



M. Živković, V. Milovanović, D. Rakić, S. Vulović

NUMERIČKA ANALIZA ZAVARENIH SPOJEVA VAGONSKIH KONSTRUKCIJA NUMERICAL ANALYSIS WELDED JOINTS OF WAGON CONSTRUCTIONS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 621.791.05: 656.223.1]:519.6

Rad primljen / Paper received:

4. jun 2011.

Ključne reči: MKE; zavareni spojevi; analiza zamora; vagonске konstrukcije.

Izvod

U radu su date smernice za numeričku analizu zamora zavarenih spojeva vagonских konstrukcija. Rad sadrži pregled najčešće korišćenih evropskih standarda iz oblasti analize zamora zavarenih spojeva. Teorijska razmatranja izneta u radu su dokumentovana na konkretnim slučajevima rešavanja problema analize zamora zavarenih spojeva vagonске konstrukcije. Prikazani su primeri analize zamora konkretnog vagona, pre i posle rekonstrukcije.

Analiza je sprovedena sa ciljem da se otkriju vrste opterećenja usled kojih dolazi do pojave prslina u zavarenim spojevima, kako bi se predložila metodologija za njihovu sanaciju.

Adresa autora / Author's address:

M. Živković, V. Milovanović, D. Rakić, Mašinski Fakultet, Kragujevac, Srbija.

S. Vulović, Fakultet Informatičkih Tehnologija, Beograd, Srbija.

Keywords: FEM; welded joints; fatigue analysis; wagon constructions.

Abstract

The paper provides guidelines for the numerical fatigue analysis for welded joints in wagon construction. The paper includes a review of the most frequently used European standards in the field of the welded joint fatigue analysis. Theoretical considerations presented in the paper were documented on specific cases of solving the problem of fatigue analysis of welded joints in wagon constructions. The examples show the fatigue analysis of a specific wagon, before and after reconstruction.

The analysis was performed in order to determine the types of loads due to which cracks in welded joints occur and to propose the methodology for their repair.

UVOD

Zavareni spojevi predstavljaju najčešće konstrukcijsko rešenje za spajanje komponenata i sklopova pri izradi vagonских konstrukcija. Osnovni zahtev koji mora da zadovolji svaka zavarena konstrukcija jeste sigurnost i pouzdanost u uslovima eksploatacije. Pojava postepenog razaranja materijala pod dejstvom periodično promenljivog opterećenja naziva se zamor i predstavlja jedan od ključnih problema na koji svaki inženjer-konstruktor mora da obrati pažnju u toku razvojnog procesa konstrukcije. Postoji mnogo eksperimentalnih metoda za ispitivanje zamora, ali su one veoma skupe, oduzimaju puno vremena i ne daju dovoljno potrebnih informacija.

Metod konačnih elemenata – MKE [1] predstavlja najopštiji numerički metod, koji je danas postao nezaobilazan u rešavanju naučnih i praktičnih zadataka u gotovo svim oblastima nauke i tehnike. MKE predstavlja moćan alat za numeričku analizu zavarenih spojeva vagonских konstrukcija, štedi vreme i troškove, koji su veoma bitni u procesu serijske proizvodnje vagonских konstrukcija..

NAJČEŠĆE KORIŠĆENI EVROPSKI STANDARDI

Najčešće korišćeni standardi pri proračunu vagonских konstrukcija su: TSI standard [2], British Standard (prEN 12663-2:2007) [3] i Eurocode 3: Part 1.9 [4].

TSI standard definiše slučajeve opterećenja prilikom ispitivanja teretnih vagona. Odeljak 4.2.2.3.1 ovog standarda definiše sve tipove opterećenja koje vagonска konstrukcija mora da izdrži, a u skladu su sa zahtevima iz odeljka 3, British Standard-a prEN 12663. Definisano ovim standardima vagonска konstrukcija mora da zadovolji sve vrste statičkih opterećenja: horizontalno opterećenje, vertikalno opterećenje, kombinacije najnepovoljnijih slučajeva horizontalnih i vertikalnih opterećenja i različite slučajeve podizanja na kraju vagona, kao i podizanje celog vagona na mestima predviđenim za podizanje.

Pri proračunu dinamičke čvrstoće teretnih vagona usled vertikalnog opterećenja, u skladu sa TSI standardom - Aneks CC i British Standardom - prEN 12663, dinamičko opterećenje se uzima u opsegu $\pm 30\%$ vertikalnog statičkog opterećenja.

Pri analizi zamora zavarenih spojeva vagona najčešće korišćeni standard je Eurocode 3 - Part 1.9, na osnovu koga se ekvivalentni napon u zavarenom spoju računa kao:

$$\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2} \quad \text{i} \quad \tau_{wf} = \tau_{\square f} \quad (1)$$

gde su:

$\sigma_{\perp f}$ - normalna komponenta napona



$\tau_{\perp f}$ - tangencijalna komponenta napona

$\tau_{\parallel f}$ - tangencijalna komponenta napona (paralelna sa zavarenim spojem)

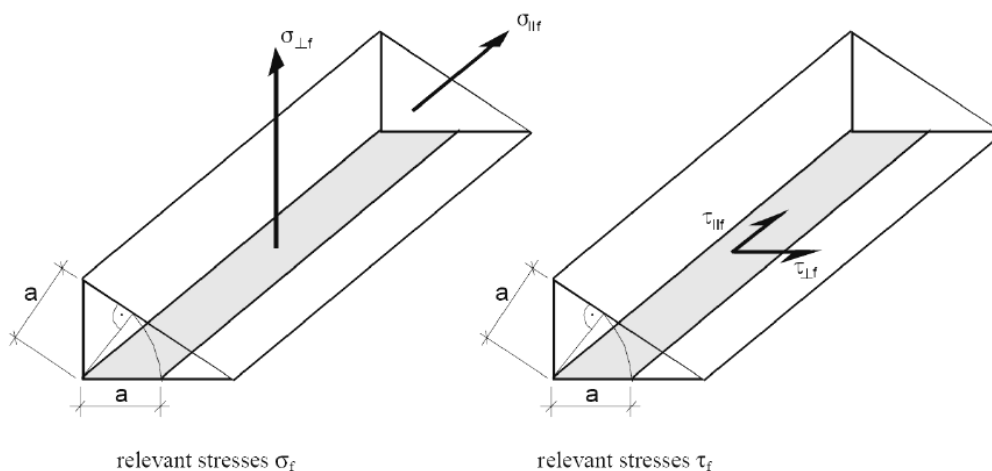
Na slici 1 su prikazani pravci napona u zavarenom spoju u skladu sa Eurocode-om 3 i izrazom (1).

Dugogodišnjim ispitivanjem zamora došlo se do zaključka da ovaj proces obuhvata dva područja cikličnog naprezanja koja su različitog karaktera. U svakom od ovih područja, do otkaza dolazi pod očigledno različitim mehanizmima.

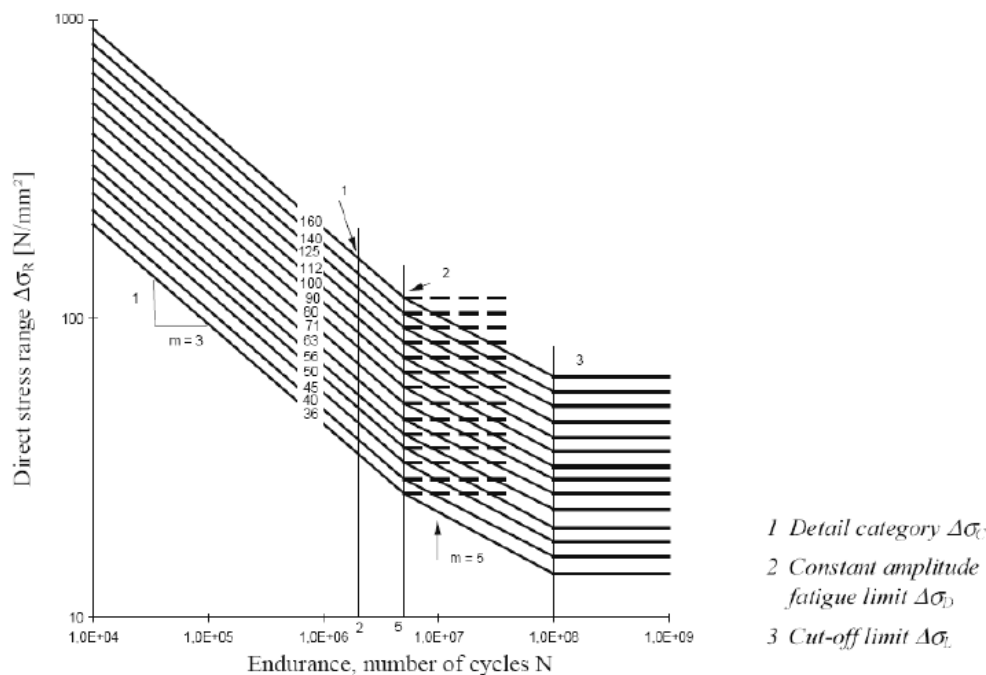
U prvom slučaju se javljaju plastične deformacije, dok su u drugom naponi i deformacije u oblasti elastičnosti.

Prvi slučaj obuhvata manji broj ciklusa (do 104), veće opterećenje i naziva se niskociklični zamor. Drugo slučaj obuhvata veliki broj ciklusa (preko 104) a manja opterećenja i naziva se visokociklični zamor.

Nemački inženjer August Wöhler je 1852. godine postavio i sistematski sproveo istraživanja zamora materijala. Ispitivanja su se zasnivala na cikličnom opterećenju osovina železničkih vagona na savijanje, torziju i naizmenični pritisak i zatezanje epruveta različitih materijala. Rezultate je sistematizovao i prikazivao dijagramski (slika 2). Krive prikazane na slici 2 predstavljaju odnos amplitude napona i broja ciklusa do otkaza i nazivaju se Wöhler- ove krive ili S-N krive.



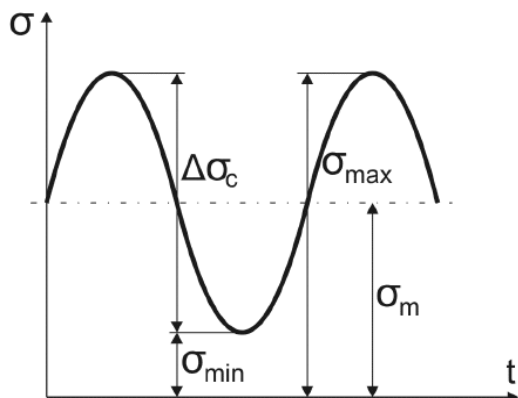
Slika 1: Naponi u zavarenom spoju u skladu sa Eurocode 3
 Figure 1: The stresses in welded joint acc. to Eurocode 3



Slika 2: Wöhler-ove krive (S-N krive)
 Figure 2: Wöhler s curves (S-N curves)



Na slici 3 je prikazan naizmenično promenljiv napon u sinusoidnom obliku i predstavlja idealizovan oblik opterećenja.



Slika 3: Naizmenično promenljiv napon

Figure 3: Alternative variable stress

Kao što je prethodno rečeno, dinamičko opterećenje se uzima u opsegu ± 30% vertikalnog statičkog opterećenja. Na osnovu ovoga možemo izračunati vrednosti maksimalnog i minimalnog napona pri dinamičkom opterećenju, na osnovu statičke analize.

$$\sigma_{\max} = (1+0.3) \sigma_m = 1.3 \sigma_m \Rightarrow \sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{1.3} \quad (2)$$

$$\sigma_{\min} = (1-0.3) \sigma_m = 0.7 \sigma_m \Rightarrow \sigma_m = \frac{\sigma_{\min}}{0.7} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_c = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (4)$$

Na osnovu jednačina (2) i (3) možemo odrediti odnos maksimalnog i minimalnog napona pri dinamičkom opterećenju.

$$\frac{\sigma_{\max}}{1.3} = \frac{\sigma_{\min}}{0.7} \Rightarrow \sigma_{\min} = \frac{0.7}{1.3} \sigma_{\max} \quad (5)$$

Zamenom jednačine (5) u jednačinu (4) dobijamo:

$$\Delta\sigma_c = \sigma_{\max} - \frac{0.7}{1.3} \sigma_{\max} = \frac{0.6}{1.3} \sigma_{\max} \quad (6)$$

odnosno, vrednost maksimalnog napona, usled dinamičkog opterećenja:

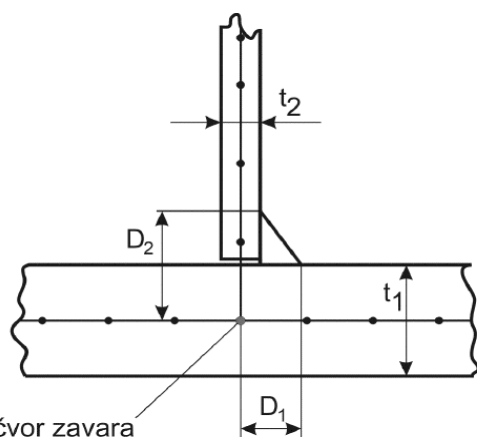
$$\sigma_{\max} = 2.1667 \Delta\sigma_c \quad (7)$$

U tabeli 1 prikazane su vrednosti dozvoljenih napona statičkog testa za proveru zamora zavarenih spojeva za čelik S355J2+N u skladu sa Eurocode 3 Part 1.9.

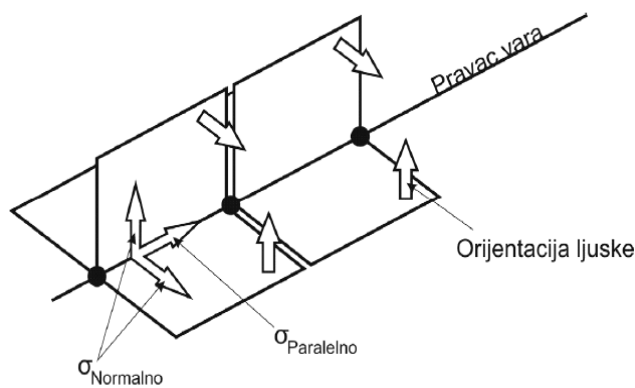
Tabela 1: Granične vrednosti napona u analizi zamora za čelik S355J2+N

Table 1: Stresses limit values in fatigue anlysis for steel S355J2+N

Amplitudni napon $\Delta\sigma_c$ [N/mm ²]	Maksimalna vrednost dozvoljenog napona $\Delta\sigma_{doz}$ [N/mm ²]	Granični napon za trajnu dinamičku čvrstoću [N/mm ²]	
		Nadgradnja ($\gamma_{Mf} = 1,15$)	Postolje ($\gamma_{Mf} = 1,35$)
160	347	301	257
100	217	188	160
90	195	170	144
80	173	151	128
71	154	134	114
63	136	119	101
56	121	106	90
50	108	94	80



Slika 4: Veličina zona zavarenog spoja pri proračunu MKE
Figure 4: Heat affected zone value acc. To FEM calculation



Slika 5: Pravilna orijentacija ljuske u zoni zavara
Figure 5: Correct shell orintation in weld zone



Prema slici 4:

$$D_1 = f_{ele} (0.5 t_{neighbor} + t_{min}) = 1 \cdot (0.5 t_2 + t_2) \quad (8)$$

$$D_2 = f_{ele} (0.5 t_{neighbor} + t_{min}) = 1 \cdot (0.5 t_1 + t_2) \quad (9)$$

Na slici 5. prikazan je pravilan način modeliranja zavarenog spoja metodom konačnih elemenata.

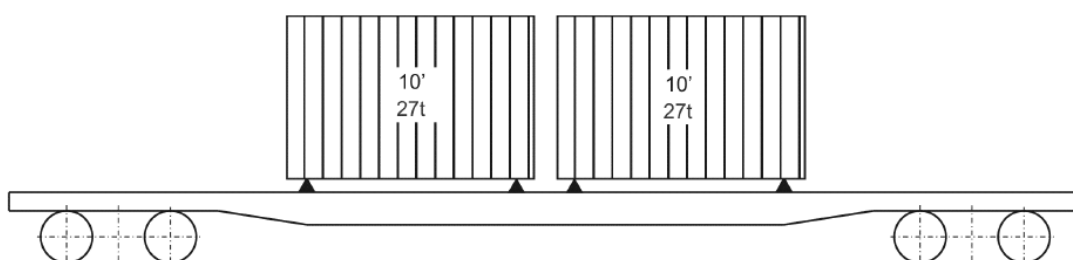
PRIMER ANALIZE ZAMORA VAGONA

Zadatak analize je bio da se identifikuju uzroci nastanka prslina na srednjem podužnom nosaču vagona za prevoz kontejnera. Na osnovu sprovedene analize trebalo je predložiti konstruktivna rešenja za rešavanje uočenih problema i dokazati da predloženo

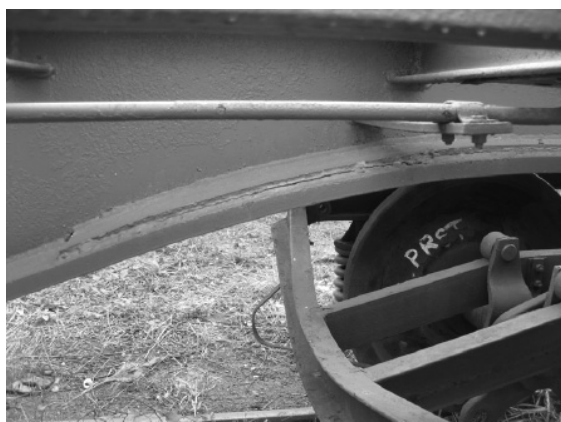
konstrukcijsko rešenje zadovoljava kriterijume statičke i dinamičke čvrstoće vagona.

Numeričkim proračunom [5] utvrđeni su najnepovoljniji slučajevi statičkog i dinamičkih opterećenja koji su prouzrokovali pojavu prslina u zavarenim spojevima na srednjem podužnom nosaču vagona namenjenom prevozu kontejnera. Na slici 6 je data šema opterećenja vagona za najnepovoljniji slučaj vertikalnog opterećenja.

Prema prethodno navedenim standardima, proračun dinamičke čvrstoće teretnih vagona usled vertikalnog opterećenja se vrši za slučaj kada je vagon izložen vertikalnom statičkom opterećenju uvećanom 1.3 puta (30%), kako bi se uzelo u obzir dinamičko opterećenje pri transportu.



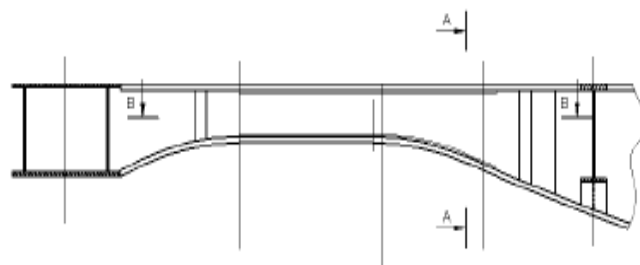
Slika 6: Najnepovoljniji slučaj vertikalnog opterećenja vagona
Figure 6: The most unfavorable case of vertical load of wagon



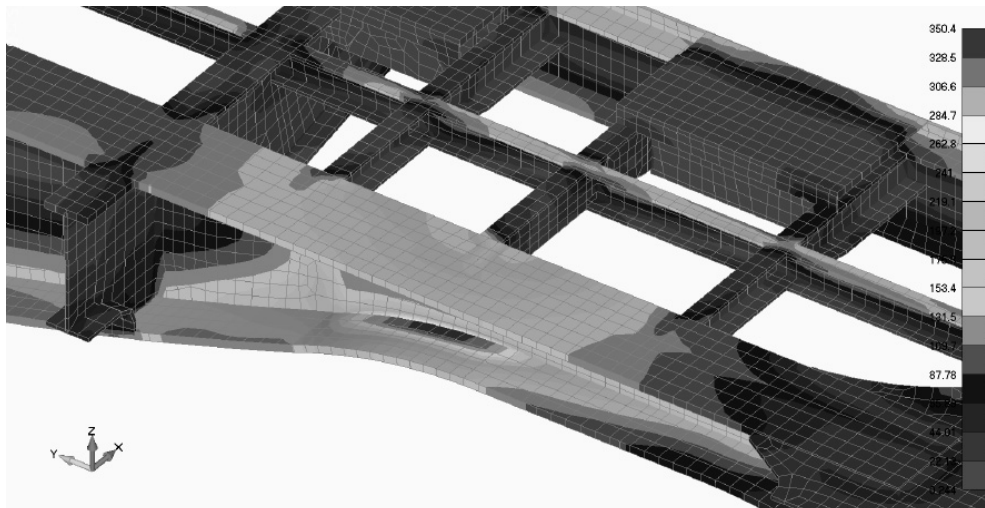
Slika 7: Prslina na srednjem podužnom nosaču vagona
Figure 7: Crack on longitudinal carriage of wagon

Sa slika 8 i 9 se jasno vidi da se mesto maksimalnog napona na modelu nalazi na mestu gde se javljaju prslina na konstrukciji (slika 7). Vrednost maksimalnog napona je 350.4 MPa, što je iznad vrednosti dozvoljenog napona datog u tabeli 1.

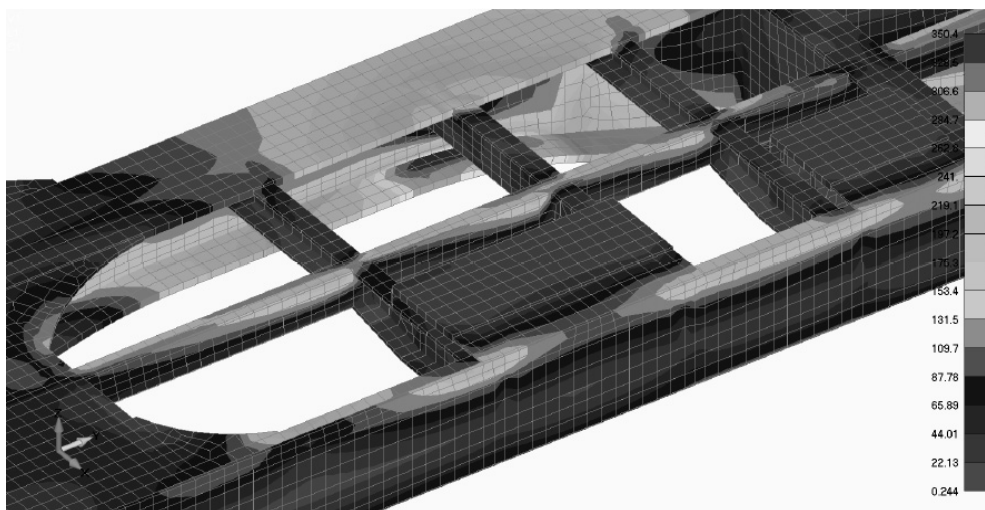
Na osnovu analize napona koji su dobijeni prethodnim proračunima, izvedeni su zaključci o uzrocima nastanka prslina na srednjem podužnom nosaču vagona (slike 8 i 9). Proračuni jasno pokazuju da je uzrok nastanka prslina dinamičko opterećenje vagona pri transportu. Na osnovu predložene rekonstrukcije srednjeg podužnog nosača vagona (slika 10) izvršene su prepravke na geometriji modela [6].



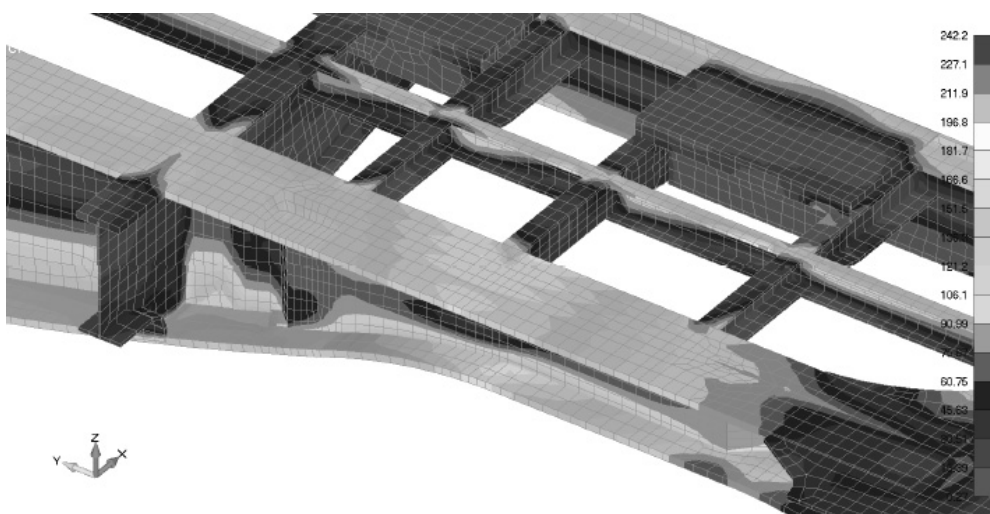
Slika 10: Rekonstrukcija srednjeg podužnog nosača vagona
Figure 10: Reconstruction of middle longitudinal carriage of wagon



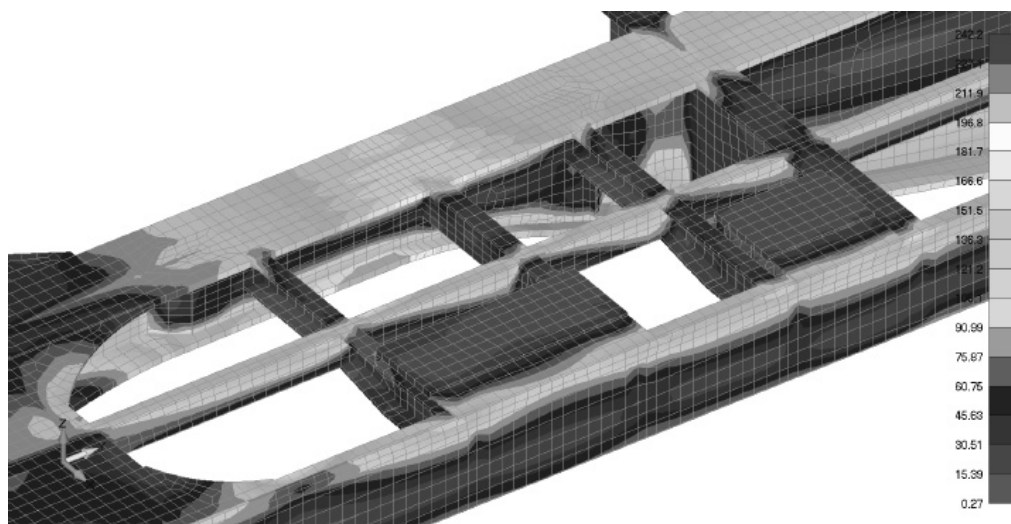
Slika 8: Polje efektivnog napona - pogled sa unutrašnje strane
 Figure 8: Effective stress field- internal view



Slika 9: Polje efektivnog napona - pogled sa spoljašnje strane
 Figure 9: Effective stress field- outside view



Slika 11: Polje efektivnog napona nakon rekonstrukcije strane - pogled sa unutrašnje strane
 Figure 11: Effective stress field-after reconstruction of side - internal view



Slika 12: Polje efektivnog napona nakon rekonstrukcije - pogled sa spoljašnje*

Figure 12: Effective stress field-after reconstruction of side - outside view

Posle izmena geometrije generisana je nova mreža konačnih elemenata i ponovljeni su svi numerički proračuni, kako bi se verifikovalo predloženo rešenje.

U rekonstruisanom modelu mesto maksimalnog napona je na srednjem podužnom nosaču i iznosi 242.2 MPa, nalazi se u osnovnom materijalu (ne u zavarenom spoju) i ova vrednost je manja od vrednosti dozvoljenog napona datog u tabeli 1. Sa slike 12 se vidi da su vrednosti napona duž zavarenog spoja manje od dozvoljenih napona.

ZAKLJUČAK

U radu je dat pregled nekih najčešće korišćenih evropskih standarda za procenu zamora zavarenih spojeva vagonских konstrukcija. Rad sadrži teorijske osnove koje se koriste pri računanju zamora. Date su preporuke pri modeliranju zavarenih spojeva metodom konačnih elemenata.

Konkretnim primerom je ilustrovana primena najčešće korišćenih evropskih standarda pri identifikovanju opterećenja koja izazivaju pojavu zamornih prslina zavarenih spojeva nosećih elemenata vagona.

Na osnovu predložene rekonstrukcije izvršena je korekcija modela i ponovljena je numerička analiza vagona. Numerički proračuni su pokazali da vagonска konstrukcija zadovoljava statičku i dinamičku čvrstoću u skladu sa navedenim standardima.

Rad predstavlja primer numeričke analize zamora zavarenih spojeva vagonских konstrukcija u skladu sa najčešće korišćenim evropskim standardima za proračun teretnih vagona.

LITERATURA

- [1] Kojic M., Slavkovic R., Zivkovic M., Grujovic N., PAK – Finite Element Program for Structural Analysis EXAMPLES, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kragujevac
- [2] TSI Standard - Commission Decision of 28 July 2006 concerning the technical specification of interoperability relating to the subsystem rolling stock — freight wagons of the trans-European conventional rail system (notified under document number C(2006) 3345).
- [3] EN 12663 - Railway applications – Structural requirements of railway vehicle bodies, European Standard.
- [4] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.9: Fatigue.
- [5] Kojic M., Slavkovic R., Zivkovic M., Grujovic N.: PAK - Program for linear and nonlinear static and dynamic analysis of construction and heat conduction, Laboratory for engineering software, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kragujevac
- [6] Femap with NX Nastran
- [7] Mačković L., Jurček R. - Tehnička dokumentacija rekonstrukcije vagona, Bačkainvest 2009.

*Originalne kolor-fotografije polja efektivnog napona (slike 8, 9, 11 i 12) možete preuzeti na Web-prezentaciji DUZS (www.duzs.org.rs) u rubrici Časopis, broj 3/2011.