

doi: 10.67563/ASESCONF2026092G

Dunja Gavrilović¹

VERIFICATION OF THE FATIGUE LIMIT STATE FOR A CHIMNEY STRUCTURE ACCORDING TO EN 1993-1-9

Summary: According to EN 1993-1-9, when assessing a fatigue design situation, all relevant stress increase effects in specific construction details should be considered, regardless of the chosen design stress method. The methods for verifying the fatigue limit state include the nominal stress method, the hot spot stress method, and the effective notch stress method. Typically, fatigue load control is performed using the nominal stress method (S-N curves) with linear-elastic analysis, as outlined in EN 1993-1-1. This paper outlines the procedures for assessing fatigue loads and verifying the fatigue strength criteria in the construction details of a steel chimney.

Keywords: fatigue, wind action, constructional detail, stress range, butt weld, bolt

PRIMER VERIFIKACIJE GRANIČNOG STANJA ZAMORA KONSTRUKCIJE DIMNJAKA PREMA EN 1993-1-9

Rezime: Prema EN 1993-1-9, pri verifikaciji zamor proračunske situacije, svi relevantni efekti povećanja napona u karakterističnim konstrukcionim detaljima moraju se uzeti u obzir, bez obzira na izabranu metodu proračunskog napona. Metode za verifikaciju graničnog stanja zamora su metoda nominalnog napona, metoda napona u „vrućim tačkama“ i metoda efektivnog napona na mestu zareza. U najvećem broju slučajeva, kontrola nosivosti na zamor sprovodi se primenom metode nominalnog napona (S-N krive) korišćenjem linearno elastične analize prema EN 1993-1-1. U ovom radu prikazane su procedure za procenu zamor opterećenja i verifikaciju kriterijuma nosivosti na zamor u konstrukcionim detaljima čelične konstrukcije dimnjaka.

Ključne reči: zamor, dejstvo vetra, konstrukcioni detalj, opseg napona, sučeoní šav, zavrtnanj

¹ VMS d.o.o, Belgrade, Serbia, gavrilovicdunja5@gmail.com

1. ZAMOR

Zamor je postepen, progresivan i lokalizovani proces oštećenja konstrukcijske komponente (detalja) koja je izložena dejstvu zamor-opterećenja (ponovljena, ciklična i fluktuirajuća opterećenja), koji može kulminirati destrukcijom (lomom) čeličnog materijala usled nastanka i širenja zamor-prslina. Različiti faktori utiču na životni ciklus konstrukcijske komponente usled zamora, a najvažniji su: (i) sredina (ili stepen agresivnosti sredine), (ii) koncentracija napona, (iii) mikrostruktura i zaostali naponi, (iv) istorija opterećenja, (v) stanje površine i (vi) mehanička svojstva. Analiza ovih faktora i njihovog uticaja na karakteristike površine loma je složen zadatak i zahteva poznavanje metalurgije, nauke o materijalima i elektrohemije. Verifikacija proračunske zamor-situacije podrazumeva dugoročne neizvesnosti vezane za nosivost na zamor i povezana dejstva, što znači da, iako se mogućnost zamora-prslina ne može u potpunosti eliminisati, može se svesti na prihvatljiv nivo pojave.

Inicijalna prslina se obično javlja na mestima zavarenih spojeva. Usled tehnološkog postupka izrade, na mestu šava može doći do pojave defekta ili inicijalnog zarez koji deluje kao koncentrador napona i mesto formiranja prslina. Posebno su osetljivi zavareni elementi opterećeni zatezanjem. Pravilno konstruisanje detalja zavarenih spojeva je od posebnog značaja za nosivost na zamor.

Razlikuju se dve vrste zamora:

- Niskociklični zamor-karakterise ga mali broj ciklusa opterećenja i velike plastične deformacije

- Visokociklični zamor-karakterise ga veliki broj ciklusa opterećenja i naprezanja manja od granice razvlačenja (elastično ponašanje)

Ovaj rad prikazuje EN 1993-1-9 [1] procedure za verifikaciju kriterijuma zamor-graničnih stanja na primeru čelične konstrukcije dimnjaka [2]. Razmatran je visokociklični zamor, s obzirom na to da je tokom eksploatacije konstrukcija izložena cikličnom opterećenju. Zamor može biti relevantan usled opsega napona koji nastaje usled sila u pravcu vetra i upravno na pravac vetra. Kod ovakvih konstrukcija zamor usled poprečnih vibracija izazvanih vrtložnim odvajanjem je najčešće merodavan, zbog čega se proveru zamora usled vibracija u pravcu vetra obično ne sprovodi.

U skladu sa EN 1991-1-4 [3], vrtložno odvajanje nastaje kada se vrtlozi vetra naizmenično odvajaju sa suprotnih strana cilindrične ljuske, duž određene dužine korelacije, usled čega nastaje fluktuirajuće opterećenje i oscilovanje konstrukcije upravno na pravac dejstva vetra. Do ove pojave dolazi kada je brzina vetra jednaka kritičnoj brzini vetra. Kritična brzina vetra predstavlja učestalu brzinu, pri kojoj broj ciklusa opterećenja može postati relevantan, a samim tim i zamor konstrukcije.

2. OSNOVE PRORAČUNA ZAMORA

Prilikom analize nosivosti na zamor korišćena je Metoda opsega napona. Metoda opsega napona zasniva se na sledećoj verifikaciji graničnog stanja nosivosti na zamor koja je data u standardu EN 1993-1-9 [1]:

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_E \leq \Delta \sigma_C / \gamma_{Mf} \quad (1)$$

Gde su:

- $\Delta \sigma_E$ proračunska vrednost opsega napona za N ciklusa opterećenja

- $\Delta \sigma_C$ proračunska vrednost čvrstoće na zamor za odgovarajuću kategoriju detalja, za dva miliona ciklusa

- γ_{Ff} parcijalni koeficijent za zamor opterećenje

- γ_{Mf} parcijalni koeficijent za čvrstoću na zamor

Parcijalni koeficijenti za zamor opterećenje γ_{Ff} jednak je jedinici. Parcijalni koeficijent za čvrstoću na zamor γ_{Mf} određuje se na osnovu Metode prihvatljivog oštećenja i jednak je jedinici.

Čvrstoća na zamor određuje se na osnovu S-N krive za različite kategorije detalja. Ove krive predstavljaju vezu između opsega napona i broja ciklusa opterećenja pri lomu u logaritamskoj razmeri. Referentan broj ciklusa za određivanje čvrstoće na zamor jeste dva miliona i proračunske vrednosti čvrstoće na zamor $\Delta\sigma_C$ date su u tabelama u standardu za odgovarajuće kategorije detalja.

Proračunska vrednost opsega napona $\Delta\sigma_E$ računa se za N ciklusa opterećenja. Broj ciklusa opterećenja usled oscilacija izazvanih odvajanjem vrtloga računa se prema izrazu datom u standardu EN 1991-1-4 [3]:

$$N = 2Tn_y\varepsilon_0 \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 e^{-(v_{crit}/v_0)^2} \quad (2)$$

Gde su:

- N broj ciklusa opterećenja
- T životni vek konstrukcije dimnjaka (50 godina) izražen u sekundama [s]
- n_y sopstvena frekvencija konstrukcije [Hz]
- ε_0 faktor čija je preporučena vrednost 0,3
- v_{crit} kritična brzina vetra [m/s]
- v_0 20% karakteristične srednje brzine vetra [m/s]

Sopstvena frekvencija konstrukcije n_y dobijena je kao rezultat modalne analize koja je sprovedena na grednom modelu konstrukcije dimnjaka formiranom u softveru Sofistik. Kritična brzina vetra računa se prema izrazu datom u standardu EN 1991-1-4 [3]:

$$v_{crit} = \frac{bn_y}{S_t} \quad (3)$$

Gde su:

- b prečnik konstrukcije dimnjaka koji iznosi 3,3 m [m]
- n_y sopstvena frekvencija konstrukcije [Hz]
- S_t Strouhalov broj čija je vrednost 0,18 data u standardu EN 1991-1-4 [3] za odgovarajući tip poprečnog preseka

Karakteristična srednja brzina vetra v_m , na osnovu koje se računa v_0 , data je u standardu EN 1991-1-4 [3] sledećim izrazom:

$$v_m(z) = C_r(z)C_0(z)v_b \quad (4)$$

Gde su:

- $C_r(z)$ koeficijent hrapavosti
- $C_0(z)$ koeficijent topografije terena
- v_b osnovna brzina vetra [m/s]

Tabela 1: Proračun srednje brzine vetra

Visina konstrukcije dimnjaka z [m]	80
Parametar terena z_0	0,05
Parametar terena k_r	0,19
Koeficijent hrapavosti $C_r(z) = k_r \ln(z/z_0)$	1,40
Koeficijent topografije terena $C_0(z)$	1
Koeficijent pravca C_{dir}	1
Koeficijent sezonskog delovanja C_{season}	1
Osnovna fundamentalna brzina vetra $v_{b,0}$ [m/s]	21
Osnovna brzina vetra $v_b = C_{dir}C_{season}v_{b,0}$ [m/s]	21
Srednja brzina vetra v_m [m/s]	29,40

Vrednosti parametara z_0 , k_r , $C_0(z)$, C_{dir} i C_{season} , koje su prikazane u tabeli 1, preuzete su iz standarda EN 1991-1-4 [3] kao preporučene vrednosti. Osnovna fundamentalna brzina vetra zavisi od teritorije na kojoj se konstrukcija nalazi. Za grad Beograd, gde se konstrukcija dimnjaka nalazi, vrednost $v_{b,0}$ iznosi 21 m/s.

U cilju verifikacije nosivosti na zamor, potrebno je transformisati proračunsku vrednost opsega napona $\Delta\sigma_E$ u ekvivalentni opseg napona $\Delta\sigma_{E,2}$, koji se odnosi na dva miliona ciklusa opterećenja. Ova transformacija vrši se pomoću faktora λ i data je u standardu EN 1993-3-2 [4] sledećim izrazom:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \Delta\sigma_E \quad (5)$$

Gde su:

- $\Delta\sigma_{E,2}$ proračunska vrednost opsega napona za dva miliona ciklusa [MPa]

- λ faktor kojim se vrši transformacija

- $\Delta\sigma_E$ proračunska vrednost opsega napona za N ciklusa opterećenja [MPa]

Faktor λ zavisi od broja ciklusa opterećenja N i nagiba S-N krive za relevantan broj ciklusa. Izraz prema kome se računa faktor λ dat je u standardu EN 1993-3-2 [4].

Tabela 2: Proračun faktora λ

$T=3,2 \cdot 10^7$ životni vek konstrukcije [s]	1600000000
Sopstvena frekvencija n_y [Hz]	0,76
Faktor ε_0	0,30
Kritična brzina vetra v_{crit} [m/s]	13,93
Srednja brzina vetra v_m [m/s]	29,40
$v_0=0,2 v_m$ [m/s]	5,88
Broj ciklusa opterećenja N	15099918,32
Nagib S-N krive $1/m$	1/5
$\lambda=(N/2 \cdot 10^6)^{1/5}$	1,50

3. KONTROLA NOSIVOSTI NA ZAMOR KARAKTERISTIČNIH DETALJA

Za noseću konstrukciju dimnjaka visine 80 m i prečnika 3,3 m sprovedena je kontrola nosivosti na zamor za šest karakterističnih konstrukcionih detalja (slika 1). Analizom su obuhvaćeni zavareni spojevi sa sučeonim šavovima i montažni nastavci sa zavrtnejevima koji pripadaju oslonačkom segmentu čeličnog plašta debljine 18 mm (slika 2). Za verifikaciju nosivosti na zamor potrebno je odrediti opseg napona u preseku koji odgovara poziciji razmatranog konstrukcionog detalja. Opseg napona $\Delta\sigma_E$ predstavlja razliku između maksimalnog i minimalnog aksijalnog napona na mestu razmatranog tipa detalja. Vrednost aksijalnog napona određuje se prema sledećem izrazu:

$$\sigma_{x,Ed} = N_x / 2\pi r \pm M / \pi r^2 \quad (6)$$

Gde su:

- $\sigma_{x,Ed}$ proračunska vrednost aksijalnog napona [MPa]

- N_x aksijalna sila na mestu posmatranog detalja [kN]

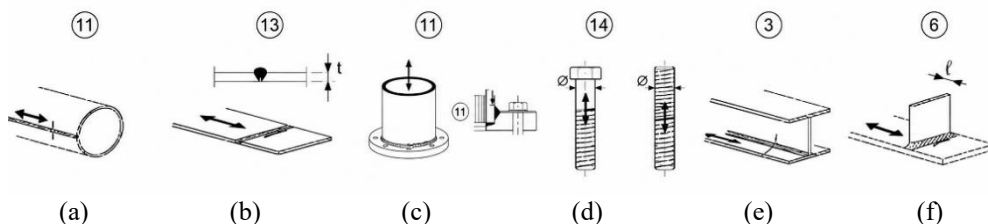
- M rezultujući moment na mestu posmatranog detalja [kNm]

- π konstanta

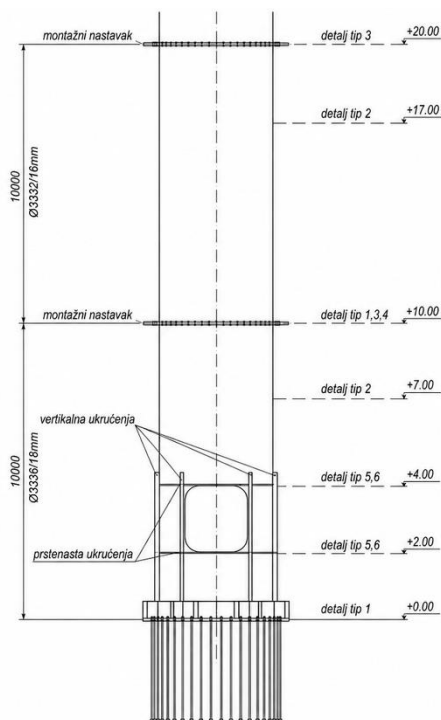
- r poluprečnik cilindrične ljuske za razmatrani segment konstrukcije [mm]

- t debljina zida cilindrične ljuske za razmatrani segment konstrukcije [mm]

Prvi tip detalja koji je kontrolisan odnosi se na podužne sučeone šavove na mestima radioničkih spojeva. Karakteristična nosivost je data u standardu EN 1993-1-9 [1] tabela 8.2, detalj 11.



Slika 1: Konstrukcioni detalji čeličnog dimnjaka (preuzeto iz standarda EN 1993-1-9 [1])



Slika 2: Šematski prikaz prvog i drugog montažnog segmenta konstrukcije dimnjaka sa označenim položajima razmatranih konstrukcionih detalja (preuzeto iz [2])

Tabela 3: Kontrola nosivosti na zamor za tip detalja 1

Položaj razmatranog detalja z [m]	0	10
$\sigma_{x,Ed,min}$ [MPa]	-29,88	-26,73
$\sigma_{x,Ed,max}$ [MPa]	22,50	19,84
$\Delta\sigma_E$ [MPa]	52,38	46,57
$\Delta\sigma_{E,2}=\lambda \Delta\sigma_E$	78,48	69,78
$\Delta\sigma_C$ [MPa]	90	90
$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}$	zadovoljeno	zadovoljeno
Koeficijent iskorišćenosti	0,87	0,77

Tip detalja 2 koji je proveravan odnosi se na poprečne sučeone šavove na mestima radioničkih spojeva. Karakteristična nosivost ovog detalja je data u standardu EN 1993-1-9 [1] tabela 8.3, detalj 13.

Tabela 4: Kontrola nosivosti na zamor za tip detalja 2

Položaj razmatranog detalja z [m]	7	17
$\sigma_{x,Ed,min}$ [MPa]	-28,43	-22,37
$\sigma_{x,Ed,max}$ [MPa]	18,69	16,64
$\Delta\sigma_E$ [MPa]	47,12	39,01
$\Delta\sigma_{E,2}=\lambda \Delta\sigma_E$	70,60	58,455
$\Delta\sigma_C$ [MPa]	71	71
$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}$	zadovoljeno	zadovoljeno
Koeficijent iskorišćenosti	0,99	0,82

Tip detalja 3 odnosi se na montažne nastavke. Montažni nastavci su izvedeni pomoću prirubnica zavarenih za cilindričnu ljusku pomoću sučeonih šavova. Primena sučeonih šavova povoljnija je sa aspekta zamora u odnosu na primenu ugaonih šavova. Karakteristična nosivost za ovaj detalj je data u standardu EN 1993-1-9 [1] tabela 8.5, detalj 11.

Tabela 5: Kontrola nosivosti na zamor za tip detalja 3

Položaj razmatranog detalja z [m]	10	20
$\sigma_{x,Ed,min}$ [MPa]	-26,73	-23,21
$\sigma_{x,Ed,max}$ [MPa]	19,84	17,21
$\Delta\sigma_E$ [MPa]	46,57	40,41
$\Delta\sigma_{E,2}=\lambda \Delta\sigma_E$	69,78	60,55
$\Delta\sigma_C$ [MPa]	71	71
$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}$	zadovoljeno	zadovoljeno
Koeficijent iskorišćenosti	0,98	0,85

Četvrti razmatrani tip detalja jesu zavrtnjevi kojima su ostvareni montažni nastavci. Karakteristična nosivost detalja data je u standardu EN 1993-1-9 [1] tabela 8.1, detalj 14. Montažni nastavak ostvaren je pomoću 54 zavrtnja M30, kvaliteta 8.8.

Zavrtnjevi koji su izloženi zatezanju i cikličnom opterećenju treba da budu prethodno napregnuti. Razlog za to je što se kod zavrtnjeva koji nisu prethodno napregnuti u telu zavrtnja i navojima javljaju znatno veći opsezi napona nego kod prethodno napregnutih zavrtnjeva. Kod prethodno napregnute veze sila prednaprežanja deluje kao statička sila, pri čemu se u vezi uspostavlja sistem samouravnoteženih sila. Na telo zavrtnja ovo ima isti uticaj kao da u njemu postoji zaostali napon zatezanja, zbog čega se pri proračunu zamora ne može smatrati da ovaj napon pozitivno utiče na smanjenje opsega napona u samom zavrtnju. Usled koncentracije napona u navojima, zavrtnjevi opterećeni na zatezanje kritičniji su sa aspekta zamora u odnosu na zavrtnjeve opterećene na smicanje [5].

U specijalizovanoj literaturi razvijeno je više različitih modela za određivanje sile u zavrtnju u zavisnosti od aplicirane, odnosno spoljašnje sile. Metoda koja je primenjena u proračunu zasniva se na teoriji koju je razvio Peterson [6]. Varijacija sile u samom zavrtnju računa se prema izrazu koji je dat u literaturi [5]:

$$\Delta F = \Delta N \cdot \frac{C_b}{(C_b + C_p)} = \Delta N \cdot p = \Delta N \cdot 0,2 \quad (7)$$

Gde su:

- ΔF varijacija sile u samom zavrtnju [kN]
- ΔN opseg sile (spoljašnje) na mestu spoja [kN]
- C_b aksijalna krutost zavrtnja
- C_p aksijalna krutost veze

Inicijalno povećanje krutosti prethodno napregnutog spoja proizilazi iz činjenice da krutost limova veze (C_p) i aksijalna krutost zavrtnja (C_b) zajedno prihvataju dejstvo spoljašnjeg opterećenja, odnosno promenu opterećenja. Najveći deo promene opterećenja dovodi do smanjenja pritiska između limova, odnosno prirubnica, dok se manji deo prenosi na zavrtnjeve. Promena sile u samom zavrtnju zbog toga se može izraziti preko odnosa krutosti (C_p) i (C_b).

Opseg sile $\Delta N'$ računa se prema izrazu koji je dat u literaturi [5]:

$$\Delta N' = c s \Delta \sigma_{\text{shell}} (D_s/4 - s/2)(1 + b/a + s/2a) / (D_s/4 + b) \quad (8)$$

Gde su:

- c širina segmenta koji sadrži jedan zavrtnj [mm]
- s debljina zida ljuske [mm]
- $\Delta \sigma_{\text{shell}}$ opseg napona u ljusci usled savijanja [MPa]
- D_s spoljašnji prečnik ljuske [mm]
- b rastojanje od ose zavrtnjeva do srednje površi ljuske [mm]
- a rastojanje od ose zavrtnjeva do kraja prirubnice [mm]

Tabela 6: Kontrola nosivosti na zamor za tip detalja 4

Položaj razmatranog detalja z [m]	10
Opseg napona u ljusci $\Delta \sigma_{\text{shell}}$ [MPa]	23,59
Širina segmenta c [mm]	211,30
Spoljašnji prečnik D_s [mm]	3329
Debljina ljuske s [mm]	14,50
Rastojanje b [mm]	157,25
Rastojanje a [mm]	300
Opseg sile $\Delta N'$ [kN]	93,32
$\Delta F = \Delta N' \cdot 0,2$ [kN]	18,66
$\Delta \sigma_E = \Delta F / A_s$ [MPa]	33,27
$\Delta \sigma_{E,2} = \lambda \Delta \sigma_E$	49,85
$\Delta \sigma_C$ [MPa]	50
$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} \leq \Delta \sigma_C / \gamma_{Mf}$	zadovoljeno
Koeficijent iskorišćenosti	0,99

Tip detalja 5 odnosi se na zavarene spojeve vertikalnih ukrućenja sa cilindričnom ljuskom izvedene primenom podužnih sučeonih šavova. Karakteristična nosivost ovog tipa detalja je data u standardu EN 1993-1-9 [1] tabela 8.2, detalj 3.

Tabela 7: Kontrola nosivosti na zamor za tip detalja 5

Položaj razmatranog detalja z [m]	2	4
$\sigma_{x,Ed,min}$ [MPa]	-28,19	-27,36
$\sigma_{x,Ed,max}$ [MPa]	21,20	20,56
$\Delta \sigma_E$ [MPa]	49,39	47,92
$\Delta \sigma_{E,2} = \lambda \Delta \sigma_E$	74,00	71,80
$\Delta \sigma_C$ [MPa]	112	112
$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} \leq \Delta \sigma_C / \gamma_{Mf}$	zadovoljeno	zadovoljeno
Koeficijent iskorišćenosti	0,66	0,64

Poslednji tip detalja koji je analiziran odnosi se na mesta gde su prstenasta ukrućenja zavarena sučeonim šavovima za cilindričnu ljusku. Karakteristična nosivost ovog tipa detalja data je u standardu EN 1993-1-9 [1] tabela 8.4, detalj 6.

Tabela 8: Kontrola nosivosti na zamor sa tip detalja 6

Položaj razmatranog detalja z [m]	2	4
$\sigma_{x,Ed,min}$ [MPa]	-28,19	-27,36
$\sigma_{x,Ed,max}$ [MPa]	21,20	20,56
$\Delta\sigma_E$ [MPa]	49,39	47,92
$\Delta\sigma_{E,2}=\lambda \cdot \Delta\sigma_E$	74,00	71,80
$\Delta\sigma_C$ [MPa]	80	80
$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}$	zadovoljeno	zadovoljeno
Koeficijent iskorišćenosti	0,93	0,89

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je procedura za verifikaciju kriterijuma zamor graničnih stanja na primeru noseće konstrukcije čeličnog dimnjaka, u skladu sa EN 1993-1-9 [1]. Dobijeni rezultati prikazuju da su svi analizirani konstrukcioni detalji zadovoljili propisane kriterijume nosivosti na zamor, čime je obezbeđen odgovarajući nivo pouzdanosti (u skladu sa EN 1990 [7]) koji je najmanje jednak pouzdanosti potrebnoj za verifikaciju graničnog stanja nosivosti, za koncept bezbednog životnog ciklusa (veka trajanja) ili koncept tolerantnosti na oštećenja.

Na primeru noseće konstrukcije čeličnog dimnjaka, rezultati sprovedene analize potvrđuju značaj provere graničnog stanja nosivosti na zamor pri projektovanju. Kod ovakvog tipa konstrukcija koje su izložene dugotrajnom cikličnom opterećenju, kriterijum zamora može biti merodavan pri usvajanju konačnog konstruktivnog rešenja. Verifikacijom graničnog stanja nosivosti na zamor obezbeđuje se zahtevan nivo pouzdanosti, uz istovremeno ispunjenje zahteva u pogledu trajnosti konstrukcije tokom njenog projektovanog eksploatacionog veka.

REFERENCE

- [1] EN 1993-1-9:2005, Proračun čeličnih konstrukcija; Deo 1-9: Zamor
- [2] Dunja Gavrilović-Specifičnosti projektovanja čeličnih ljuski prema EN 1993 sa primerom primene na konstrukciji dimnjaka (master rad)
- [3] EN 1991-1-4:2005, Dejstva na konstrukcije; Deo 1-4: Dejstva vetra
- [4] EN 1993-3-2:2006, Proračun čeličnih konstrukcija; Deo 3-2: Tornjevi, jarboli i dimnjaci-Dimnjaci
- [5] Alain Nussbaumer, Luis Borges, Laurence Davaine-Fatigue design of steel and composite structures
- [6] Dr-Ing Christian Petersen-Stahlbau-Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten (3. überarbeitete und erweiterte Auflage)
- [7] EN 1990:2002, Osnove projektovanja konstrukcija