

**ДГКМ**  
ДРУШТВО НА  
ГРАДЕЖНИТЕ  
КОНСТРУКТОРИ НА  
МАКЕДОНИЈА

Партизански одреди 24,  
П.Фах 560, 1001 Скопје  
Македонија

**MASE**  
MACEDONIAN  
ASSOCIATION OF  
STRUCTURAL  
ENGINEERS

Partizanski odredi 24,  
P. Box 560, 1001 Skopje  
Macedonia

**ЧК-6**

mase@gf.ukim.edu.mk  
<http://www.mase.org.mk>

А. ФИЛИПОВСКИ<sup>1</sup>, Ф. ПЛАНА<sup>2</sup>, Р. ХАДРИ<sup>3</sup>, Д. ПОПОВСКИ<sup>4</sup>,  
Ш. ЗЕЈНЕЛИ<sup>5</sup>, М. ПАРТИКОВ<sup>6</sup>

## ПРОЕКТИРАЊЕ НА ЗАВАРЕНИ ГРЕДНИ НОСАЧИ ИЗВЕДЕНИ ОД АЛУМИНИУМСКИ ЛИМОВИ СПОРЕД ЕВРОКОД 9

### РЕЗИМЕ

Кај заварените алуминиумски греди при пресметувањето мора да се земат во предвид и влијанијата во така наречената HAZ зона. Најекономичните решенија се со поголема висина, меѓутоа при класификацијата на пресекот тенкото вертикално ребро скоро секогаш припаѓаат на најнеповолната класа (4) која бара редуција на пресекот. Ова не наведува на потребата да формираме некое правило за изборот на пресекот на ваквите носачи кое ќе се разликува од она за челичните. Поради редуцијата на пресекот во појасите подобро е да се избере несиметричен пресек со поголем горен притиснат појас. Во трудот е прикажан начинот на контрола на избраниот пресек конструиран со заварување на алуминиумски плочи според Еврокод 9.

*Клучни зборови: алуминиум, греда, плочи, вкртувања*

A. FILIPOVSKI<sup>1</sup>, F. PLANA<sup>2</sup>, R. HADRI<sup>3</sup>, D. POPOVSKI<sup>4</sup>, Sh. ZEJNELI<sup>5</sup>, M. PARTIKOV<sup>6</sup>

## DESIGN OF WELDED BEAMS OF ALUMINIUM PLATES ACCORDING TO EUROCODE 9

### SUMMARY

Calculations of bearing capacity at HAZ for welded aluminium beams should be obtained. The most economic solutions requires deeper beams, which in other end results with slender web and least favorable class (4). According to above new rules are needed for classification of cross sections which will differ from the rules used for steel structures. Due to reduction of the cross section the better solution is nonsymmetrical cross sections with bigger and thicker upper flanges. This paper represent the calculations of welded beams from aluminium plates according to Eurocode 9.

*Keywords: alluminium, beam, plates, stffeners*

<sup>1</sup> Prof. PhD, Faculty of Civil Engineering, University "Ss. Cyril and Methodius", Skopje, Republic of Macedonia, [filipovski@gf.ukim.edu.mk](mailto:filipovski@gf.ukim.edu.mk)

<sup>2</sup> Assoc. Prof. PhD, Faculty of Civil Engineering and Architecture, University in Pristina, Pristina, Kosovo.

<sup>3</sup> Assist. MSc, Faculty of Civil Engineering and Architecture, University in Pristina, Pristina, Kosovo.

<sup>4</sup> Assist. MSc, Faculty of Civil Engineering, University "Ss. Cyril and Methodius", Skopje, Republic of Macedonia, [popovski@gf.ukim.edu.mk](mailto:popovski@gf.ukim.edu.mk)

<sup>5</sup> Assist. MSc, State University of Tetovo, Tetovo, Republic of Macedonia.

<sup>6</sup> Assist. MSc, Faculty of Civil Engineering, University "Ss. Cyril and Methodius", Skopje, Republic of Macedonia, [partikov@gf.ukim.edu.mk](mailto:partikov@gf.ukim.edu.mk)

## 1. ОПШТО

Плочестите (лимените) носачи претставуваат греди со затегнат и притиснат појас и вертикално ребро. Реброто е обично вито и мора да се зајакне со напречни (трансверзални) вкртувања над потпора и во поле, а по потреба и со надолжни (лонгитудинални) вкртувања. За релативно помалите оптоварувања реброто се спротивставува на смолкнување, но во пост-еластична област може да биде мобилизирано и за дејството на затегање. Лимените носачи може да се конструираат и со наборени вертикални ребра или со затворени трансверзални вкртувања.

Лимените носачи се изложени на комбинација од моменти на свиткување, сили на смолкнување, аксијални сили и локални оптоварувања на појасите.

Правилата за лимените носачи според Еврокод 9, општо, се применуваат како за отворени така и за затворени пресеци.

Моделите за рушење на лимените носачи може да настнат поради следните појави:

- извиткување на реброто од напрегања на притисок,
- извиткување од смолкнување,
- интеракција помеѓу сила на смолкнување и момент на свиткување,
- извиткување на реброто предизвикано од локални оптоварувања на појасите,
- појасот побудува извиткување во реброто и
- бочно торзионо извиткување.

Во пракса најповеќе се сретнуваат првите два случаи кои вообичаено мора први да ги контролираме.

## 1. ОТПОРНОСТ НА ГРЕДАТА НА СВИТКУВАЊЕ ВО РАМНИНА

Проектната вредност на моментот на свиткување  $M_{Ed}$ , во секој напречен пресек, треба да го задоволи условот:  $M_{Ed} \leq M_{o,Rd}$  каде што  $M_{o,Rd}$  се однесува за некоја класа на пресекот. Ако напречниот пресек има класа 1 и 2 тогаш вредноста на  $M_{o,Rd}$  изнесува:

$$M_{o,Rd} = W_{pl} \cdot f_o / \gamma_{M1}$$

за класа 3 
$$M_{o,Rd} = \left[ W_{pl} + \frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} (W_{pl} - W_{el}) \right] W_{pl} \cdot f_o / \gamma_{M1},$$

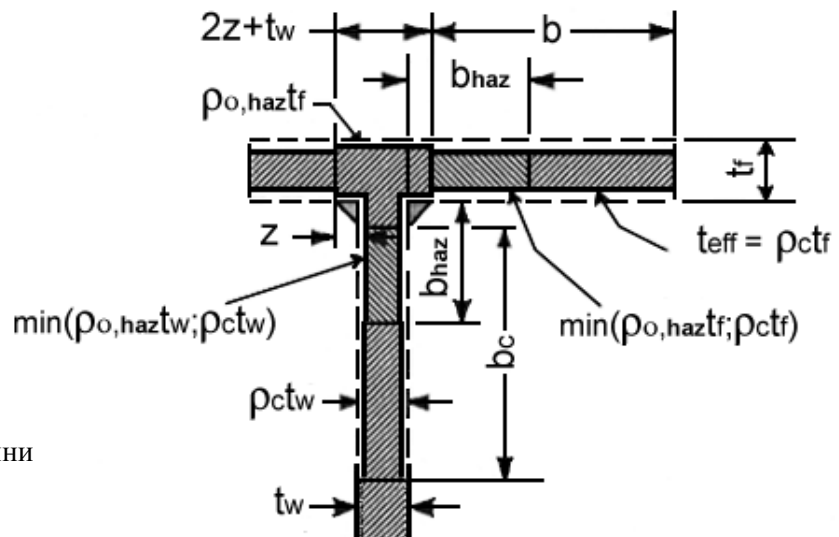
за класа 4 
$$M_{o,Rd} = W_{eff} \cdot f_o / \gamma_{M1}$$

Каде што  $W_{pl}$  и  $W_{el}$  се пластичен и еластичен отпорен момент на бруто пресекот или редуцираниот напречен пресек допуштен за HAZ омекнувањето за надолжни завари при што присуството на отвори се занемарува.

$W_{eff}$  е еластичен отпорен момент на ефективниот напречен пресек добиен со земање на редуцираните дебелини за извиткување како и за HAZ омекнувањето за надолжни завари, ако постојат, при што присуството на отвори се занемарува (Сл.1).

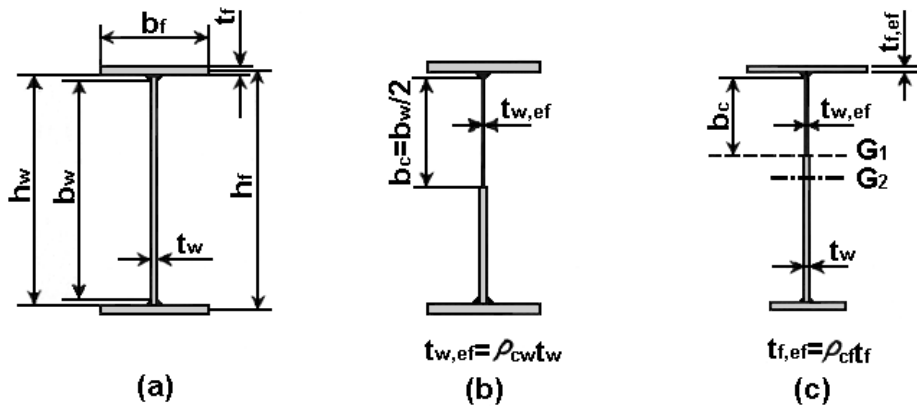
$\beta$  е фактор на витоста за најкритичниот дел на пресекот и

$\beta_2$  и  $\beta_3$  се гранични вредности на факторот  $\beta$  за деловите на пресекот со класи 2 и 3.



Сл.1 Детал за ефективните дебелини на заварен пресек со класа 4

Редукцијата на дебелините се прави во случај на класа 4 во делот на пресекот кој делумно или потполно е притиснат ( $b_c$  во Сл.2).



(a) ознаки на напречниот пресек; (b) ефективен напречен пресек за греда со симетричен напречен пресек класа 1,2 и 3 за појасите и (c) ефективен напречен пресек за греда со намалено затегање (доле) во појасот и класа 4 за напрегање на притисок во горниот појас.

Сл.2 Лимени носачи изложени на свиткување

Односот на напрегњата  $\psi$ , во зависност од ширината  $b_c$ , може да се добие користејќи ефективна зона на притиснатиот појас и комплетниот пресек на реброто (Сл. 2c) во однос на тежиштето. Ако притиснатиот крај на вертикалното ребро е блиску до неутралната оска на гредата тогаш во затегнатиот појас (Сл. 2c) мора да се користи правилото за вити елементи.

Оваа постапка, генерално, бара итеративна пресметка во која  $\psi$  се определува за секој чекор во пресметката за напрегање со ефектот на напречниот пресек дефиниран на крајот од секој чекор.

### 1.1 Отпорност на греди со надолжни (логитудинални) вкртувања на реброто

Извиткувањето на плочата направено од подолжни напрегања на притисок мора да биде земено во пресметувањето со користење на ефективниот напречен пресек применет за класа 4 напречни пресеци. Карактеристиките на ефективниот напречен пресек треба да се засниваат на ефективната површина од притиснатиот дел и нејзината локација внатре во ефективниот напречен пресек. Во првиот чекор на ефективната површина на рамномерниот притисок на суб панелот помеѓу вкртувањата треба да се направи користејќи ефективни дебелини (Сл.3).

Општото извиткување на плочите, вклучува извиткување на вкртувањата, разгледано како флексурално извиткување на столб составено од вкртувањата и половина од соседните делови на реброто. Ако напрегањата се менуваат од притисок до затегање внатре во суб-панелот, една третина од притиснатиот дел се зема како дел на столбот (Сл.3c).

Ефективните дебелини за различни делови на пресекот на столбот претходно се редуцираат во вториот чекор со факторот на редукција  $\chi$  добиен за соодветната столбна крива релевантна за столбно извиткување за столб со едноставен потпирач надвор од рамнината на реброто.

Релевантниот параметар на витоста  $\bar{\lambda}$  за пресметувањето на  $\chi$  е  $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{st,eff} f_o}{N_{cr}}}$

Каде што  $A_{st,eff}$  е ефективна површина на столбот за првиот чекор, (Сл.3c).  $N_{cr}$  е товар на еластично извиткување дадено со следниот израз:

$$N_{cr} = 1,05 E \frac{\sqrt{I_{st}^3 t_w^3 b_w}}{b_1 b_2} \quad \text{за} \quad a > a_c$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{st}}{a^2} + \frac{E t_w^3 b_w a^2}{4\pi^2(1-\nu^2) b_1^2 b_2^2} \quad \text{за} \quad a \leq a_c, \quad a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{st} b_1^2 b_2^2}{t_w^3 b_w}}$$

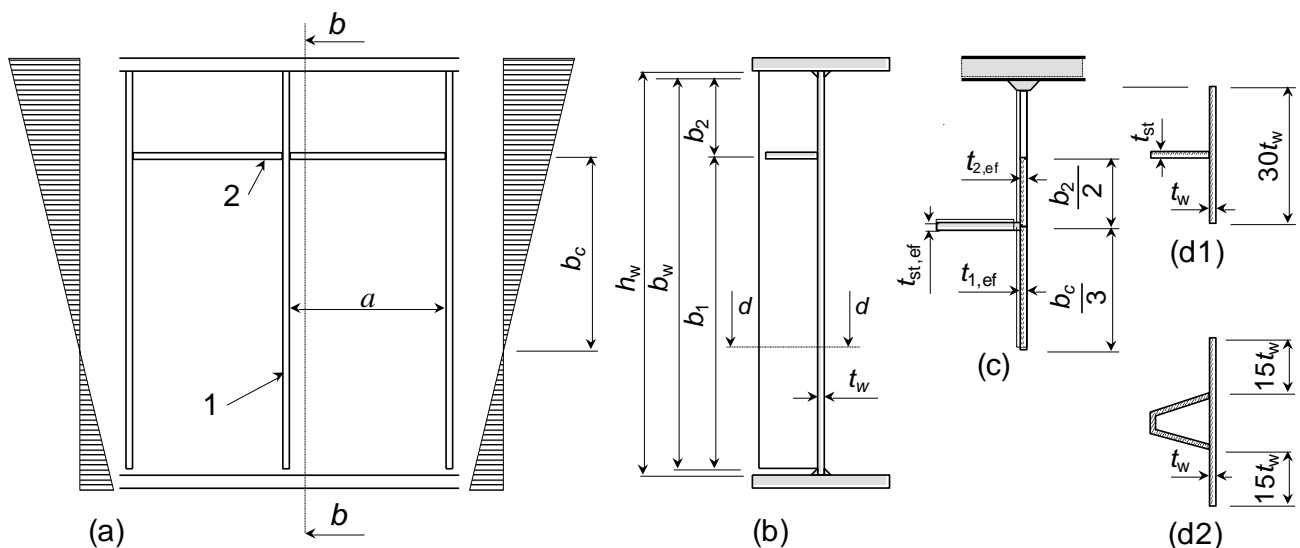
Каде што:  $I_{st}$  е момент на инерција за површината на бруто напречниот пресек на вкргувањето и соседниот дел на реброто околу оска која минува низ центарот и е паралелна со рамнината на реброто.

$b_1$  и  $b_2$  се растојанија од надолжните краеве до вкргувањето ( $b_1 + b_2 = b_w$ ).

$a_c$  е половина од должината на бранот за еластично извиткување на вкргувањето

Во пресметувањето на  $I_{st}$  како за столб се земаат актуелните вкргувања заедно со ефективна ширина  $15t_w$  за плочата на реброто на двете страни од вкргувањето, Сл.3(d1) и (d2).

Во случај на две надолжни вкргувања, и двете притиснати, двете крутости се разгледуваат заедно, со ефективната површина и моментот на инерција на површината еднаков на сумата од нивните индивидуални вкргувања. Локацијата на заедничкото вкргување е во положба на резултантата од аксијалните сили во вкргувањата. Ако едно од вкргувањата е на затегање, постапката ќе биде конзервативна.



(a) Ребро со вкргувања, (b) напречен пресек, (c) ефективна површина на столбни вкргувања, (d1), (d2) столбен напречен пресек за пресметување на  $I_{st}$ , 1 напречно вкргување, 2 надолжно вкргување

Сл.3 Вкргување на реброто при лимените (плочести) носачи поради свиткување

## 2. ОТПОРНОСТ НА ГРЕДАТА НА СМОЛКНУВАЊЕ

Еврокод 9 за подбро спротивставување на ефектите од извиткување на плоча оптоварена со сила на смолкнување ги поставува следните критериуми:

- панелите (деловите на реброто) да се правоаголни и појасите паралелни со внатрешен агол не поголем од  $10^\circ$ ;
- вкргувањата може да бидт во надолжен и / или напречен правец ;
- отворите за врски или исечени делови се мали и ограничени со дијаметри  $d$  што треба да задоволат  $d/h_w \leq 0,05$  каде што  $h_w$  е ширината на плочата ( висина на реброто);
- елементите се унифицирани.

Плочестиот носач за смолкнување се веривува во однос на извиткувањето според следното:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0$$

Каде што:  $V_{Ed}$  е проектна вредност на силата на смолкнување, а  $V_{Rd}$  е проектна отпорност на силата на смолкнување.

## 2.1 Плочести носачи со вкргувања на ребрата во потпирањата

При плочестите носачи поради, концентрацијата на силите (реакциите) на местата на потпирање, потребно е да се постават посебни вкргувања.

Овие вкргувања имаат цел да бидат поефикасни во спротивставувањето на ефектите од извиткувањето предизвикано од силата на смолкнување и мора да ги контролираме (пресметаме) според одредени критериуми. Овде се дадени правилата за плочестите носачи и за ефектите од извиткувањето од силата на смолкнување каде вкргувањата се поставени само над потпорите.

Плочите со  $h_w / t_w > (2,37 / \eta) \sqrt{E / f_o}$  треба да се контролираат за отпорноста на извиткување од смолкнување.

За ребра со напречни вкргувања само над потпорите, проектната отпорност  $V_{Rd}$  за силата на

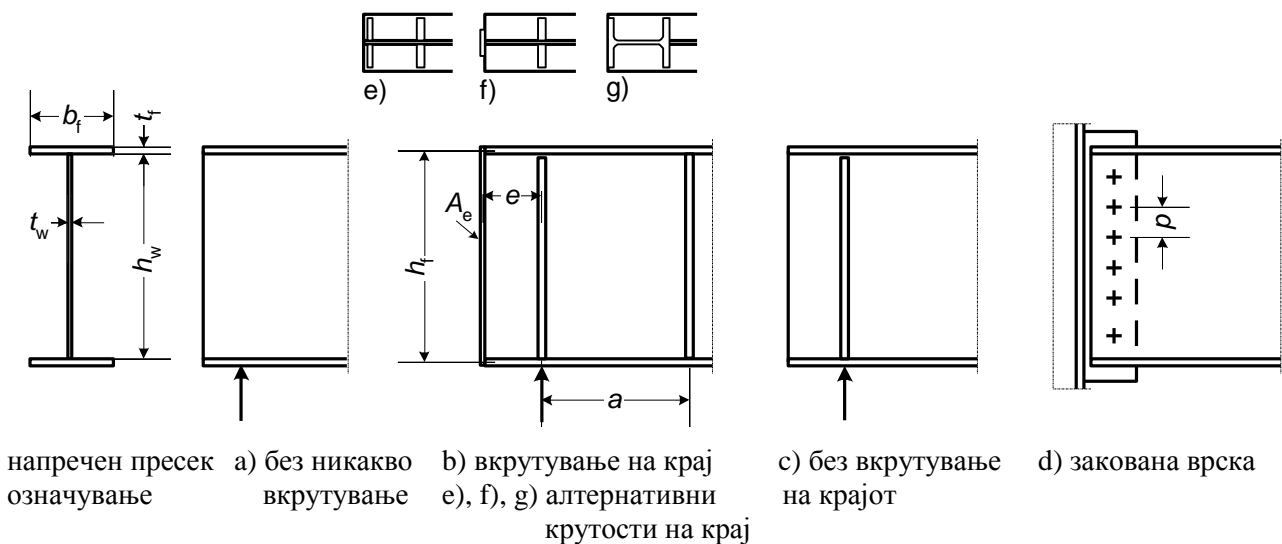
$$\text{смолкнување се зема според: } V_{Rd} = \rho_v t_w h_w \frac{f_o}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

Каде што  $\rho_v$  е фактор за свиткување од смолкнување добиено до Табела 1 или Слика 5.

**Табела 1 - Фактор  $\rho_v$  за свиткување од смолкнување**

Ранг на $\lambda_w$	Со вкргувања на крајот	Без вкргувања на крајот
$\lambda_w \leq 0,83/\eta$	$\eta$	$\eta$
$0,83/\eta < \lambda_w < 0,937$	$0,83/\lambda_w$	$0,83/\lambda_w$
$0,937 \leq \lambda_w$	$2,3/(1,66 + \lambda_w)$	$0,83/\lambda_w$

$\eta = 0,7 + 0,35 f_{uw} / f_{ow}$  но не поголемо од 1,2 каде што  $f_{ow}$  е јакост на потполно течење и  $f_{uw}$  е гранична јакост на течење на материјалот на реброто.



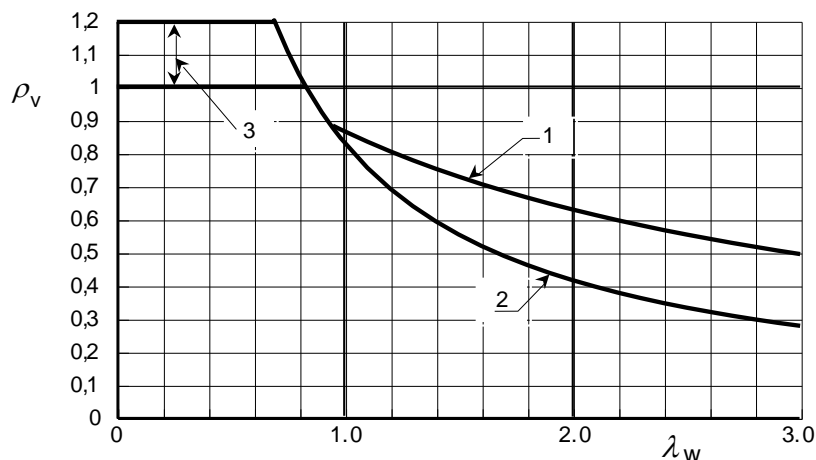
Сл.4 Вкргувања на крајот на гредата и во потпирањето

На сликата 4 се прикажани можните варијации на вкргувањата во потпирањата за носачот:

- без никаво вкргување;
- вкргување на краевите ( овој случај исто така се применува за панели на кројот од гредата и за средни потпирања за континуирани носачи);
- без вкргувања на крајот и
- вкргувања поврзани со завртки (се класифицираат за некрути во пресметката за отпорноста).

Параметарот на витоста  $\lambda_w$  од Табела 1 и Слика 5 е определен според изразот:

$$\lambda_w = 0,35 \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}}$$



1 со вкртувања на крајот, 2 без вкртувања на крајот, 3 ранг на  $\eta$

Сл. 5 Фактор  $\rho_v$  за извиткување од смолкнување

## 2.2 Плочести носачи со вкртувачи за реброто во средина

Овој дел дава правила за ефектите од извиткување на плоча од сила на смолкнување каде што вкртувањата на реброто се поставени во надолжен и/или напречен правец.

Плочи каде што е  $h_w / t_w > (1,02 / \eta) \sqrt{k_\tau E / f_o}$  треба да бидат контролирани за отпорноста на извиткување од смолкнување и треба да бидат обезбедени со напречни вкртувања над потпорите.

Каде што вредноста за  $\eta$  се зема од Табела 1,  $h_w$  и  $t_w$  се дадени на Слика 4, а  $k_\tau$  се определува според изразите дадени подолу.

За греди со напречни и надолжни вкртувања проектната отпорност за извиткувањето од смолкнување  $V_{Rd}$  е сума од придонесот на  $V_{w,Rd}$  од реброто и  $V_{f,Rd}$  од појасите.

$$V_{Rd} = V_{w,Rd} + V_{f,Rd}$$

во кои  $V_{w,Rd}$  вклучува парцијално активно затегнато поле во реброто и  $V_{f,Rd}$  е зголемување во полето на затегање предизвикано со локалната отпорност на свиткување на појасите.

Придонесот од реброто на проектната отпорност за смолкнување треба да се земе според изразот:

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w h_w \frac{f_o}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

Каде што  $\rho_v$  е фактор за извиткување од смолкнување добиен од Табела 1 или Слика 5.

Параметарот на витоста  $\lambda_w$  изнесува:

$$\lambda_w = \frac{0,81}{\sqrt{k_\tau}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}}$$

Каде што  $k_\tau$  е коефициент на минимално извиткување од смолкнување на панелот од реброто. Строги граници може да се земат ако појасот и напречните вкртувања се крути и во тој случај панелот на реброто е панел помеѓу две соседни напречни вкртувања.

Моментот на инерција на површината на надолжните вкртувања треба да се редуцира за 1/3 од неговата вредност кога се пресметува  $k_\tau$ .

За плочи со крути напречни вкртувања и без надолжни вкртувања или повеќе од две подолжни вкртувања, коефициентот на извиткување од смолкнување  $k_\tau$  изнесува:

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00(b_w/a)^2 + k_{\tau st} \text{ ако } a/b_w \geq 1$$

$$k_{\tau} = 4,00 + 5,34(b_w/a)^2 + k_{\tau st} \text{ ако } a/b_w < 1$$

Каде што:  $k_{\tau st} = 9 \left( \frac{b_w}{a} \right)^2 \left( \frac{I_{st}}{t_w^3 b_w} \right)^{\frac{3}{4}}$  но не помало од  $\frac{2,1}{t_w} \left( \frac{I_{st}}{b_w} \right)^{\frac{1}{3}}$

$a$  е растојание помеѓу напречните вкрутувања (Сл.6).

$I_{st}$  е момент на инерција на површината на надолжното вкрутувања околу  $z$ -оската (Сл.6b). За завари со две или повеќе еднакви вкрутувања, не се потребни еднакви растојанија,  $I_{st}$  е момент на инерција на површините од сите поединечни вкрутувања.

Горните изрази се применуваат и за плочи со едно или две надолжни вкрутувања, ако е исполнет односот  $a/b_w < 3$  и коефициентот на свиткување од смолкнување треба да се земе според:

$$k_{\tau} = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 I_{st} / (t_w^3 b_w)}{a^2} + 2,2 \left( \frac{I_{st}}{t_w^3 b_w} \right)^{\frac{1}{3}}$$

За ребро со надолжни вкрутувања параметарот на релативната витост  $\lambda_w$  треба да се земе не

помал од  $\lambda_w = \frac{0,81}{\sqrt{k_{\tau 1}}} \frac{b_{w1}}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}}$

Каде што  $k_{\tau 1}$  и  $b_{w1}$  се однесуваат на суб-панелот со најголем параметар на витоста  $\lambda_w$  за сите суб-панели во рамките на панелот на реброто што се разгледува. За пресметување на  $k_{\tau 1}$  изразите може да се користат со  $k_{\tau st} = 0$ .

Ако отпорноста на појасот не е комплетно искористена од нападниот момент на свиткување ( $M_{Ed} < M_{f,Rd}$ ), придонесот на отпорноста на смолкнување  $V_{f,Rd}$  за појасите може да се вклучи во отпорноста на свиткувањето од смолкнување како следи:

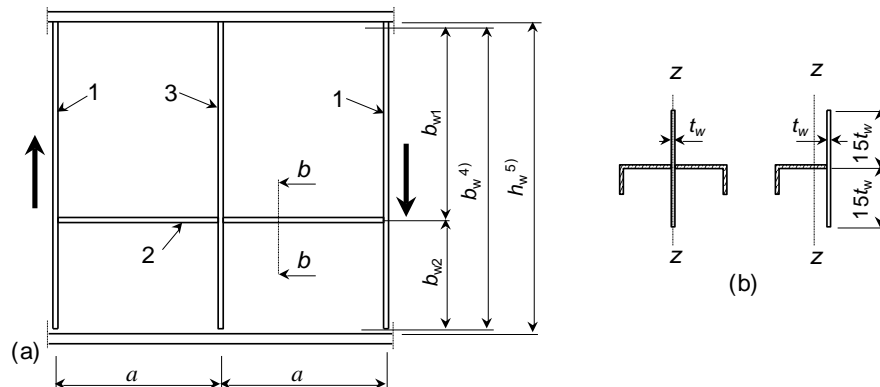
$$V_{f,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{of}}{c \gamma_{M1}} \left( 1 - \left( \frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right)$$

каде  $b_f$  и  $t_f$  се земаат за главниот појас со најниска отпорност,

$b_f$  несмее да биде поголема од  $15t_f$  за секоја страна на реброто

$M_{f,Rd}$  е проектна моментна отпорност на напречниот пресек разгледуван само за ефективните појаси

и  $c = a \left( 0,08 + \frac{4,4 b_f t_f^2 f_{of}}{t_w b_w^2 f_{ow}} \right)$



1) крути напречни вкрутувачи, 2) надолжни вкрутувачи, 3) не крути напречни вкрутувачи,

4) растојанија помеѓу полињата, 5) помеѓу појасите

Сл. 6 Ребро со напречни и надолжни вкрутувања

## **ЗАКЛУЧОК**

Во трудот се презентирани најнеопходните контроли кои треба неминовно да се направат при лимените ( плочести) носачи од алуминиумски легури изведени како заварени, според Еврокод 9. Постапките за контрола се слични со оние за челичните лимени носачи освен што алуминиумските пресеци многу повеќе подлежат на редуција на пресекот поради класата 4. Сложеноста во пресметувањето кај алуминиумските гредни заварени плочести носачи доаѓа од влијанието на топлината во таканаречената HAZ зона во која напрегњата се намалуваат и до 50%. Правилата во Еврокод 9 за пресметувањето на ваквите алуминиумски носачи ги базира со воведување на голем број параметри кои мора да бидат земени во предвид како би се добил оптимален пресек.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Eurokode-9:-Design of aluminium structures; Part 1-1: General structural rules.
2. Guther Valting „Aluminium im Konstruktiven Ingenieurbau”, Ernst & Sohn, Technische Universitat Hamburg-Germany, 2003.
3. Атанас Филиповски „Алуминиумски конструкции во градежништвото”, книга, 2012г ЗИМ.