

АНАЛИЗА ЗАМОРА МАТЕРИЈАЛА КОД ЧЕЛИЧНИХ ДРУМСКИХ МОСТОВА ПРЕМА ЕВРОКОДУ

Петар Кнежевић¹,
Миливоје Милановић²

УДК: 539.431:625.712.36

DOI: 10.14415/zbornikGFS27.03

Резиме: У овом раду анализирана је носивост на замор карактеристичних детаља друмских мостова, према Еврокоду 3. Провера носивости на замор спроведена је на основу две различите методе које препоручује SRPS EN 1993-1-9, методом фактора еквивалентног оштећења и методом акумулације оштећења. Утицаји у карактеристичним детаљима одређени су на основу меродавних прорачунских модела, према одговарајућим стандардима. Поред величине напонског опсега, утицаји су дефинисани и њиховом учесталости током пројектованог животног века конструкције. Верификација замора методом фактора еквивалентног оштећења је спроведена на основу категоризације детаља, према SRPS EN 1993-1-9, док је код методе акумулације оштећења коришћена Miner-ова крива акумулације. На крају рада дато је поређење добијених резултата обе методе, коришћењем принципа еквивалентног напона.

Кључне речи: Замор, друмски мостови, оштећење, категорија детаља

1. УВОД

Замор материјала је појава која се састоји од формирања микропрслина и њиховог субкритичног раста све док у једном тренутку не дође до лома. Уобичајено се јавља код конструктивних елемената изложених цикличном оптерећењу. Поред корозије, замор материјала представља један од основних проблема трајности челичних конструкција.

Друмски мостови представљају типичан пример конструкција изложених цикличном дејству спољашњих утицаја. Главни параметар ових утицаја је напонски опсег који се јавља у елементима конструкције и његова учесталост (број циклуса). Код конструктивних детаља изложених затезању током читавог сервисног века, напонски опсег се рачуна као алгебарска разлика екстремних вредности напона:

$$\Delta\sigma = |\sigma_{\max} - \sigma_{\min}| \quad (1)$$

Верификација носивости на замор посматраног моста, спроведена је на основу две различите методе дате у [1]:

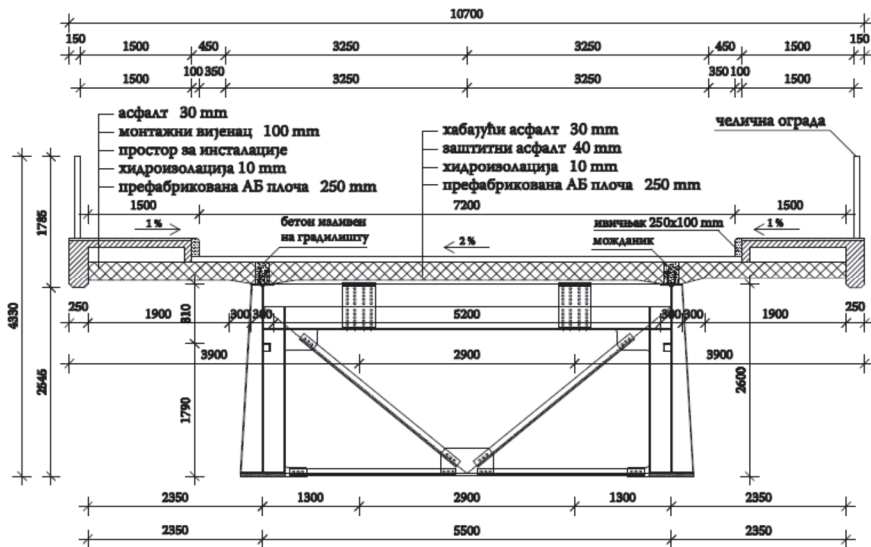
¹ Assist. PhD, State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia, petar.knezevic.dunp@gmail.com

² Assist. PhD, State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia, milanovicnp@gmail.com

- Метод еквивалентног оштећења – приликом одређивања утицаја услед саобраћајног оптерећења, користи се модел оптерећења *FLM3*, дефинисан према [2]. За дати модел оптерећења није потребно дефинисати број циклуса, већ се његова употреба везује за број циклуса од $N=2 \cdot 10^6$. Сва одступања прорачунског модела од стварне прорачунске ситуације се надомешћују употребом фактора еквивалентног оштећења λ .
- Метод акумулације оштећења - приликом одређивања утицаја услед саобраћајног оптерећења, користи се модел оптерећења *FLM4*, који се састоји од 5 различитих врста тешких возила са европских путева. Поред димензија и осовинског оптерећења, дате моделе дефинише и њихова учесталост према [2]. Предпоставља се линеарна акумулација оштећења (*Miner-ова крива*).

2. УЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ

Анализа носивости на замор спроведена је за карактеристичне конструктивне детаље спрегнутог моста, чији је попречни пресек приказан на следећој слици. Мост је статичког система просте греде, распона 40м са две саобраћајне траке. Попречна укрућења су постављена на растојању од $L/10$.



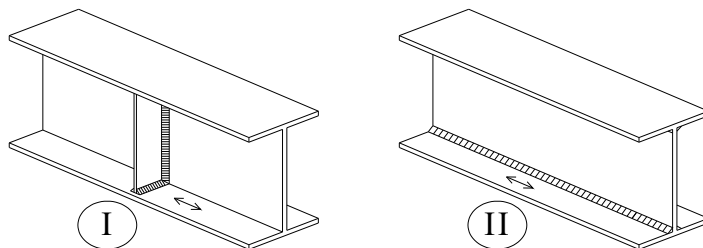
Слика 1. - Попречни пресек моста

Геометријске карактеристике пресека главног носача: $I_{y,d}=21975500\text{cm}^4$
 $A_w=304.8\text{cm}^2$ $e_{a,d}=237\text{cm}$

Подаци о анализираним детаљима:

Детаљ I – веза између вертикалног укрућења и доње ножице главног носача у средини распона ($x = 20\text{m}$)

Детаљ II – веза између ребра и доње ножице главног носача у средини распона, остварена помоћу машинских шавова са стани-крени позицијама ($x=20\text{m}$).



Слика 2 - Шематски приказ карактеристичних детаља

Улазни подаци:

Материјал: челик S355; бетон C40/50

Метода провере: метода сигурног животног века

Степен последица лома: висок

Пројектовани животни век: $t_{Ld} = 100$ година

Категорија саобраћајнице: III–Главни путеви са ниским протоком тешког саобраћаја $N_{obs} = 125000$ (Табела 4.5 [2])

Просечна нето тежина возила у спорој траци: $-Q_{m1} = 410\text{kN}$

3. ВЕРИФИКАЦИЈА МЕТОДОМ ЕКВИВАЛЕНТНОГ ОШТЕЋЕЊА

Провера носивости на замор карактеристичних детаља ће бити спроведена приближним поступком, помоћу кофицијената еквивалентног оштећења λ . При одређивању опсега напона користи се модел оптерећења *FML3*, лоциран у средини траке за тешка возила. Одговарајући фактор попречне прерасподеле за главни носач износи $\eta_1 = 0.882$.

Парцијални фактори: $\gamma_{Ff} = 1$ $\gamma_{Mf} = 1.35$ **Error! Reference source not found.**

Парцијални фактори еквивалентног оштећења:

$$\lambda_1 = 2.55 - 0.7 \frac{L-10}{70} = 2.55 - 0.7 \frac{40-10}{70} = 2.2 \quad (2)$$

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_o} \left(\frac{N_{obs}}{N_o} \right)^{\frac{1}{5}} = \frac{410}{480} \left(\frac{125 \cdot 10^3}{500 \cdot 10^3} \right)^{\frac{1}{5}} = 0.647 \quad (3)$$

$$\lambda_3 = \left(\frac{t_{Ld}}{100} \right)^{\frac{1}{5}} = \left(\frac{100}{100} \right)^{\frac{1}{5}} = 1 \quad (4)$$

Ширина моста омогућава постојање две траке са тешким саобраћајем. Утицај друге траке се узима у обзир помоћу парцијалног фактора λ_4 . Претпоставља се исти интензитет саобраћаја у обе траке $N_1 = N_2$, $Q_{m1} = Q_{m2}$. Фактор прерасподеле утицаја за возило у траци 2, добијен преко утицајне линије, износи $\eta_2 = 0.317$.

$$\lambda_4 = \left[1 + \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{n_2 Q_{m2}}{n_1 Q_{m1}} \right)^m \right]^{\frac{1}{m}} = 1.006^{0.2} = 1.001 \quad (5)$$

$$\lambda_{\max} = 2.5 - 0.5 \frac{L-10}{15} = 1.5 < 2 \Rightarrow \lambda_{\max} = 2 \quad (6)$$

$$\lambda_i = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 1.424 < \lambda_{\max} \quad (7)$$

$$\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \varphi_2 \cdot \sigma_{Ed} \quad \varphi_2 = 1 \quad (8)$$

Табела 1 - Верификација носивости на замор методом еквивалентног оштећења

Detalj	$\Delta\sigma_{Ed}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	$\frac{\gamma_{Ff} \gamma_{Mf} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c}$ [MPa]	Komentar
I	36.8	50.40	80	0.850	< 1 zadovoljava
II			112	0.607	< 1 zadovoljava

4. ВЕРИФИКАЦИЈА МЕТОДОМ АКУМУЛАЦИЈЕ ОШТЕЋЕЊА

Према дужини, саобраћајница се може сврстати у локалне путеве малих дужина (до 50км). Меродавни утицаји ће бити одређени помоћу утицајних линија и одговарајућег фактора попречне расподеле оптерећења $\eta = 0.8818 + 0.317 = 1.1988$. За задати животни век (100 година) и категорију саобраћајнице (локални путеви), број циклуса услед саобраћајног оптерећења је дефинисан табелом 2

Табела 2 - Број циклуса саобраћајног оптерећења

Камион	%	n_i / година	n_i у 100 година
1	80	$100 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^5$
2	5	$6.25 \cdot 10^3$	$6.25 \cdot 10^5$
3	5	$6.25 \cdot 10^3$	$6.25 \cdot 10^5$
4	5	$6.25 \cdot 10^3$	$6.25 \cdot 10^5$
5	5	$6.25 \cdot 10^3$	$6.25 \cdot 10^5$
Σ	100	$125 \cdot 10^3$	$125 \cdot 10^5$

Коначни критеријум за верификацију овом методом је дат на следећи начин:

$$D_d = \sum D_i = \sum \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq 1, \text{ где су:} \quad (9)$$

n_{Ei} - број циклуса са опсегом напона $\Delta\sigma_{Ei} = \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$

N_{Ri} - трајност детаља изражена преко броја циклуса, а добијена преко

факторисане S-N криве $\left(\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} - N_R \right)$ за опсег напона $\Delta\sigma_{Ei} = \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$.

$$N_{Ri} = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\Delta\sigma_i \gamma_{Ff}} \right)^m, \text{ где је:} \quad (10)$$

$$m - \text{нагиб S-N криве } m = \begin{cases} 3 \text{ за } \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D/\gamma_{Mf} \\ 5 \text{ за } \Delta\sigma_L/\gamma_{Mf} \leq \Delta\sigma_p < \Delta\sigma_D/\gamma_{Mf} \end{cases}$$

$\Delta\sigma_C$ – категорија детаља према [1]

$\Delta\sigma_D$ – граница носивости на замор при константној амплитуди оптерећења, у

функцији категорије детаља $\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \Delta\sigma_C = 0.737\Delta\sigma_C$

$\Delta\sigma_L$ – доња граница носивости на замор $\Delta\sigma_D = \left(\frac{5}{100}\right)^{\frac{1}{5}} \Delta\sigma_C = 0.405\Delta\sigma_C$

Табела 3 – Верификација носивости на замор методом акумулације оштећења

Возило	ΔM_i [kNm]	$\Delta\sigma_i$ [MPa]	n_i	Детаљ I ($\Delta\sigma_C=80MPa$)			Детаљ II ($\Delta\sigma_C=112MPa$)		
				m	N_i	D_i	m	N_i	D_i
1	2293.77	24.09	$100 \cdot 10^5$	5	$9.8 \cdot 10^7$	0.102	-	-	-
2	3447.00	36.54	$6.25 \cdot 10^5$	5	$1.2 \cdot 10^7$	0.051	5	$65.41 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-4}$
3	4857.63	51.50	$6.25 \cdot 10^5$	3	$3.05 \cdot 10^6$	0.205	5	$11.76 \cdot 10^6$	0.053
4	3806.52	40.36	$6.25 \cdot 10^5$	5	$7.44 \cdot 10^6$	0.084	5	$39.79 \cdot 10^6$	0.016
5	4278.13	45.35	$6.25 \cdot 10^5$	3	$4.47 \cdot 10^6$	0.140	5	$22.21 \cdot 10^6$	0.028
						0.58 < 1	0.106 < 1		

5. ПОРЕЂЕЊЕ РЕЗУЛТАТА ПРИНЦИПОМ ЕКВИВАЛЕНТНОГ НАПОНА

Иако је носивост на замор задовољена применом обе верификационе методе, компарација добијених резултата није могућа, због разлике у приступима. Међутим, применом принципа еквивалентног напона, према [3], могуће је направити поређење. Резултати добијени методом акумулације оштећења се трансформишу у напонски облик, у виду еквивалентног напона $\Delta\sigma_E$ и еквивалентног броја циклуса до колапса N_E :

$$\Delta\sigma_E = \left(\frac{\sum n_i \Delta\sigma_i^{m_i} + \sum n_j \Delta\sigma_j^{m_j} (\Delta\sigma_j/\Delta\sigma_D)^{m_j-m_i}}{\sum n_i + \sum n_j} \right)^{1/m_i} \quad (11)$$

i - индекс који се односи на опсеге напона веће од $\Delta\sigma_D$

j - индекс који се односи на опсеге напона мање од $\Delta\sigma_D$

$m_i = 3$; $m_j = 5$ – нагиби S-N кривих

$$N_E = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}}{\gamma_{Ef} \cdot \Delta\sigma_E} \right)^3 \quad (12)$$

Коначно поређење се врши за напоне $\Delta\sigma_{E,2}$ који одговарају броју циклуса долома од $N=2 \cdot 10^6$:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \Delta\sigma_E \left(\frac{n_i}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

Табела 4 - Поређење резултата применом принципа еквивалентног напона

Детаљ	$\Delta\sigma_C$ [MPa]	$\Delta\sigma_E$ [MPa]	N_E	$\Delta\sigma_{E,2}$ [MPa]	Метода акумулације оштећења		Метода еквивалентног оштећења
					$\frac{\gamma_{FF}\gamma_{MF}\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C}$ [MPa]	> <	$\frac{\gamma_{FF}\gamma_{MF}\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C}$ [MPa]
I	80	26.87	$21.51 \cdot 10^6$	49.5	0.835	<	0.850
II	112	21.34	$11.74 \cdot 10^7$	39.31	0.473	<	0.607

6. ЗАКЉУЧАК

Независно од методе верификације, категорија детаља и одговарајућа логаритамска S-N kriva дефинишу његову носивост на замор, при цикличном оптерећењу. Верификација носивости на замор методом фактора оштећења представља приближну методу, којом се сва одступања прорачунског модела оптерећења од стварног оптерећења обухватају са четири парцијална коефицијента оштећења. Употреба само једног типа возила, наглашава ову методу као најпогоднију за решавање уобичајених проблема носивости на замор конструкција. Ова метода је конзервативнија пошто не занемарује опсеге напона испод доње границе $\Delta\sigma_L$, који не утичу на носивост на замор.

Метода акумулације оштећења је тачнија, али примена 5 различитих модела тешких возила знатно усложњава прорачун. Иако се заснива на принципу линеарне акумулације оштећења, могућа је конверзија коначних резултата верификације у напонски облик, чиме се може извршити компарација резултата и показати да метода акумулације оштећења даје мање конзервативна решења од методе еквивалентног оштећења.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] CSN EN 1993-1-9, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue;
- [2] CSN EN 1991-2, Eurocode 1: Action on structures - Part 2: Traffic loads on bridges
- [3] Mustafa A., Mohamad A., *Fatigue design of steel and composite bridges* (2014). Chalmers university of technology, Sweden
- [4] Nussbauer A., Borges L., & Davaine L. *Fatigue design of steel and composite structures* (2011)

FATIGUE ANALYSIS OF STEEL ROAD BRIDGES BY EUROCODE

Summary: *The fatigue strength of the characteristic details of road bridges by Eurocode 3 has been analysed in this paper. Verification of fatigue resistance has carried out by two different methods, recommended by SRPS EN 1993-1-9, the method of damage equivalent factor and the damage accumulation method. The action effects in characteristic details were calculated using load models defined in appropriate standards. Beside of stress range, fatigue effects are defined by stress frequency during designed lifetime of construction. Fatigue verification by method of equivalent damage factor has been performed using the detail categories defined in SRPS EN 199-1-9, while fatigue verification according to damage accumulation method has been performed using the Miner's accumulation curve. Comparison of results obtained by these two methods has been presented at the end of the paper, using the concept of equivalent stress.*

Keywords: *Composite columns, fire resistance, interaction diagrams*