

VASÚTI FORGÓVÁZ VÉGESELEMES SZILÁRDSÁGI ELLENŐRZÉSE ÉS NYÚLÁSMÉRŐ BÉLYEGES VIZSGÁLATA

STRENGTH ASSESSMENT OF RAILWAY BOGIE FRAME WITH FINITE ELEMENT METHOD AND EXAMINATION WITH STRAIN GAUGE MEASUREMENT

Kimpán Gergő, gépészmérnök, Karman Mechanics Kft. gergo.kimpan@karman-mechanics.hu, Dr. Gróza Márton, egyetemi adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék, groza.marton@gt3.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A vasúti forgóvázak tervezését alapvetően a statikus és dinamikus szilárdsági szempontok határozzák meg, melyek minősítésének általános elveit és a vizsgálandó terhelési eseteket vasúti szabványok rögzítik.

Elsősorban a teljes forgóváz statikus ill. fárasztó tesztjei alkalmasak a szabványos megfelelésig biztosítására, azonban egyre elfogadottabb ezek részben ill. akár teljes egészében megfelelően validált szimulációval történő kiváltása.

Egy esettanulmány példáján keresztül olyan vegyes számítási és mérési módszert mutatunk be, amelynek segítségével megbízhatóan sikerült alátámasztanunk egy vasúti forgóváz szabványos megfelelését. A normál üzemi (fárasztó jellegű) és rendkívüli terhelések (egyszer előforduló) hatását figyelembe vevő szimulációs modell pontosságát nyúlásmérő bélyeges méréssel ellenőriztük.

ABSTRACT

The design of railway bogie frames is fundamentally determined by their static and dynamic strength, for which the general principles and load cases are standardised.

Full scale bogie static and fatigue tests are suitable for assessing standard compliance; however, it is increasingly accepted to replace them in part or even completely by simulation.

With the example of the current case study, we present a mixed calculation and measurement methodology that can be used to reliably assess the standard compliance of a railway bogie frame. The accuracy of the

simulation model, which considers the effect of normal operating (fatigue) and extraordinary loads (static), was validated by strain gauge measurement.

1. BEVEZETÉS

A vasúti forgóvázak teherbíró szerkezete jellemzően három fő részből épül fel, a két hossztartóból és az azokat összekötő keresztartóból. Az elsődleges (primer) felfüggesztés összekapcsolja a csapágyazott tengelyeket a keresztartókkal, míg a másodlagos (szekunder) felfüggesztésen keresztül kapcsolódik a vasúti kocsi a forgóvázhoz. A forgóvázakhoz kapcsolódnak általában további vasúti rendszerek, úgymint a fékegység, homokoló láda, ill. adott esetben a motor és a hajtómű.

A numerikus szimulációval támogatott szilárdsági ellenőrzéshez első lépésben olyan mechanikai modellt szükséges építeni, amely a modell határait képező feltételek (vasúti kocsi és pálya) hatását egyszerűsítések mellett a vizsgálati esetekben jól helyettesíti.

2. FORGÓVÁZAKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK

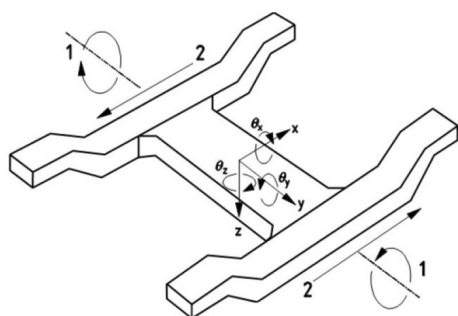
A forgóvázak tervezését és annak szilárdsági megfelelését elsősorban az EN 13749 [1] és az EN 15827 [2] előírások szabályozzák, amelyek tartalmazzák az egyes forgóváz típusokhoz a tervezési irányelveket és követelményeket. Az előírás betartásával biztosított, hogy a forgóváz üzemi élettartama során nem fog előfordulni katasztrofális tönkremenetel vagy maradó alakváltozás, továbbá ellenáll a fárasztó terheléseknek. A használati körülmények,

tervezett futási teljesítmény, az alkalmazás típusa és részben a tömegeloszlásból [3] származtatott terhelés alapján, a szabvány előírja a megfelelőség igazolásának lépését.

Amennyiben egy teljesen új forgóváz konstrukcióról van szó, a szabvány szerint mind a négy alapvető ellenőrzési módszert el kell végezni (szilárdsági analízis, statikus és fárasztásos laboratóriumi teszt, teszt tényleges üzemi körülmények között). Egy módosított tervezési kialakítás esetében elegendő egy egyszerűsített minősítési program felállítása, mint a jelen esettanulmány esetében.

2.1 Forgóváz terheléseinek meghatározása

A terhelési esetek egyértelmű meghatározáshoz szükség van egy koordináta rendszerre, amiben a különböző irányú erőket és gyorsulásokat a szabvány megadja. A forgóváz szabványos koordináta rendszert az 1. ábra mutatja be.



1. ábra. A terhelések meghatározásához használt koordináta rendszer az EN 1379 [1]-nek megfelelően.

A terhelések két csoportba oszthatók; egyrészt lehetnek külső terhelések, amelyek szállított teher tömegéből, a pálya ívéből és egyenletlenségből, a vonat gyorsulásából és lassításából, a hasznos teher tömegéből, valamint a forgóváz emeléséből származhatnak, másrészt ún. belső terhelések lépnek fel a forgóvázra szerelt egységek tehetetlensége miatt.

A terhelések, egy másik felosztás szerint, két csoportba sorolhatók előfordulási valószínűségük alapján. A rendkívüli terhelések elviselése az egyszeri, statikus teherbírás tervezési kritériuma. A normál üzemi terheléseknek a teljes tervezési élettartam alatt, ismétlődő jelleggel is ellen kell állnia a konstrukciónak. A terhelések meghatározásához

szükséges paramétereket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. A szabványos terhelés meghatározásához szükséges adatok.

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
M_t	Tengelyterhelés	kg
M_v	Kocsi telj. tömege	kg
m^+	Forgóváz tömege	kg
c_1	Vezető tömege	kg
n_a	Tengelyek száma	db
n_b	Forgóvázak száma	db
μ	Súrlódási tényező	-
L	Tengelytávolság	mm
g	Nehézségi gyorsulás	mm/s ²

2.2. Rendkívüli terhelések

A forgóvázak által felvett függőleges irányú erő ($F_{z,max}$) a két hossztartót terheli egyenlő nagyságban:

$$F_{z_1,max} = F_{z_2,max} = \frac{F_{z,max}}{2} = \frac{1.4g \cdot (M_v - 2m^+)}{4}. \quad (1)$$

Az oldalirányú terhelések maximuma ($F_{y,max}$) a következő összefüggéssel határozható meg:

$$F_{y_1,max} = F_{y_2,max} = \frac{F_{y,max}}{2} = 10^4 + \frac{(M_v - c_1)g}{3 \cdot n_a \cdot n_b}. \quad (2)$$

A forgóvázon ébredő maximális hosszirányú erő egy tehetetlenségi erőként kerül modellezhető:

$$F_{x,max} = 5g \cdot m^+. \quad (3)$$

A jármű indulása során a tehetetlenségből származó vonóerő a következőképpen vehető figyelembe:

$$F_{x,d} = 1.3 \cdot \mu \cdot n_a \cdot \frac{M_v}{n_a \cdot n_b} \cdot g. \quad (4)$$

A két sín egymáshoz képesti egyenletlensége a vázszerkezet szempontjából egyfajta csavaró hatásként jelenik meg. A forgóvázra szerelt külső egységek (fékegység, homokláda) tehetetlenségét a szabvány a különböző irányokban az egységekre ható gyorsulással veszi figyelembe.

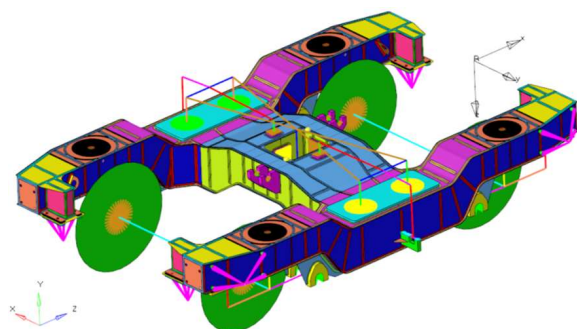
2.3. Normál üzemi terhelések

A normál üzemi terhelések meghatározása – pár kivétellel – a rendkívüli terhelésekkel analóg

módon történik azzal a különbséggel, hogy a kiadódó terhelések jelentősen kisebb mértékűek.
3. A VÉGESELEMES MODELL

A szerkezet nagy része hegesztett lemezekből épül fel, amelyek esetében általánosan elfogadott egyszerűsítés a lemezek középfelületének héj (shell) elemekkel való diskretizációja. A falvastagság menti hajlítófeszültségek így kevesebb számítási igény mellett, megbízható módon számíthatók. Érdekes ennek a típusú modellezésnek a hátrányát is kiemelni, a görbületek és feszültségkoncentrációs zónák közelében a héj modell az általános ún. „solid” hálózathoz képest magasabb, nem feltétlenül valós, feszültségek megjelenéséhez vezethet. A szimulációs modellt a 2. ábra mutatja be.

A mérnöki gyakorlatban sok esetben a lineárisan rugalmas feszültségállapot közvetlenül kapcsoljuk hozzá a különböző tönkremeneteli állapothoz (pl.: statikus vagy fáradásos törés) a feszültségkoncentrációs helyeken lokálisan fellépő tényleges ciklikus rugalmas-képlékeny feszültségállapot számításától eltekintve. Az FKM 2012 [4] kiértékelési módszertan is ezt a módszertant alkalmazza, így az anyagi nemlinearitás figyelembevétele nem volt indokolt a számítási modellben. A felfüggesztés alapvetően geometriailag nemlineáris viselkedését praktikus modellezési beállításokkal egyszerűsítetten helyettesítve (változó peremfeltételek és geometriai konfiguráció) biztosítható volt, hogy a számítási modell lineáris maradjon.



2. ábra. Végeselemes modell felépítése.

4. KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZER

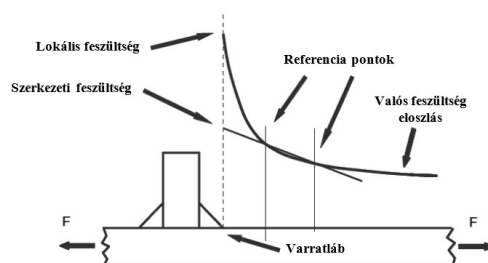
Ismétlődő terheléseknek kitett hegesztett lemez és keretszerkezetek esetében jellemzően a hegesztési varratok lábából kiinduló fáradásos repedések korlátozzák az üzemi élettartamot.

A számított feszültségeloszlás eredmények ezt a gyakorlati tapasztalatot megerősítik, a kritikus helyek szinte kivétel nélkül a varratok környezetében jelentkeztek, hiszen itt a magasabb feszültségek alacsonyabb megengedhető értékekkel találkoznak mind a rendkívüli (statikus) mind a kifáradási kockázatát hordozó normál üzemi terhelések esetében.

4.1. Hegesztett kötések kiértékelése

Hegesztett kötések ismétlődő terhelésekkel szembeni ellenállásának meghatározására az egyik leggyakrabban használt módszer a feszültségállapot vizsgálata, amely történhet normál, szerkezeti vagy effektív helyi feszültség alapján.

A névleges feszültség a varratlábától távolabbi keresztmetszetben számított átlagos feszültség, ami nem veszi figyelembe a hegesztett kötés körül, annak hatására kialakuló feszültségállapotot. A szerkezeti feszültség tartalmazza a kötés kialakításából eredő feszültségállapot hatását, azonban a varrat helyi feszültségkoncentrációs hatását nem. A szerkezeti feszültség értelmezését a 3. ábra szemlélteti.

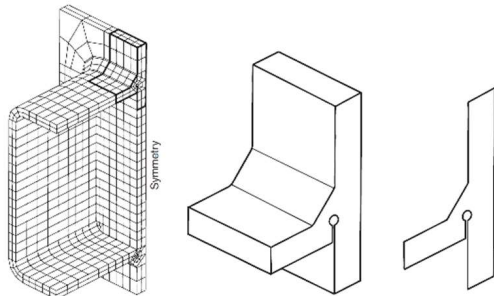


3. ábra. Szerkezeti feszültség értelmezése.

A szerkezeti feszültség meghatározása történhet végeselemes számítás vagy mérés segítségével. Amennyiben a pontokból kinyert értékek végeselemes szimulációból származnak, a feszültség varratlábhoz történő extrapolációhoz a referencia pontok távolsága függ a háló típusától (shell, solid), méretétől és a kapcsolódó lemezek vastagságától [5]. A szerkezeti feszültségállapot a referencia pontokba helyezett nyúlásmérő bélyegekkel is meghatározható.

Az effektív helyi feszültség a varratláb tövében ébredő numerikusan számítható lineárisan-rugalmas feszültség, amely számítása a varrat geometriáját is figyelembe veszi. Síkalakváltozási feszültségállapot és szerkezeti

acélok esetében ez a mikroszerkezeti jellemzőkből származtatott feszültségátlagolási technika egy 1 mm sugarú lekerekítés modellezését igényli meghatározott hálózasi követelmények mellett. Egy zártszelvény-alaplemez kapcsolat példáján mutatja be a 4. ábra a modellezési technika alkalmazását.



4. ábra. Effektív helyi feszültség számítása sicalakváltozási feszültségállapotban.

4.2. Szerkezeti feszültségen alapuló hegesztett kötések kiértékelése FKM 2012 alapján

A feszültségállapot mellett azonban az egyes hegesztett kötések kihasználtságát több tényező is befolyásolja. Az FKM 2012 [4] szerinti kiértékelés alapvetően egy egyenértékű feszültségamplitúdó összehasonlításán alapul a megengedett amplitúdóval. A megengedett szerkezeti feszültségamplitúdót a kötés típusa egy úgy nevezett FAT osztály [MPa] –ként adja meg. A FAT osztályt a 2. táblázat tényezőivel korrigálva a megengedett feszültség amplitúdó (σ_{AK}) a következőként számítható:

$$\sigma_{AK} = FAT \cdot K_{E,\sigma} \cdot K_{AK} \cdot f_{\sigma} \cdot f_t \cdot K_V \quad (5)$$

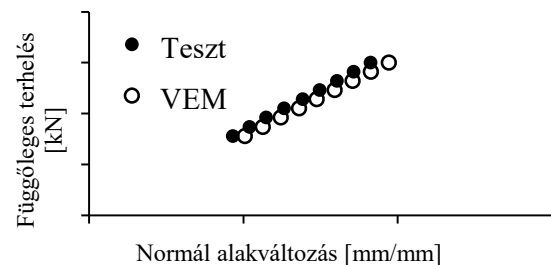
2. táblázat. Az FKM 2012 mérnöki irányelv [4] szerint megengedhető egyenértékű feszültségamplitúdó.

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
FAT	FAT osztály	MPa
$K_{E,\sigma}$	Maradó fesz. tényező	-
K_{AK}	Közép fesz. tényező	-
f_{σ}	FAT osztály konverziós tényező	-
f_t	Lemezvastagság tényező	-
K_V	Felületkezelés tényező	-

5. NYÚLÁSMÉRŐ BÉLYEGES MÉRÉS ÉS VEM MODELL ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A véges elemes modell ellenőrzése céljából a teljes hegesztett forgóvázon egy erre a célra épített tesztpadon nyúlásmérő bélyeges vizsgálatot végeztünk.

Az egyes pontokban a deformációt egytengelyű nyúlásmérő bélyeggel vizsgáltuk, ezért a bélyegeket az első főfeszültség irányában ragasztottuk fel az előkészített felületre. Fontos szempont volt a kiválasztott mérési pontok megállapításában, hogy az egyes helyi feszültségkoncentrációs helyektől távol mérjünk, de mégis kellően magas feszültségű zónákban, ezzel is csökkentve a lehetséges hiba mértékét. Az 5. ábrához hasonló összehasonlításokon keresztül megállapítható volt a numerikus számítás relatív hibája.



5. ábra. Numerikusan számított és mért normál irányú alakváltozás összehasonlítása a terhelés függvényében.

6. IRODALOM

- [1] MSZ EN 13749:2011 – Vasúti alkalmazások. Kerékpárok és futóművek. A forgóvázkerekek szilárdsági követelményeinek előírásmódjai.
- [2] MSZ EN 15827:2011 – Vasúti alkalmazások. Forgóvázak és futóművek követelményei.
- [3] MSZ EN 15663:2018 – Vasúti alkalmazások. A jármű referenciatömege.
- [4] FKM Guideline, Analytical Strength Assessment of Components, Hatodik kiadás, VDMA Verlag, 2012. ISBN: 9783816306498
- [5] A.F. Hobbacher, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, Második kiadás, Springer International Publishing, 2016. ISBN: 9783319237572.