

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.31>

Procjena životnoga vijeka zbog umora primjenom lokalnog pristupa Hot Spot

Boris Fuštar¹, Ivan Lukačević², Darko Dujmović²

¹ Projektni biro P45 d.o.o.

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Hrvatska
kontakt: borisfustar@hotmail.com

Sažetak

Prilikom procjene preostalog životnog vijeka čeličnih detalja izloženih umoru najčešće se zbog jednostavnosti proračuna primjenjuje S-N metoda uz globalni pristup preko nominalnih naprezanja. Ta metoda na strani djelovanja zanemaruje lokalne utjecaje poput koncentracija naprezanja uzrokovanih lokalnom promjenom u geometriji detalja. Ovi se utjecaji indirektno uzimaju na strani otpornosti pomoću eksperimentalno dobivenih S-N krivulja. Ako se radi o geometrijski složenijemu detalju ili je detalj opterećen složenim stanjem naprezanja, primjenjuju se lokalni pristupi kojima se prilikom proračuna uzimaju u obzir lokalni utjecaji. Ovaj rad prikazuje procjenu životnoga vijeka zavarenoga čeličnog detalja dodatne lamele izloženog umoru. Detalj je sastavni dio čelične konstrukcije željezničkoga mosta, a procjena se provodi lokalnim pristupom preko hot spot naprezanja. Naprezanja se određuju mjerenjem deformacija na određenim mjestima u detalju zbog prolaza karakterističnih vlakova. Karakteristični vlakovi sastavni su dio modela opterećenja formiranoga prema podacima Hrvatskih željeznica. Na taj se način proračunava životni vijek zavarenoga detalja zbog umora, a rezultati se uspoređuju sa životnim vijekom istoga detalja dobivenog pristupom preko nominalnih naprezanja.

Ključne riječi: životni vijek zbog umora, lokalni pristup Hot Spot naprezanja, zavareni detalj

Fatigue life assessment by using local Hot Spot approach

Abstract

During the assessment of remaining fatigue life of the welded details that are prone to fatigue, S-N method with global nominal stress approach is the most common method due to its simplicity. This method neglects local action effects such as stress concentrations due to local geometry changes in detail. These effects are indirectly included on the resistance side through experimentally obtained S-N curves. In cases of more complex detail or if the detail is loaded with a complex stress state, local approaches which take local effects into account during calculations are used. This paper presents a fatigue life assessment of fatigue prone cover plate welded steel detail. Detail is a part of the steel railway bridge structure and assessment is made by local hot spot stress approach. Stresses are determined based on strain measurements on specific locations in the detail, due to the passage of characteristic trains. Characteristic trains are an integral part of a load model formed by data from Croatian Railways. Accordingly, the fatigue life of the welded detail is calculated and the results are compared with fatigue life of the same detail which is determined based on the nominal stress approach.

Keywords: fatigue life, local Hot Spot stress approach, welded detail

1 Uvod

Najraširenija je i najjednostavnija metoda za procjenu životnoga vijeka čeličnih detalja izloženih umoru S-N metoda uz globalni pristup preko nominalnih naprezanja. Nominalno se naprezanje određuje pomoću klasične mehanike konstrukcija zanemarujući lokalne utjecaje poput koncentracije naprezanja unutar detalja, koji se u tom slučaju uzimaju u obzir na strani otpornosti. Ako se radi o geometrijski složenijemu detalju ili je detalj opterećen složenim stanjem naprezanja, primjenjuju se lokalni pristupi poput pristupa preko hot spot naprezanja ili efektivnoga naprezanja u zarezu [1, 2]. Lokalne procjene umora temelje se na proračunu naprezanja na očekivanu mjestu nastanka pukotine, uzimajući pri tome u obzir lokalne utjecaje. Cilj ovoga rada procjena je životnoga vijeka zbog umora zavarenoga detalja dodatne lamele koja je sastavni dio čelične konstrukcije željezničkoga mosta "Kupa Karlovac" primjenom lokalne hot spot metode. Izračunani se životni vijek uspoređuje sa životnim vijekom detalja određenim na temelju nominalnih naprezanja i preuzetim iz [3]. Za procjenu se rabe modeli opterećenja određeni na temelju izmjerenih deformacija na određenim mjestima u detalju zbog prolaza karakterističnih vlakova [3]. Mjerodavne razlike naprezanja dobivene na temelju stvarnih opterećenja uspoređuju se s preporučenom S-N krivuljom otpornosti iz EC3 [4].

2 S-N metode procjene umora

Kako bi se provela procjena preostalog životnog vijeka postojećih konstrukcija, treba prije svega identificirati i kategorizirati kritične detalje sa stajališta umora. Procjena se najčešće temelji na S-N metodi, što se često predlaže i u normama [4], [5]. Kritični se detalj svrstava u kategoriju s pripadajućom S-N krivuljom koja predstavlja njegovu otpornost na umor. S-N krivulje određuju se eksperimentalnim ispitivanjima različitih uzoraka izloženih promjenjivim naprezanjima konstantnih i promjenjivih amplituda. Svaka se od S-N krivulja prema EC3 identificira karakterističnom otpornošću kod umora pri $N = 2 \cdot 10^6$ promjena naprezanja, odnosno kategorijom detalja. Osnova je za proračun životnoga vijeka zavarenoga detalja zapis naprezanja od stvarnog opterećenja. Iz zapisa naprezanja u vremenu, koje je po prirodi stohastičkog karaktera, može se pomoću metoda prebrojavanja kao što su metoda rezervoara ili metoda toka kiše [1, 6, 7] dobiti niz razlika naprezanja konstantnih amplituda s pripadajućim brojem ponavljanja. Tako dobivene konstantne amplitude nazivaju se spektrom ili histogramom naprezanja i rabe se za daljnji proračun životnoga vijeka. Svaka se razlika naprezanja s pripadnim brojem ponavljanja promatra kao doprinos ukupnom oštećenju detalja umorom. Ukupno se oštećenje određuje Minerovom hipotezom linearne akumulacije oštećenja [8]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \cdot 1 \quad (1)$$

U izrazu (1) n_i je broj promjena razlika naprezanja konstantne amplitude $\Delta\sigma_i$, a N_i broj promjena naprezanja $\Delta\sigma_i$ do otkazivanja.

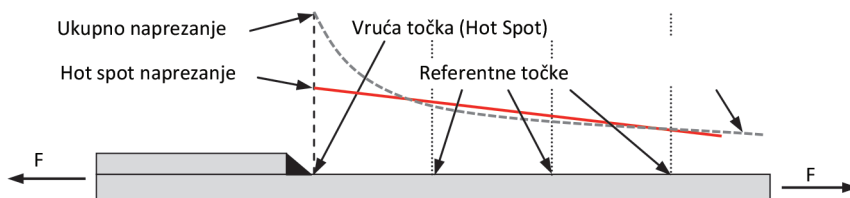
2.1 Pristup utemeljen na nominalnim naprezanjima

Najjednostavniji pristup za proračun djelovanja umora u obliku mjerodavnih razlika naprezanja pristup je utemeljen na nominalnim naprezanjima koja se proračunavaju pomoću klasične mehanike konstrukcija, zanemarujući već spomenute lokalne utjecaje. Ovakvi lokalni utjecaji indirektno se uzimaju u obzir na strani otpornosti pomoću eksperimentalno dobivenih S-N krivulja. Nominalno se naprezanje tada uspoređuje s pripadajućom S-N krivuljom. U pojedinim slučajevima nije moguće izračunati nominalno naprezanje ili se detalj zbog složene geometrije ne može svrstati u kategoriju danu normama. Tada se primjenjuju napredniji lokalni pristupi.

2.2 Hot Spot pristup

Jedan od lokalnih pristupa, kojim se ujedno povećava i preciznost procjene umora [1], jest hot spot pristup. Hot spot naprezanje predstavlja razliku naprezanja u očekivanom mjestu nastanka pukotine (rub vara). Ono se određuje mjerenjima na konstrukciji ili metodom konačnih elemenata koja omogućuje modeliranje stvarne geometrije detalja [9, 10]. Hot spot naprezanje uzima u obzir utjecaj lokalne geometrije, ali isključuje nelinearnu komponentu naprezanja od samoga vara zbog utjecaja zareza, što se indirektno uzima na strani otpornosti pomoću eksperimentalno dobivenih S-N krivulja. U fazi dimenzioniranja ionako nije moguće unaprijed poznavati stvarnu geometriju vara, pa je ova pretpostavka opravdana. Hot spot pristup zahtijeva manji broj S-N krivulja, budući da one moraju uzeti u obzir manji broj parametara [1].

U slučaju mjerenja na postojećim konstrukcijama, u referentnim se točkama mjere deformacije iz kojih se izvode naprezanja na temelju kojih se ekstrapolira hot spot naprezanje (slika 1.).



Slika 1. Ekstrapolacija naprezanja na mjesto hot spot-a

Referentne su točke u funkciji debljine ploče, te se nalaze na udaljenostima na kojima raspodjela naprezanja nije pod utjecajem geometrije vara. Ekstrapolirana razlika naprezanja predstavlja mjerodavnu razliku naprezanja koja se uspoređuje s odgovarajućom S-N krivuljom otpornosti. Smjernice i preporuke za ekstrapolaciju, kao i krivulje otpornosti za ovaj pristup, mogu se pronaći u [4, 5]. Hot spot pristup primjenjiv je ako promjenjiva naprezanja dominantno djeluju okomito na rub vara ili na kraju diskontinuiranoga uzdužnog vara uz pretpostavku da pukotina kod umora nastaje na rubu vara, a ne u njegovom korijenu.

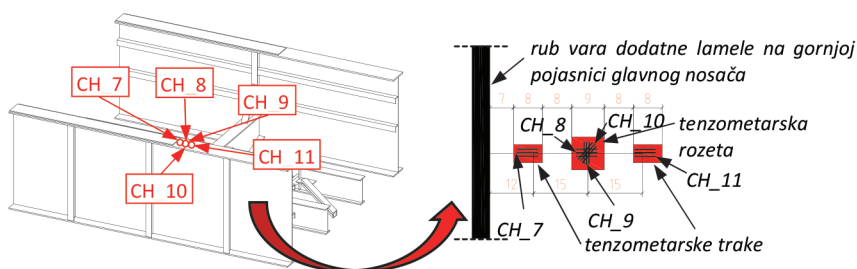
3 Primjena na primjeru čelične konstrukcije željezničkog mosta

3.1 Opis analiziranog detalja

Most "Kupa Karlovac" čelični je željeznički most pozicioniran na dionici M202 Zagreb-Rijeka. Izgrađen je 1873. i obnovljen 1945. Nova je čelična konstrukcija instalirana 1989. Most se sastoji od kontinuiranih zavarenih čeličnih nosača preko tri raspona (32,20 m + 38,42 m + 32,02 m). Budući da je kraj dodatne lamele jedan od kritičnih detalja sa stajališta umora [11], provedena su brojna ispitivanja ovoga detalja [12, 13]. Takav se detalj prema EC3 može svrstati u kategoriju 56 u slučaju pristupa preko nominalnih naprezanja, odnosno u kategoriju 100 za pristup preko hot spot pristupa [4].

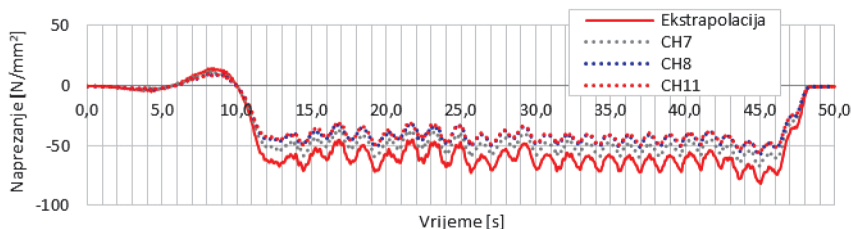
3.2 Provedba ispitivanja

Ispitivanje je provedeno u okviru doktorskoga rada [3]. Područje je ispitivanja gornja pojasnica glavnoga nosača na mjestu završetka dodatne lamele. Deformacije od stvarnoga opterećenja mjerene su tenzometrima postavljenima na određenim mjestima u detalju, prema slici 2.



Slika 2. Položaj mjernih uređaja (tenzometara) [3]

Rezultati ispitivanja dani su dijagramima naprezanja u vremenu (slika 3.). Naprezanja su izračunana uz pretpostavku linearnoelastičnoga ponašanja materijala s modulom elastičnosti $E = 210000 \text{ N/mm}^2$.

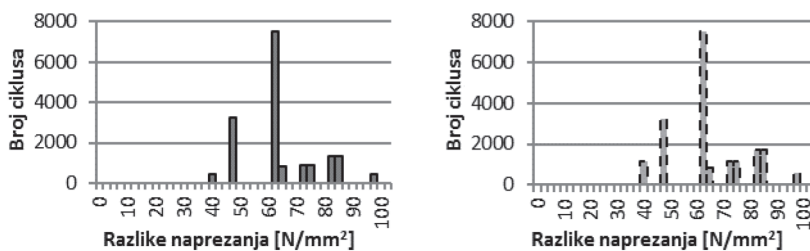


Slika 3. Izračunana naprezanja na pozicijama CH_7, CH_8 i CH_11 te vrijednost ekstrapoliranoga naprezanja zbog prolaza teretnoga vlaka 45906

Prema preporukama [5] u ovom se slučaju za određivanje hot spot naprezanja rabi kvadratna ekstrapolacija. Mjerni su uređaji postavljeni u referentnim točkama na udaljenostima $0,4t$, $0,9t$ i $1,4t$, gdje je t debljina pojasnice, slika 2. Ekstrapolacija naprezanja provodi se prema sljedećem izrazu:

$$\sigma_{hs} = 2,5\sigma_{0,4t} - 2,24\sigma_{0,9t} + 0,72\sigma_{1,4t} \quad (2)$$

Za svaki prolaz karakterističnoga vlaka dobiveni su zapisi naprezanja u vremenu (slika 3.). Slika 3. također prikazuje ekstrapolirane vrijednosti hot spot naprezanja dobivene pomoću izraza (2). Na temelju zapisa naprezanja u vremenu svakoga pojedinog vlaka iz modela opterećenja koji se sastoji od 5 putničkih i 7 teretnih vlakova dobiveni su histogrami razlika naprezanja prikazani na slici 4. Jedan histogram obuhvaća period od 1989. do 2013, a drugi period od 2013 godine.



Slika 4. Histogrami razlika naprezanja a) period 1989.-2013. b) period od 2013.

4 Rezultati i rasprava

Polazišna točka životnog vijeka konstrukcije je 1989. godina, budući da je tada zamijenjena čelična konstrukcija mosta. Primjenom izraza (2) u slučaju metode tolerantnosti oštećenja i metode sigurnoga vijeka te uzimajući u obzir male i velike posljedice otkazivanja [4] izračunani su ukupni životni vjekovi detalja prikazani u tablici 1. Nadalje, u tablici 1. su za usporedbu prikazani i rezultati za isti detalj dobiveni pristupom utemeljenom na nominalnim naprezanjima, preuzeti iz [3].

Tablica 1. Životni vjekovi detalja prema nominalnom i hot spot pristupu

Metoda procjene prema EC3	Posljedice otkazivanja	Životni vijek [godine]	
		Pristup utemeljen na nominalnim naprezanjima [3]	Hot Spot pristup
Tolerantnost oštećenja	Male posljedice $v_{M,f} = 1,00$	195	400
	Velike posljedice $v_{M,f} = 1,15$	130	234
Sigurni vijek	Male posljedice $v_{M,f} = 1,15$	130	234
	Velike posljedice $v_{M,f} = 1,35$	81	124

Prema tablici 1., primjenom lokalnoga hot spot pristupa pod pretpostavkom da neće doći do povećanja prometnoga opterećenja može se uočiti puno veći životni vijek u odnosu na životni vijek proračunan prema pristupu utemeljenom na nominalnim naprezanjima. Na temelju prikazanih rezultata zaključuje se da hot spot pristup pruža mogućnost preciznije procjene, odnosno, da pristup preko nominalnih naprezanja podcjenjuje životni vijek detalja. Prema tablici 1., ova se razlika posebice uočava kod životnoga vijeka detalja za sigurni vijek s velikim posljedicama. Za razliku od hot spot pristupa, pristupom preko nominalnih naprezanja se ne zadovoljava osnovni zahtijevani životni vijek čeličnoga mosta (100 godina).

5 Zaključak

Primjenom S-N metode izračunava se životni vijek zavarenoga detalja čelične konstrukcije željezničkog mosta. Globalni pristupi su jednostavniji za inženjerske procjene. Njima se indirektno na strani otpornosti (S-N krivulje) uzimaju u obzir lokalni utjecaji, a treba samo odrediti nominalno naprezanje na promatranu mjestu. Lokalni pristupi uzimaju veći broj parametara na strani djelovanja, čime se smanjuje potreban broj S-N krivulja. Na temelju prikazanih rezultata, zaključuje se da hot spot pristup rezultira duljim životnim vijekom analiziranoga detalja. Međutim, primjena hot spot pristupa kao složenije metode zahtijeva veće napore i povećava mogućnost pogreške. Bez obzira na preciznost metoda procjene umora zavarenih detalja bitnu ulogu i dalje ima opterećenje čiji se intenzitet i učestalost vrlo teško mogu pretpostaviti.

Literatura

- [1] Radaj, D., Sonsino, C.M. Fricke, W.: *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*, 2. izdanje, UK: Woodhead Publishing 2004.
- [2] Ye, X., Su, Y., Han, J.: *A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Assessment of Steel Bridges*, *Math. Probl. Eng.*, 2014, pp. 1–13.
- [3] Lukačević, I.: *Ujednačavanje pouzdanosti kategorija detalja čeličnih konstrukcija izloženih umoru*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Doktorski rad, Zagreb, 2014.
- [4] EN 1993-1-9, *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-9: Fatigue*, vol. 3. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2005.
- [5] Hobbacher, A.: *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*, IIW document IIW-2259-15, Springer International Publishing, 2015.
- [6] Matsuishi, M., Endo, T.: *Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress - Fatigue Lives under Random Loading*, Preliminary Proceedings of The Kyushu District Meeting, Fukuoka, Japan, The Japan Society of Mechanical Engineers, 1968.
- [7] Downing, S.D., Socie, D.F.: Simple rainflow counting algorithms, *Int. J. Fatigue*, 4 (1982) 1, pp. 31–40
- [8] Miner, M.A.: Cumulative damage in fatigue, *J. Appl. Mech.*, 12 (1945), pp. 159–164
- [9] Liu, R., Liu, Y., Ji, B., Wang, M., Tian, Y.: Hot spot stress analysis on rib-deck welded joint in orthotropic steel decks, *J. Constr. Steel Res.*, 97 (2014), pp. 1–9
- [10] Savaidis, G., Vormwald, M.: Hot-spot stress evaluation of fatigue in welded structural connections supported by finite element analysis, *Int. J. Fatigue*, 22 (2000) 2, pp. 85–91
- [11] Haghani, R., Al-Emrani, M., Heshmati, M.: Fatigue-Prone Details in Steel Bridges, *Buildings*, 2 (2012), pp. 456–476
- [12] Fisher, J., Frank, K., Hirt, M., McNamee, B.: *Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams*, Fritz Engineering Laboratory Report No. 334.2, 1969.
- [13] Albrecht, P., Lenwari, A.: Fatigue-Proofing Cover Plates, *J. Brid En ASCE*, 2007, pp. 275–283.