

ЕЛАСТИЧНА ФЛЕКСИБИЛНОСТ СПОЈЕВА СА ВИСОКОВРЕДНИМ ЗАВРТЊЕВИМА

Ненад Фриц¹
Драган Буђевац²
Зоран Мишковић³

УДК: 621.882

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2016.011

Резиме: Еластична флексибилност, односно крутост спојева са високовредним завртњевима у директној је вези са феноменима који зависе од промене дебљине стезног пакета завртња, пре свега са губицима силе преднапрезања у високовредним завртњевима. Постојећи изрази за флексибилност спојева са високовредним завртњевима једини су начин да се експериментални и нумерички резултати потврде и аналитички. У овом раду приказани су изрази за флексибилност спојева са високовредним завртњевима, преглед истраживања која су заснована на овим изразима као и нумерички пример за спојеве са високовредним завртњевима израђеним према EN 14399-4.

Кључне речи: флексибилност, крутост, високовредни завртњеви, аналитички изрази

1. УВОД

Флексибилност, односно крутост спојева са високовредним завртњевима у директној је вези са феноменима који зависе од промене дужине стезног пакета завртња, пре свега са губицима силе преднапрезања у високовредним завртњевима. Постојећи изрази за флексибилност спојева са високовредним завртњевима једини су начин да се експериментални и нумерички резултати потврде и аналитички, а спектар њихове примене веома је широк.

Немачки стандард [1] дефинише флексибилност спојева са високовредним завртњевима $\delta_{\text{споја}}$ као збир флексибилности завртња δ_z и флексибилности елемената стезног пакета (лимови и подлошке) $\delta_{\text{сп}}$. Овако дефинисана флексибилност потврђена је и коришћења у неколико референтних истраживања, пре свега као средство за одређивање губитака силе преднапрезања у високовредним завртњевима.

¹ Доц. др Ненад Фриц, дипл.инж.грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 011 3218 532, е – mail: fric@imk.grf.bg.ac.rs

² Проф. др Драган Буђевац, дипл.инж.грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 011 3218 533, е – mail: budjoni@imk.grf.bg.ac.rs

³ В. проф. др Зоран Мишковић, дипл.инж.грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 011 3218 620, е – mail: mzoran@imk.grf.bg.ac.rs

У свом истраживању Вељковић М. са групом аутора [2] бави се анализом различитих монтажних наставака ветрогенератора: наставци са прирубницама и наставци у виду смичућег споја, при чему се посебна пажња посвећује губицима силе преднапрезања у високовредним завртњевима који формирају тарни спој. Како би се одредила промена силе преднапрезања у високовредним завртњевима услед промене нивоа напрезања у зидовима стуба ветрогенератора (што доводи до промене дебљине елемената у споју услед Поасоновог ефекта) Вељковић користи следећи израз:

$$\Delta F_{p,C} = \beta \cdot \frac{\nu \cdot \sum (\Delta \sigma_{x,i} \cdot s_i)}{\delta_{\text{spoja}} \cdot E_{\text{plasta}}} \quad (1)$$

где су:

- β - емпиријски одређен корекциони фактор који узима вредност $\beta=1,25$
- ν - Поасонов коефицијент усвојен као $\nu=0,30$
- $\Delta \sigma_{x,i}$ - максимална промена напона у нето попречном пресеку плоче i
- s_i - дебљина плоче i
- δ_{spoja} - еластична флексибилност споја са високовредним завртњевима
- E_{plasta} - модул еластичности материјала плашта стуба ветрогенератора

Саставни део дисертације [3] је и опсежно експериментално истраживање губитака силе преднапрезања у високовредним завртњевима. Промена силе преднапрезања у високовредним завртњевима праћена је две године у континуитету, а добијени резултати послужили су, између осталог, и за одређивање реолошких својстава примењеног цинк-силикатног премаза као антикорозивне заштите спојева. Прираштај дилатације премаза у произвољном временском тренутку одређен је применом израза:

$$\Delta l_{pr}(t) = \delta_{\text{spoja,A}} \cdot \Delta F_{p,C,pr}(t) \quad (2)$$

$$\Delta \varepsilon_{pr}(t) = \frac{\Delta l_{pr}(t)}{l_{pr}} \quad (3)$$

где су:

- $\Delta l_{pr}(t)$ - промена укупне дебљине премаза у споју, у тренутку t
- $\Delta F_{p,C,pr}(t)$ - смањење силе преднапрезања у завртњу услед пузања (смањења дебљине) примењеног цинк-силикатног премаза у тренутку t
- $\delta_{\text{spoja,A}}$ - аналитички одређена флексибилност споја
- l_{pr} - укупна дебљина нанетог премаза у споју
- $\Delta \varepsilon_{pr}(t)$ - укупна дилатација премаза у споју, у тренутку t

Због реферисаних и њима сличних истраживања, која делом или у потпуности базирају на аналитичком одређивању флексибилности спојева са високовредним завртњевима, овој теми је посвећена посебна пажња. У наставку ће бити приказани аналитички изрази за одређивање флексибилности спојева са високовредним завртњевима, као и нумерички пример који за циљ имају да предметну проблематику сублимирају на једном месту, указујући на референтне стандарде и правилнике, што ће њихову примену значајно олакшати.

2. АНАЛИТИЧКИ ИЗРАЗИ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНОСТИ СПОЈЕВА СА ВИСОКОВРЕДНИМ ЗАВРТЊЕВИМА

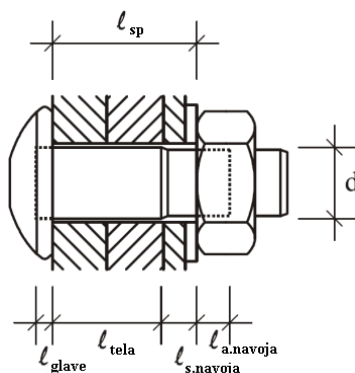
Немачки стандард VDI 2330 [1], као и Kammel i Sedlaček у свом истраживању [4] дефинишу изразе за еластичну крутост, односно флексибилност, споја са високовредним завртњевима. Флексибилност споја δ_{spoja} одређује се као збир флексибилности преднапрегнутог завртња δ_z и флексибилности елемената стезног пакета δ_{sp} :

$$\delta_{\text{spoja}} = \delta_z + \delta_{\text{sp}} \quad (4)$$

Еластична флексибилност завртња дефинише се као збир еластичних флексибилности еквивалентних цилиндричних делова завртња:

$$\delta_z = \delta_{\text{glave}} + \delta_{\text{tela}} + \delta_{\text{s.navoja}} + \delta_{\text{a.navoja}} + \delta_{\text{navrtke}} \quad (5)$$

Сваки еквивалентни цилиндрични део завртња одређен је својом дужином l_i и површином попречног пресека A_i (слика 1).



Слика 1. Еквивалентни цилиндрични делови завртња

Компоненте израза за еластичну флексибилност завртња дефинишу се на следећи начин:

1. Еластича флексибилност главе завртња δ_{glave} :

$$\delta_{\text{glave}} = \frac{l_{\text{glave}}}{E_z \cdot A_{\text{nom}}} \quad (6)$$

$$l_{\text{glave}} = 0,5 \cdot d \quad (7)$$

$$A_{\text{nom}} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad (8)$$

где су:

l_{glave} – дужина еквивалентног цилиндра главе завртња,

E_z – модул еластичности материјала завртња,

A_{nom} – номинална површина попречног пресека тела завртња,

d – пречник тела завртња.

2. Еластича флексибилност тела завртња δ_{tela} :

$$\delta_{\text{tela}} = \frac{l_{\text{tela}}}{E_z \cdot A_{\text{ном}}} \quad (9)$$

где је:

l_{tela} – дужина тела завртња без навоја.

3. Еластична флексибилност слободног дела навоја $\delta_{\text{s.navoja}}$:

$$\delta_{\text{s.navoja}} = \frac{l_{\text{s.navoja}}}{E_z \cdot A_{\text{д3}}} \quad (10)$$

$$A_{\text{д3}} = \frac{d_3^2 \cdot \pi}{4} \quad (11)$$

$$d_3 = d - \frac{17}{12} \cdot t \quad (12)$$

$$t = \frac{p}{2 \cdot \text{tg} 30^\circ} \quad (13)$$

где су:

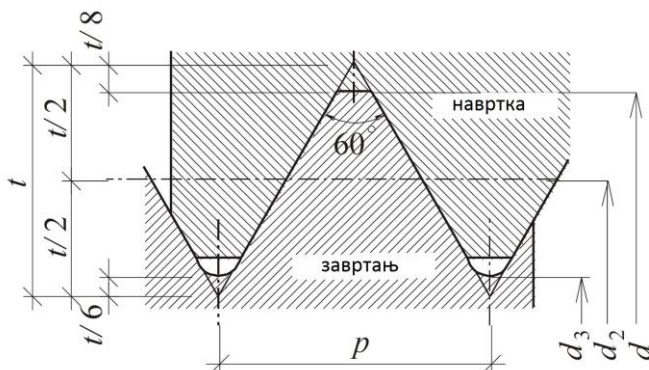
$l_{\text{s.navoja}}$ – дужина слободног дела навоја,

$A_{\text{д3}}$ – површина пресека на месту минималног пречника завртња,

d_3 – пречник језгра навоја завртња (слика 2),

p – корак навоја који зависи од пречника завртња [5] (слика 2),

t – висина навоја која зависи од корака навоја [5] (слика 2).



Слика 2. Основне димензије метричког навоја [6]

4. Еластична флексибилност ангажованог дела навоја $\delta_{\text{a.navoja}}$:

$$\delta_{\text{a.navoja}} = \frac{l_{\text{a.navoja}}}{E_z \cdot A_{\text{д3}}} \quad (14)$$

$$l_{\text{a.navoja}} = 0,5 \cdot d \quad (15)$$

где је:

$l_{\text{a.navoja}}$ – дужина ангажованог дела навоја.

5. Еластична флексибилност навртке завртња $\delta_{navrtke}$:

$$\delta_{navrtke} = \frac{l_{navrtke}}{E_{navrtke} \cdot A_{nom}} \quad (16)$$

$$l_{navrtke} = 0,4 \cdot d \quad (17)$$

где су:

$l_{navrtke}$ – дужина (дебљина) навртке,

$E_{navrtke}$ – модул еластичности материјала од ког је израђена навртка,

Под претпоставком да је спој концентрично напрегнут и да се конус деформације два суседна завртња може формирати без преклапања, односно да је растојање између завртњева D_A веће од максималног пречника конуса деформације D_K (слика 3), еластична флексибилност стезног пакета δ_{sp} може се одредити као:

$$\delta_{sp} = \frac{2 \cdot \ln \left[\frac{(d_{podloške} + d_0) \cdot (d_{podloške} + l_{sp} \cdot \tan \varphi - d_0)}{(d_{podloške} - d_0) \cdot (d_{podloške} + l_{sp} \cdot \tan \varphi + d_0)} \right]}{E_{sp} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \tan \varphi} \quad (18)$$

где су:

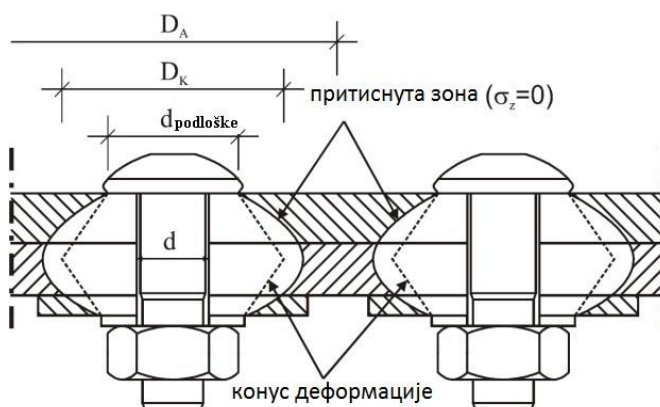
$d_{podloške}$ – спољашњи пречник подлошке,

d_0 – пречник рупе за спојно средство,

l_{sp} – дебљина стезног пакета,

φ – угао конуса деформације,

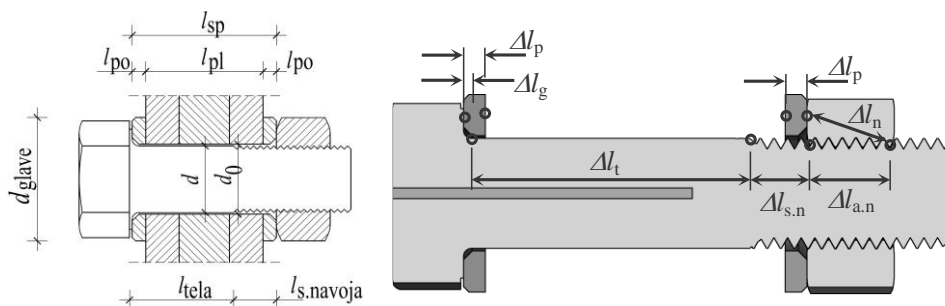
E_{sp} – модул еластичности материјала од ког су израђени елементи који сачињавају стезни пакет (подлошке и челичне плоче).



Слика 3. Конус деформације споја са преднапрегнутим завртњевима

3. НУМЕРИЧКИ ПРИМЕР

За нумерички пример одређивања флексибилности споја са високовредним завртњевима послужиће спојеви коришћени у експерименталном истраживању приказаном у дисертацији [3]. У питању су спојеви са двоструким преклопом, формирани од три челичне плоче међусобно повезане са по три завртња. Завртњеви су класе чврстоће 10.9 у свему према стандарду [7], произвођача „Reiner“ [8]. За потребе израде нумеричког примера дефинисане су дужине делова завртња као и делова споја и приказане на слици 4.



Слика 4. Дужине делова завртња

Све рупе за завртњеве изведене су са зазором од 2 mm, па је $d_0=22$ mm. Модул еластичности материјала завртња и навртке усвојен је као $E_z=E_{navrtke}=210000$ N/mm². Завртњеви су са метричким навојем чије су димензије дефинисане стандардом [5]. Извод из стандарда, који се односи на корак метричког навоја, дат је у Табели 1.

Табела 1. Корак метричког навоја завртња

Називни пречник завртња d [mm]	Корак навоја p [mm]	
	Нормални	Фини
10	1,50	1,25 или 1,00 или 0,75
12	1,75	1,50 или 1,25
16	2,00	1,50
20	2,50	2,00 или 1,50
22	2,50	2,00 или 1,50
24	3,00	2,00
27	3,00	2,00
30	3,50	2,00

За завртњ M20 корак навоја износи $p=2,5$ mm, висина навоја $t=2,165$ mm из чега следи пречник језгра завртња $d_3=16,9$ mm². На основу наведених улазних параметара, може се одредити флексибилност завртња за сваку од три дужине (Табеле 2 до 4).

Табела 2. Флексибилност делова и укупна флексибилност завртња М20х50

Део завртња М20х50	l_i [mm]	d_i [mm]	A_i [mm]	δ_i [mm/N·10 ⁻⁷]
Глава	10	20	314	1,52
Тело	13	20	314	1,97
Слободни навој	13,5	16,9	225	2,86
Ангажовани навој	10	16,9	225	2,12
Навртка	8	20	314	1,21
Укупна флексибилност завртња				9,68

Табела 3. Флексибилност делова и укупна флексибилност завртња М20х70

Део завртња М20х70	l_i [mm]	d_i [mm]	A_i [mm]	δ_i [mm/N·10 ⁻⁷]
Глава	10	20	314	1,52
Тело	31	20	314	4,70
Слободни навој	10,5	16,9	225	2,22
Ангажовани навој	10	16,9	225	2,12
Навртка	8	20	314	1,21
Укупна флексибилност завртња				11,77

Табела 4. Флексибилност делова и укупна флексибилност завртња М20х90

Део завртња М20х70	l_i [mm]	d_i [mm]	A_i [mm]	δ_i [mm/N·10 ⁻⁷]
Глава	10	20	314	1,52
Тело	51	20	314	7,73
Слободни навој	10,6	16,9	225	2,24
Ангажовани навој	10	16,9	225	2,12
Навртка	8	20	314	1,21
Укупна флексибилност завртња				14,82

Елементе стезног пакета чине две подлошке и три челична лима који формирају спој са двоструким преклопом. Све подлошке су високовредне, у свему према [9]. Спољашњи пречник подлошке је $d_{\text{подлошке}}=37$ mm, а дебљина $l_{\text{po}}=4$ mm. У питању су три споја различите дебљине, па се завртњеви дужине 50 mm уграђују у спој укупне дебљине $l_{\text{sp}}=26$ mm (две подлошке дебљине $l_{\text{po}}=4$ mm и челичне плоче укупне дебљине $l_{\text{pl}}=18$ mm), завртњеви дужине 70 mm у спој дебљине $l_{\text{sp}}=43$ mm, а завртњеви дужине 90 mm у спој дебљине $l_{\text{sp}}=63$ mm. Угао $\varphi=35^\circ$, док је модул еластичности елемената стежног пакета усвојен као $E_{\text{sp}}=210000$ N/mm². У табели 5 приказане су коначне вредности флексибилности завртњева, елемената стезног пакета и спојева у целини.

Табела 5. Флексибилност завртњева, стезног пакета и целог споја

Флексибилност делова и споја у целини	Завртањ и навртка према EN 14399-4 подлошке према EN 14399-6		
	M20x50	M20x70	M20x90
δ_z [mm/N \cdot 10 ⁻⁶]	0,97	1,18	1,48
δ_{sp} [mm/N \cdot 10 ⁻⁶]	1,81	1,90	1,98
δ_{spoja} [mm/N \cdot 10 ⁻⁶]	2,78	3,08	3,46

4. ЗАКЉУЧАК

Наведене изразе за еластичну флексибилност спојева са високовредним завртњевима потврдио је Павловић М. са групом аутора [10] применом методе коначних елемената. Наиме, добијено је значајно поклапање нумеричких резултата са резултатима аналитичког прорачуна и експеримента у зони напрезања до 50% од граничне носивости споја. У случају већих напрезања, резултати експеримента и методе коначних елемената показали су нелинеарност која је последица појаве смичућих сила у завртњевима. Павловић закључује да се приказани аналитички изрази могу користити веома успешно за случајеве напрезања до 50% од граничне носивости. Ови изрази могу имати широку примену у области замора споја јер еквивалентна оптерећења која доводе до оштећења услед замора ретко када прелазе 50% од граничне носивости споја. Применом методе коначних елемената и резултата експерименталних истраживања приказани изрази су модификовани у дисертацији [3], а потпуно нови дефинисани су за завртњеве са закључавањем [11] који имају навој целом дужином свог тела, чиме је проширен опсег њихове примене.

ЗАХВАЛНИЦА

Аутори овог рада дугују посебну захвалност компанијама које су помогле реализацију овог истраживања: „Alcoa Fastening Systems“ (Telford, England), „Амига“ (Краљево, Србија), „Армонт СП“ (Београд, Србија), „Бата-Мат“ (Београд, Србија), „Еурис“ (Београд, Србија), „ИНМ“ (Ариље, Србија), „Johannes Steiner GmbH & Co.“ (Weningen, Germany), „Jotun“ (Norway), „Лим инжењеринг“ (Београд, Србија), „Машинопројект Копринг“ (Београд, Србија), „Modipack“ (Пожега, Србија), „Мостоградња“ (Београд, Србија), „НБ Челик“ (Батајница, Србија), „PERI oplate“ (Шимановци, Србија) „RT Trans“ (Београд, Србија) и „Xella Serbia“ (Вреоци, Србија). Ово истраживање је саставни део пројекта TP36048 финансираног од стране Владе Републике Србије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] VDI 2230, Part 1: Systematic calculation of high duty bolted joints – Joints with one cylindrical bolt, VDI-Richtlinien, Beuth Verlag, Berlin, Germany, 2003.

- [2] Veljkovic, M., Heistermann, C., Husson, W., Limam, M., Feldmann, M., Naumes, J., Pak, D., Faber, T., Klose, M., Fruhner, K-U., Krutshinna, L., Baniotopoulos, C., Lavasas, I., Pontes, A., Ribeiro, E., Hadden, M., Sousa, R., Rebelo, L. da Silva, C., Simoes, R., Henriques, J., Matos, R., Nuutinen, J., Kinnunen, H.: *High-strength tower in steel for wind turbines (HISTWIN)*, Final Report, **2012**.
- [3] Фриц, Н.: *Теоријско и експериментално истраживање губитака силе преднапрезања у високовредним завртњевима*. Докторска дисертација, Грађевински факултет Универзитета у Београду, **2015**.
- [4] Kammel, C., Sedlacek, G.: *Dauerverhalten von GV-Verbindungen bei verzinkten Konstruktionen im Freileitungs-, Mast- und Kaminbau*, Forschungsbericht P 409, Düsseldorf, **2001**.
- [5] ISO 68-1:1998, *ISO general purpose screw threads – Basic profile – Part 1: Metric screw threads*, International Organization for Standardization, **1998**.
- [6] Буђевац, Д., Марковић, З., Богавац, Д., Тошић, Д.: *Металне конструкције*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, **1999**.
- [7] EN 14399-4:2005: *High-strength structural bolting assemblies for preloading - Part 4: System HV - Hexagon bolt and nut assemblies*, CEN (European Committee for Standardization), **2005**.
- [8] http://www.peiner-ut.com/fileadmin/user_upload/PDFs/PUT-Steel_construction-e.pdf, преузето 13.03.2016.
- [9] EN 14399-6:2005, *High-strength structural bolting assemblies for preloading - Part 6: Plain chamfered washers*, CEN (European Committee for Standardization), **2005**.
- [10] Pavlović, M., Heistermann, C., Veljković, M., Pak, D., Feldmann, M., Rebelo, C., L. Da Silva: Connections in towers for wind converters, part I: Evaluation of down-scaled experiments. *Journal of Constructional Steel Research*, **2015**., 115, pp. 445-457.
- [11] http://www.alcoa.com/fastening_systems/commercial/catalog/pdf/huck/en/AF1032%20BOBTAIL.pdf, преузето 06.10.2014.

ELASTIC RESILIENCE OF HIGH STRENGTH BOLT CONNECTIONS

Summary: *Elastic resilience (stiffness) of the joints with high strength bolts is directly related to the phenomena that depends on the change in thickness of the clamping package, primarily with losses of pretension forces in high strength bolts. The current expressions of the flexibility of joint with high strength bolts are the only way for experimental and numerical results to be analytically confirmed. In this paper, the expressions of the flexibility of the joints with high strength bolts, review of studies that are based on these terms and numerical example for joints with high value bolts made according to EN 14399-4, are shown.*

Keywords: *elastic resilience, stiffness, high strength bolts, analytical expressions*