük. Ezen görbék fő jellemzői a következők voltak:

- A névleges feszültségtartomány-kifáradási élettartam (S-N) görbék összhangban vannak a hegesztési varrat kifáradás kiértékelésére vonatkozó szabványokkal (BS7608 [4], Eurocode 3 [5] vagy EN13445 [6]).
- Fárasztóvizsgálatokat több különböző R-tényezővel végeztük, ami számos S-N görbét eredményezett, amelyek eltérő átlagos stresszszinteket reprezentálnak.
- A fent említett kifáradási szabványokból kiindulva a közép feszültség az egyes S-N görbék eltolódását eredményezi a feszültség-élettartam térben, amik azonban állandó meredekségűek. Ezért az egyes mért adatpontokhoz különböző átlagos feszültség szinteken történő S-N görbe illesztése a közös meredekség és az egyes vizsgált R tényezőknek megfelelő eltolási tényező optimalizálásával egyidejűleg történt.

A vonatkozó szabványok szerint a minták kifáradási válasza az 1E4-5E6 ciklustartományában egy lineáris egyenlettel közelíthető, abban az esetben, ha a kifáradási ciklusok és terhelések logaritmusát ábrázoljuk. Az S-N görbe létrehozásához ezért a (6) egyenletet vezetjük be [3]:

$$\log(\Delta\sigma) = \frac{1}{m} \cdot \log(N_f) + C, \quad (6)$$

ahol  $\Delta\sigma$  [MPa], a hegesztési varratra jellemző névleges feszültségtartomány,  $m$   $[(\log(\text{MPa}))^{-1}]$  az élettartamot leíró egyenes meredeksége (illesztési paraméter),  $C$   $[\log(\text{MPa})]$  az élettartam görbére jellemző konstans (illesztési paraméter).

A vizsgálati adatok szórásának kiszűrése érdekében az S-N görbéket 50%-os túlélési valószínűség mellett illesztettük a legnagyobb valószínűség statisztikai módszerének felhasználásával.

## 5. EREDMÉNYEK

### 5.1. Tompavarratok élettartama

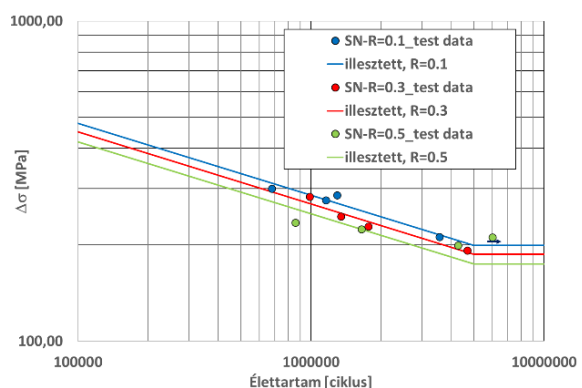
A tompavarratos próbadarabokra alkalmazott terhelési szintek összegzése, valamint a 4.2. szakaszban leírt módszertan szerint számított kifáradási ciklusok az alábbi 1. táblázatban találhatóak.

1. táblázat. A tompavarrattal ellátott próbatestek mérési eredményei

#	Max/min terhelés [N]	R [-]	N <sub>f</sub> [ciklus]
1	Statikus, törésig	-	-
2	6 000/600	0.1	1 160 680
3	5 000/500	0.1	3 554 556
4	7 000/700	0.1	1 295 391
5	7 500/750	0.1	680 181
6	7 500/2 250	0.3	1 343 534
7	6 000/1 800	0.3	4 678 675
8	8 500/2 550	0.3	988 719
9	6 800/2 040	0.3	1 760,236
10	10 000/5 000	0.5	856 271
11	9 500/4 750	0.5	1 647 686
12	9 000/4 500	0.5	4 282 517
13	10 000/5 000	0.5	6 008 000*

\*Kifáradási határt (5E6) elért mérés, megszakítva.

A tompavarratos minták teszteredményeiből, különböző (0,1, 0,3 és 0,5) R tényező mellett illesztett S-N görbék a 4. ábrán láthatóak.



4. ábra. A tompavarratos próbatestek illesztett S-N görbéi 0,1, 0,3 és 0,5 R tényező mellett

### 5.2. Sarokvarratok élettartama

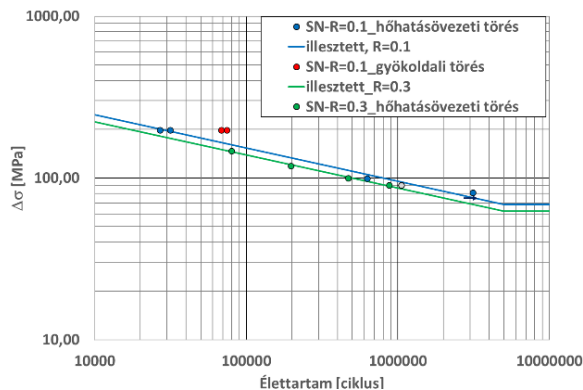
A sarokvarratos próbadarabokra alkalmazott terhelési szintek összegzése, valamint a 4.2. szakaszban leírt módszertan szerint számított kifáradási ciklusok az alábbi 2. táblázatban találhatóak.

2. táblázat. A sarokvarrattal ellátott próbatestek mérési eredményei

#	Max/min terhelés [N]	R [-]	N <sub>r</sub> [ciklus]
1	Statikus, törésig	-	-
2	3 500/350	0.1	-*
3	3 500/350	0.1	-*
4	3 055/305.5	0.1	68 480
5	3 055/305.5	0.1	74 161
6	3 055/305.5	0.1	26 932
7	3 055/305.5	0.1	31 496
8	1 530/153	0.1	626 401
9	1 250/125	0.1	3 131 741
10	1 390/139	0.1	1 059 583
11	1 986/596	0.3	471 894
12	2 920/876	0.3	80 168
13	1 800/540	0.3	874 251
14	2 360/708	0.3	196 843

\*A megválasztott frekvencia túl nagyknak bizonyult a szükséges elmozduláshoz, így kontroll hiba miatt a mérés leállt, a keletkezett eredmények alapján a más frekvencián való folytatás elvételére került.

A sarokvarratos minták teszteredményeiből, különböző (0,1, és 0,3) R tényező mellett illesztett S-N görbék az 5. ábrán láthatóak.



5. ábra. A sarokvarratos próbatestek illesztett S-N görbéi 0,1 és 0,3 R tényező mellett

## 6. KONKLÚZIÓ

Az eredmények alapján a fárasztóvizsgálatok sikeresnek mondhatók és a mért, valamint a számított eredmények nagyban segítették a későbbi vasúti forgóváz hegesztési varratainak végeelemes számításokat segített EN13749 szerinti élettartamvizsgálatát.

## 7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] EN 13749. Railway applications – Methods of specifying structural requirements of bogie frames, European Committee for Standardization, 2005.
- [2] ASTM E190-21, Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [3] L. Kovács, T. Turcsán: Fatigue tests of welded connections, eCon Engineering Kft, Internal report, 2021.
- [4] BS 7608, 2014 – Guide to fatigue design and assessment of steel products, 2014 Edition, British Standards Institution (BSI)
- [5] Eurocode 3: Design of steel structures, European Committee for Standardization, Brussels, 2005
- [6] EN 13445. Unfired Pressure Vessels, European Committee for Standardization, 2018.