

САВРЕМЕНИ КОНЦЕПТ ПРОЈЕКТОВАЊА КОНСТРУКЦИЈА ОД АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА ПРЕМА ЕВРОКОДУ 9

THE CONTEMPORARY DESIGN CONCEPT OF ALUMINUM ALLOYS STRUCTURES ACCORDING TO EUROCODE 9



UDK: 624.014.7(083.133)
Pregledni rad

Проф. др Златко МАРКОВИЋ, дипл. грађ. инж.
Јелена ДРАГАШ, дипл. грађ. инж.

РЕЗИМЕ

У овом раду су изложени основни принципи пројектовања конструкција од алуминијумских легура према најновијем европском стандарду EN1999-1-1/2007: Прорачун алуминијумских конструкција. Поред анализе прорачуна носивости и стабилности алуминијумских конструкција у раду је дат и приказ карактеристика алуминијума као конструктивног материјала, његових предности и мана, као и могућа примена у грађевинарству. Принципи прорачуна носивости илустровани су и карактеристичним нумеричким примерима.

Кључне речи: алуминијум, конструкције, прорачун, зона утицаја топлоте, Еврокод 9

SUMMARY

This paper provides an overview on basic principles of design Al-alloy structures based on the latest European standard EN1999-1-1/2007: Design of aluminium structures. Along with the design of resistance and stability of aluminium structures, presented is an overview of the characteristics of aluminium as a structural material, its advantages and disadvantages, and its possible application in civil engineering. The principles of design of cross sections resistance are illustrated in characteristic numeric examples.

Key words: aluminium, structures, design, heat affected zone, Eurocode 9

1. УВОД

Алуминијум је трећи најраспрострањенији елемент у земљиној кори после кисеоника и силицијума са заступљеношћу од чак 8,07%. Чист алуминијум је мекан и ограничене чврстоће, али у комбинацији са легирајућим елементима као што су бакар, манган, силицијум, магнезијум и цинк, добијају се карактеристике које алуминијумске легуре чине погодним за примену у многим гранама индустрије. Своју примену налази и у грађевинарству као материјал који је, захваљујући филму оксида, врло отпоран на дејство корозије. У чистом стању алуминијум се лако обликује, а помешан са малим количинама других метала у виду легура, може да достигне чврстоћу челика са само трећином његове тежине. Поред легирања, карактеристике алуминијума могу се знатно побољшати и термичком обрадом (жарењем, каљењем, дозревањем и обрадом у хладном стању).

Адреса аутора: Грађевински факултет Универзитета у Београду,
Институт за материјале и конструкције, 11000 Београд, Булевар
краља Александра 73
E-mail: zlatko@grf.bg.ac.rs
E-mail: jelena.dragas@gmail.com

При разматрању физичких и механичких карактеристика алуминијумских легура, најприкладније је вршити поређење са конструкционим или нерђајућим челицима, као материјалима који представљају највећу „конкурвенцију“ алуминијуму. Алуминијумске легуре представљају врло широку фамилију прилично разноврсних материјала, па је тешко говорити о генералним сличностима алуминијума и других метала. Стога су алуминијумске легуре, у зависности од легирајућих елемената и стања производа, подељене у серије. Усвојен је нумерички систем означавања помоћу четвороцифрених арапских бројева од којих први дефинише серију, према преовлађујућим легирајућим елементима:

Серија 1XXX У овој групи су легуре које имају најмање 99% чистог алуминијума.

Серија 2XXX Легуре алуминијума са баком, магнезијумом и силицијумом (Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Si).

Серија 3XXX Легуре алуминијума са манганом (Al-Mn).

Серуја 4XXX Легуре алуминијума са силицијумом (Al-Si).

Серуја 5XXX Легуре алуминијума са магнезијумом (Al-Mg).

Серуја 6XXX Легуре алуминијума са силицијумом и магнезијумом (Al-Si-Mg).

Серуја 7XXX Легуре алуминијума са цинком и магнезијумом (Al-Zn-Mg).

Серуја 8XXX Легуре алуминијума са осталим легирајућим елементима.

Остали бројеви у основној ознаци (XXX) подробније описују поједина својства конкретне Ал-легуре. Поред основне ознаке Ал-легуре могу да имају и додатне ознаке које описују стање, односно начин термичке обраде. Наиме, производ од исте легуре добијен истим основним производним процесом, има битно различите употребне особине у зависности од начина термичке обраде производа, односно стања. У табели 1 приказана је веза између додатних ознака и начина термичке обраде, односно стања Ал-легуре.

Табела 1. Стање производа од алуминијумских легура - додатне ознаке

Ознака	Назив стања	Опис стања
0	Меко	Постигнуто рекристализационим жарењем производа добијених пластичном обрадом у хладном стању
T3	Термички очврсло са природним старењем и хладном обрадом	Постигнуто дозревањем на собној температури и обрадом у хладном стању
T4	Термички очврсло са природним старењем	Постигнуто дозревањем на собној температури
T5	Стабилно	Постигнуто жарењем производа примарне производње на температурама испод доње границе рекристализације
T6	Термички очврсло са вештачким старењем	Постигнуто растворним жарењем и термичим очвршћавањем при повишеним температурама (вештачко старење) производа од легура погодних за термичко очвршћавање
T8	Термички очврсло са вештачким старењем и хладном обрадом	Постигнуто вештачким старењем производа од легура погодних за термичко очвршћавање и обрадом у хладном стању

Табела 2. Упоредни приказ својстава алуминијума, челика и нерђајућег челика

Карактеристике материјала	Алуминијум 6061-T6	Челик S235-S355	Инокс 1.4301
Обрадљивост	врло добра	недовољна	ограничена
Заварљивост	слаба, редуција чврстоће	добра, нема редуције	добра
Отпорност на корозију	добра	слаба	врло добра
Граница развлачења - f_y	240 МПа	235-355 МПа	210 МПа
Специфична тежина	26,5 kN/m ³	78,5 kN/m ³	77 kN/m ³
Модул еластичности- E	70 GPa	210 GPa	200GPa
Издужење при лому	8%-10%	20%	45%
Однос чврстоћа/тежина	9,0	3,0-4,5	2,7

У табели 2 је дат упоредни приказ основних својстава алуминијумске легуре серије 6061-T6, конструкционих челика и једног нерђајућег челика.

Бројне предности алуминијума намећу га као одлично решење за многе конструкције као што су: системи кровова средњег и великог распона код којих смањење тежине игра велику улогу, конструкције јавних, стамбених и других објеката са изложеном конструкцијом који се налазе у приморским крајевима, конструкције које се налазе у агресивним срединама (кровови базена, мостови, *offshore* конструкције...), конструкције са покретним деловима којима алуминијум као лак материјал омогућава знатно већу економичност, објекти за складиштење и транспорт материја које агресивно делују на челик (резервоари, цевоводи...), конструкције високог степена радионичке обраде, које обједињују носећу функцију и функцију облоге, конструкције које је јако тешко одржавати (светионике, далеководи, носаче саобраћајних знакова...), конструкције у пределима који су доста удаљени од места производње па

трошкови транспорта представљају битну ставку (далеководи), монтаж-но демонтажне конструкције различите намене, конструкције које се граде у тешко приступачним пределима (понтонски мостови, помоћни мостови, скеле). Такође се користи за постојеће конструкције код којих је због планираног повећања оптерећења предвиђена замена старих елемената елементима мање тежине, као и за конструкције у пределима са веома ниским температурама у којима је употреба челика немогућа. На слици 1 су приказани неки примери објеката од алуминијума.

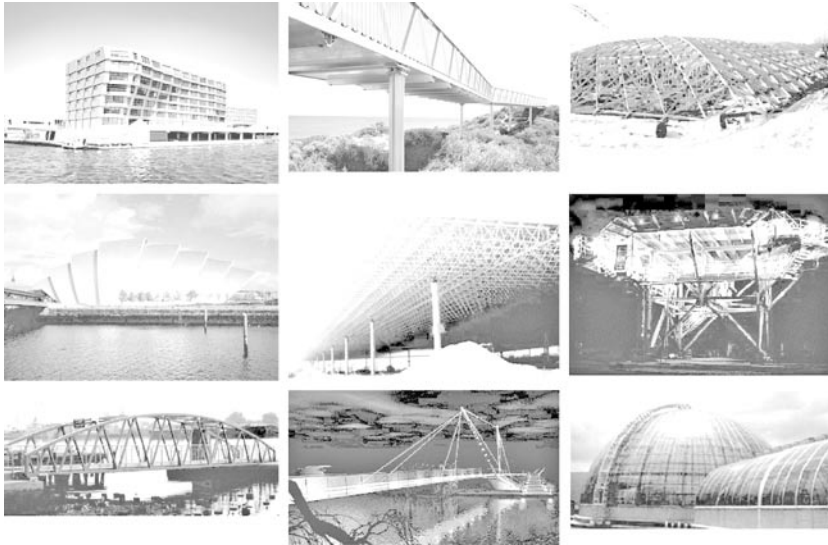
2. СПЕЦИФИЧНОСТИ АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА

Специфична тежина

Алуминијумске легуре имају тежину приближно три пута мању од челика, што омогућава израду лакших конструкција, као и лакши и јефтинији транспорт и монтажу.

Отпорност на дејство корозије

Природни слој алуминијум-оксида обезбеђује високо ефикасну препреку зубу времена, утицају ниске температуре, влаге и хемијски агресивним супстанцама. За разлику од челика који годишње губи око 80 g/m², алуминијум губи само 2-4 g/m² услед дејства корозије. Иако се, због добре отпорности на корозију алуми-



Слика 1. Примери конструкција од алуминијума

нијум може применити без заштитног премаза, постоји опасност од контактне корозије. Услед разлике електрохемијског потенцијала алуминијума и других материјала у присуству електролита настају галванске струје, које доводе до разградње електрохемијски негативнијег материјала. Корозија најчешће настаје између алуминијума и челика, па је потребно посебну пажњу посветити оваквим спојевима како не би дошло до анодног растварања алуминијума. Постоје готови системи за везе ова два метала у конструкцијама, као и разни подметачи, премази и лепљиве траке за елиминацију контакта.

Флексибилност

Особине алуминијума и његових легура омогућавају лако индустријско обликовање – ваљање, ковање, истискивање и ливење. Флексибилност алуминијума утиче и на мањи утрошак материјала, зато што омогућава производњу попречних пресека чији облици имају најмању тежину и најповољнија конструкцијска својства.

Понашање на ниским температурама

Алуминијум је погодан за коришћење у срединама са ниским температурама зато што је отпорнији на крти лом од челика. Код алуминијума снижењем температуре долази до повећања дуктилности и до побољшања других карактеристика материјала, као што је на пример затезна чврстоћа која се такође повећава са смањењем температуре.

Модул еластичности

Битна разлика између алуминијума и челика је и три пута мањи модул еластичности алуминијума. Као последица тога, проблем избочавања и деформација је знатно израженији него код челика. Због

малог модула еластичности алуминијумске конструкције су осетљивије и на вибрације и у стању су да апсорбују већи деформациони рад од челичних конструкција. Као такве могу да пригушују осцилације, и имају мањи коефицијент удара.

Понашање при порасту температуре

При порасту температуре механичка својства алуминијума брже опадају него код челика. Издужења услед температуре су два пута већа него код челика ($\alpha_t = 2,3 \times 10^{-5} \text{ 1/C}^\circ$), али због мањег модула еластичности напони који се јављају у материјалу услед температуре су само две трећине оних у челику.

Издужење при лому

Алуминијумске легуре имају мање издужење при лому од челика. У зависности од начина производње и типа легуре различита су и издужења. Код каљених и вештачки остарелих алуминијумских легура гранично издужење износи 5-15%, а код легура очврселих хладном обрадом испод 10%, што је два пута мање него код челика, али ипак довољно да конструкције од алуминијума не буду склоне кртом лому.

σ - ϵ дијаграм

За разлику од челика који има изражен линеарно еластичан део σ - ϵ дијаграма, зависност напона и дилатације код алуминијума има нелинеарно-пластични карактер. Услед велике разноврсности легура и њихових својстава облик σ - ϵ дијаграма је знатно сложенији него код челика. Постоји већи број различитих нумеричких модела σ - ϵ дијаграма. У Еврокоду 9 је заступљен Рамберг-Озгудов модел који се може приказати у следећем облику:

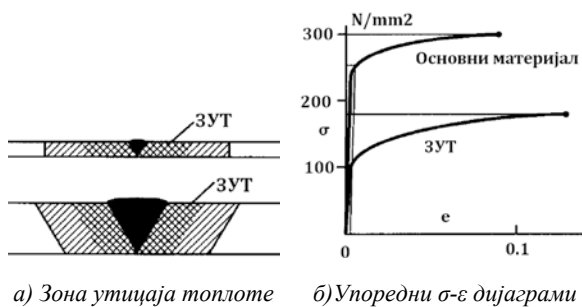
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{f_0} \right)^n$$

где су n и f_0 параметри који зависе од врсте и стања Ал-легура и који су дати табеларно у Еврокоду 9.

Зона утицаја топлоте – ЗУТ

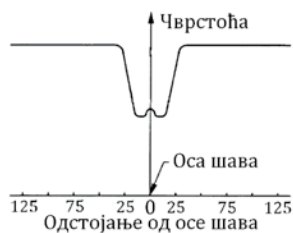
Приликом електролучног заваривања долази до топљења основног материјала и до преношења топлоте у основни материјал у зони шава, па се јављају велике промене у микроструктури алуминијума. Термички утицаји се брзо шире на зону у околини шав - зона утицаја топлоте - ЗУТ (*heat affected zone*-HAZ), док се утицаји смањења чврстоће материјала губе изван те зоне (слика 2а). Гранична носивост материјала

у ЗУТ-у је мања него код основног материјала, σ - ϵ крива је блажа, а материјал у ЗУТ-у је нешто дуктилнији од основног материјала (слика 2б). Код легура серије бxxx топлота заваривања може локално да смањи чврстоћу основног материјала на половину. Код легура серије 7xxx утицај топлоте је нешто мањи, али се простира у области око шави. После поступка жарења код легура серија 5xxx и 3xxx (ојачане процесом каљења) долази до пада на ниво О (меко стање). ЗУТ је најизраженији код термички обрађених легура серија 2xxx, бxxx и 7xxx.



Слика 2. Утицаји заваривања у зони утицаја топлоте

Непосредно након заваривања долази до пада носивости у завареном споју, међутим после одређеног времена долази до побољшања носећих карактеристика у ЗУТ-у. Овај феномен је познат као *старење шави*. Код групе легура серије 7xxx овај феномен је посебно изражен, па после заваривања долази до пада чврстоће на 50% од почетне вредности. После приближно три месеца долази до побољшања механичких карактеристика на вредности приближне изворној легури. Овај феномен зависи од квалитета шави, дебљине основног материјала, количине топлоте која се ослободи приликом заваривања и врсте додатног материјала. Што је већа количина топлоте приликом заваривања, већи је и пад механичких карактеристика материјала. Како би се побољшале механичке карактеристике материјала после заваривања, користе се и поступци додатног загревања после заваривања, на температурама од око 200°C. Овим поступком могуће је материјалу у ЗУТ-у повратити првобитну чврстоћу. Смањење чврстоће на затезање и границе развлачења у ЗУТ-у се мора узети у обзир при прорачуну. Побољшање карактеристика термички обрађених легура процесом старења шави није довољно истражено и треба га узети са резервом.



Слика 3. Смањење чврстоће материјала у околини шави - ширина ЗУТ-а

Величина, односно ширина зоне утицаја топлоте зависи од више различитих фактора. На слици 3 приказан је утицај слабења чврстоће материјала у зони око шави у функцији удаљености од осе шави. Зона утицаја топлоте се простира до приближно 75 mm од осе шави, а највећи утицај на чврстоћу се осећа на растојању до 25 mm (25 mm \cong 1inch). Због тога се, до појаве Еврокода 9, користило правило једног инча (*one-inch rule*).

3. ОСНОВЕ ПРОРАЧУНА ПРЕМА ЕВРОКОДУ 9

Европским прописима за конструкције, познатијим као Еврокодovi за конструкције обухваћене су и конструкције од алуминијумских легура којима припада посебан део, Еврокод 9: Прорачун алуминијумских конструкција (EN 1999 Eurocode 9: *Design of aluminium structures*). Због свог обима Еврокод 9 је подељен на пет делова:

EN 1999-1-1: Општа конструкцијска правила (*General structural rules*);

EN 1999-1-2: Прорачун конструкција на дејство пожара (*Structural fire design*);

EN 1999-1-3: Конструкције осетљиве на замор (*Structures susceptible to fatigue*);

EN 1999-1-4: Хладнообликовани конструкциони лимови (*Cold-formed structural sheeting*);

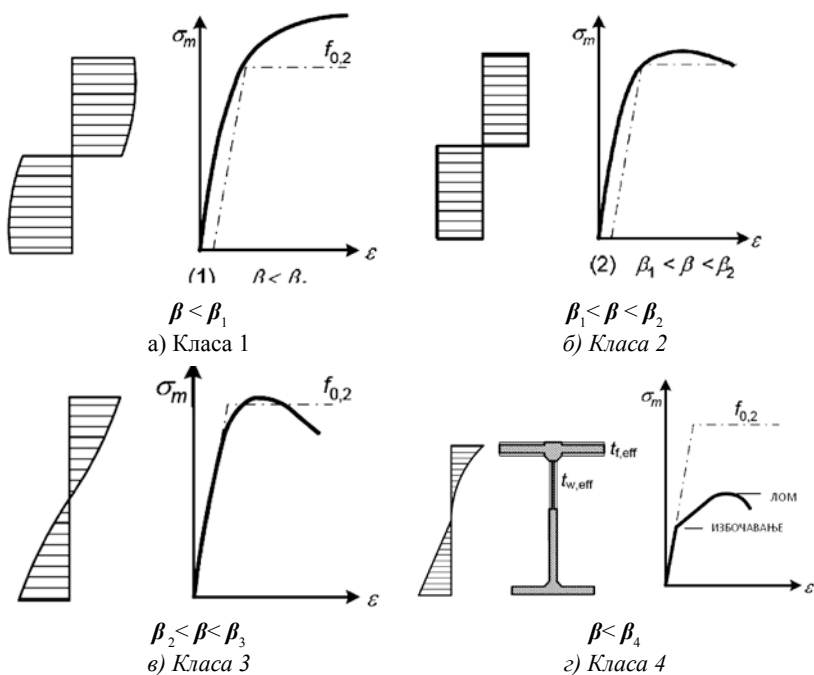
EN 1999-1-5: Љуске (*Shell structures*);

У оквиру процеса усаглашавања домаћих стандарда и прописа са прописима ЕУ предвиђено је да се до краја 2012. године сви еврокодovi усвоје као домаћи стандарди - СРПС-ЕН, па је то судбина и Еврокода 9. Имајући у виду да до сада у нашој земљи нису постојали прописи за прорачун алуминијумских конструкција ова чињеница представља охрабрење инжењерима да почну са масовнијом применом алуминијумских конструкција. Овај рад, између осталог, има за циљ да инжењерској популацији донекле приближи ову проблематику.

Свакако најзначајнији од свих делова Еврокода 9 је базични део EN 1999-1-1 који садржи општа правила за прорачун конструкција од Ал-легура, па су у наредном делу рада укратко истакнути најзначајнији сегменти из овог дела Еврокода 9. У овом делу су дата правила за пројектовање конструкција од алуминијума: основе прорачуна, карактеристике материјала, гранична стања носивости, гранична стања употребљивости, прорачун веза, ...

3.1. Класификација попречних пресека

Слично као и код челичних конструкција, провера граничних стања носивости и избор глобалне анализе конструкције, зависе од класе попречног пресека. Неопходно је одредити класе попречних пресека свих притиснутих или делимично притиснутих елемената конструкције. У зависности од класе попречног пресека одређује се капацитет носивости пресека и тип глобалне и локалне анализе. Различити делови пресека (ребро или ножице) могу, генерално да буду



Слика 4. Дефиниције класа попречних пресека

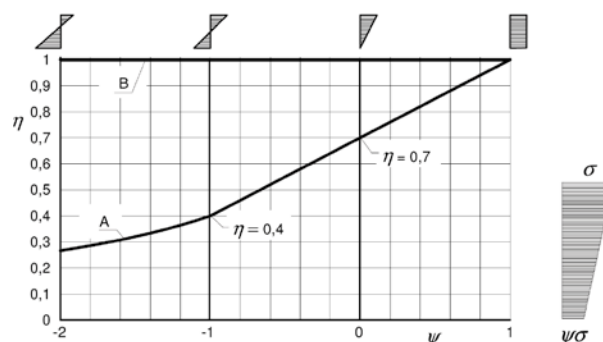
различите класе, и треба их посебно класификовати. За класу попречног пресека се усваја класа најнеповољнијег дела пресека, односно највиша класа. Као и Еврокод 3 и Еврокод 9 разликује четири класе попречних пресека:

Класа 1 – Пресеци који имају довољан капацитет ротације да формирају пластични зглоб који омогућава употребу глобалне пластичне анализе без редукције носивости (слика 4а). Код компактних пресека код којих неће доћи до избочавања услед притиска долази до пластичног понашања прекорачењем границе еластичности.

Класа 2 – Попречни пресеци који могу да достигну пластични момент носивости, али имају ог-

Табела 3. Коефицијент виткости β за неукрућене делове пресека

За унутрашње и конзолне делове пресека са константним нормалним напонам и конзолне делове пресека са максималним напонам притиска на крају конзолног препуста.	$\beta = b/t$
За унутрашње делове пресека са променљивим дијаграмом напона, где је неутрална оса у средини елемента.	$\beta = 0,4 b/t$
За унутрашње делове пресека са променљивим нормалним напонам и конзолне делове пресека са максималним напонам притиска на почетку конзолног дела.	$\beta = \eta b/t$
$\eta = 0,70 + 0,30 \psi$ за $1 \geq \psi \geq -1$ $\eta = 0,80/(1 - \psi)$ за $\psi < -1$ ψ однос напона на ивицама пресека (видети слику 5); $\psi = \frac{\sigma_{x2}}{\sigma_{x1}}$ b ширина разматраног дела попречног пресека; t дебљина елемента попречног пресека.	



Слика 5. Одређивање коефицијента η . А – маскималан напон притиска на почетку конзолног препуста, В – маскималан напон притиска на крају конзолног препуста

Код делова пресека са укрућењима разликују се три модела избочавања:

Модел 1 – Укрућени део пресека се избочава заједно са укрућењем - дисторзионо извијање (слика 6а);

Модел 2 – Избочавање укрућеног поља и укрућења је независно, а веза укрућења са пресеком је права (слика 6б).

раничени капацитет ротације услед локалног избочавања, који није довољан за глобалну пластичну анализу (слика 4б).

Класа 3 – Попречни пресеци код којих је достигнута граница развлачења само у крајњим влакнима, али је даља пластификација онемогућена услед локалног избочавања (слика 4в). Може се развити само еластични момент носивости. До избочавања долази услед напона већих, или једнаких техничкој граници развлачења - $f_{0,2}$.

Класа 4 – Попречни пресеци код којих се услед локалног избочавања не може достићи граница развлачења $f_{0,2}$ ни у најудаљенијем влакну пресека (слика 4г). До избочавања долази пре него што се пластификује најоптерећеније влакно у попречном пресеку. Неопходно је да се узму у обзир утицаји избочавања помоћу ефективног попречног пресека.

Као што се из претходног види дефиниција класа пресека је готово иста као и код челичних конструкција, али је одређивање класе сасвим другачије. Класификација попречних пресека алуминијумских конструкција се врши помоћу коефицијента виткости β којим се дефинише осетљивост делова попречног пресека на избочавање, који се посебно одређује за неукрућене и укрућене делове попречног пресека. За неукрућене делове попречног пресека коефицијент β треба да се одреди према табели 3.

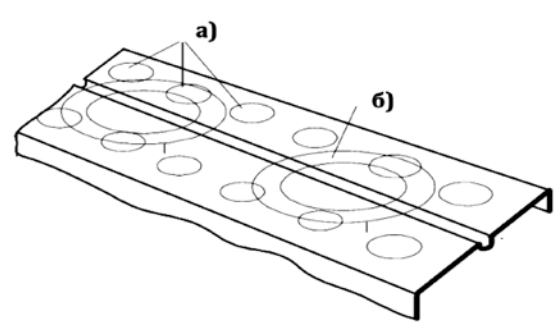
Модел 3 – Представља комбинацију прва два модела. Суперпонирају се утицаји локалног избочавања равног (неукрућеног) дела и читаве укрућене зоне (слика 6в).



а) Модел 1- Дисторзионо извијање

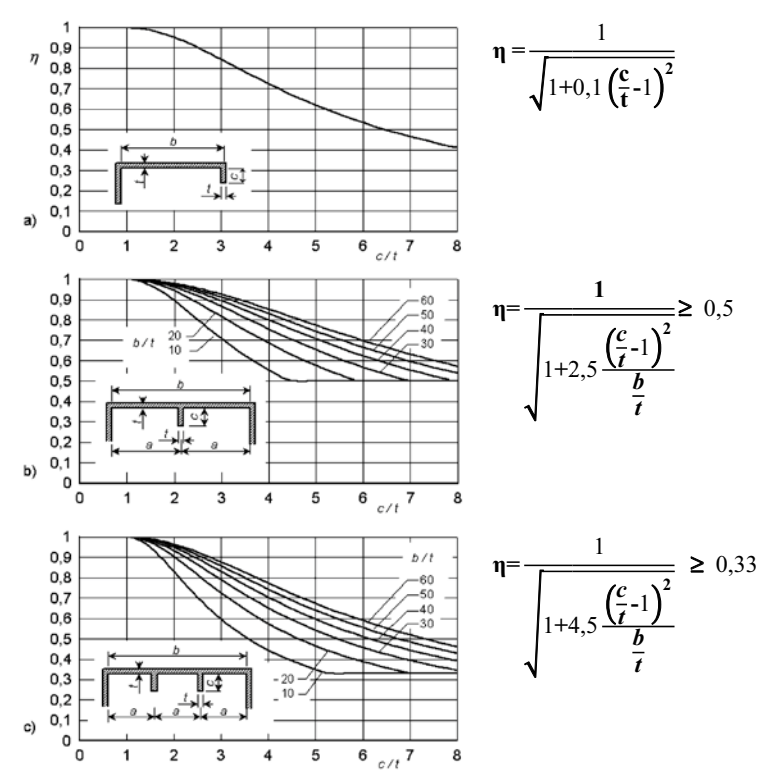


б) Модел 2- Независно избочавање елемената и укрућења



в) Модел 3 - Комбиновано избочавање елемената са укрућењем

Слика 6. Различити модели избочавања укрућених елемената



Слика 7. Одређивање параметра η за укрућене делове пресека

Табела 4. Одређивање класе дела пресека

	Греде	Притиснути штапови
Класа 1	$\beta < \beta_1$	$\beta \leq \beta_2$
Класа 2	$\beta_1 < \beta \leq \beta_2$	$\beta \leq \beta_2$
Класа 3	$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$	$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$
Класа 4	$\beta_3 < \beta$	$\beta_3 < \beta$

Табела 5. Граничне вредности коефицијента виткости

Класификација материјала	Унутрашњи делови			Конзолни делови		
	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ
Класа А, без шавова	11	16	22	3	4,5	6
Класа А, са шавовима	9	13	18	2,5	4	5
Класа Б, без шавова	13	16,5	18	3,5	4,5	5
Класа Б, са шавовима	10	13,5	15	3	3,5	4

$\epsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}}$ где је f_0 у N/mm^2

За уобичајена стандардна укрућења (која су исте дебљине као и елемент који укрућују) и константан напон притиска, коефицијент виткости β може да се одреди на основу израза за неукрућене делове пресека $\beta = \eta b/t$ где се коефицијент η одређује на основу дијаграма приказаних на слици 7, у зависности од типа и броја укрућења.

На основу одређеног параметра β може да се изврши класификација попречног пресека како је приказано у табели 4, док су граничне вредности коефицијената виткости β_1 , β_2 и β_3 за греде и притиснуте елементе дате у табели 5.

Класа извијања материјала А или Б зависи од облика σ - ϵ дијаграма. У EN 1999-1-1 је за све Ал-легури дефинисано којој класи припадају.

3.2. Концепт ефективног пресека код попречних пресека класе 4

Носивост попречних пресека класе 4 се одређује на основу ефективних геометријских карактеристика пресека. Редукција носивости услед избочавања се врши помоћу коефицијента редукције ρ_c којим се умањује дебљина свих притиснутих делова пресека класе 4. За све пресеке константне дебљине, коефицијент ρ_c може да се одреди на следећи начин:

$$\rho_c = 1,0 \quad \text{за} \quad \beta \leq \beta_3$$

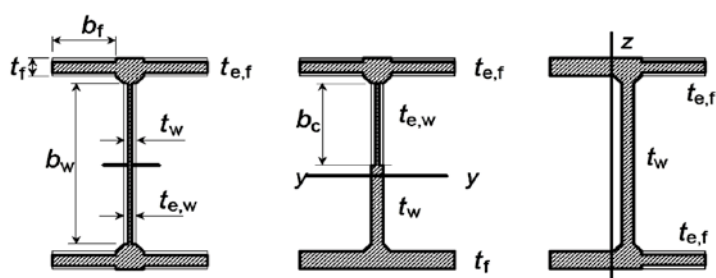
$$\rho_c = \frac{C_1}{\beta/\epsilon} - \frac{C_2}{(\beta/\epsilon)^2} \quad \text{за} \quad \beta > \beta_3$$

где су коефицијенти C_1 и C_2 дати у табели 6.

Табела 6. Вредности коефицијената C_1 и C_2

Класификација материјала	Унутрашњи делови		Конзолни делови	
	C_1	C_2	C_1	C_2
Класа А, без шавова	32	220	10	24
Класа А, са шавовима	29	198	9	20
Класа Б, без шавова	29	198	9	20
Класа Б, са шавовима	25	150	8	16

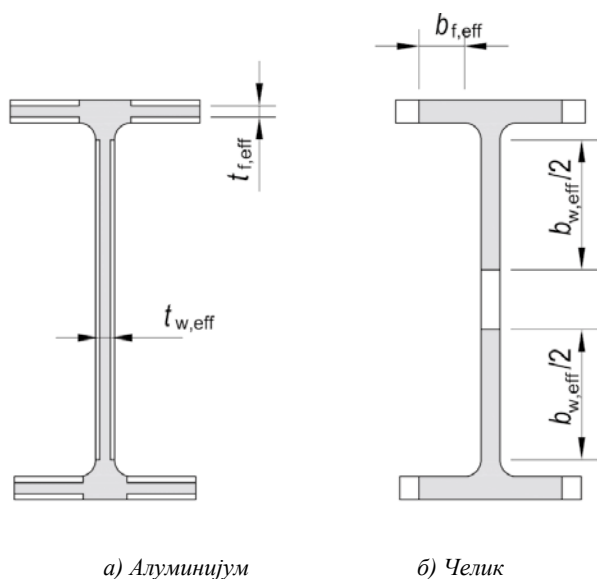
Код попречних пресека класе 4 потребно је да се одреди ефективна дебелина притиснутих делова пресека. На слици 8 су приказани карактеристични облици ефективних попречних пресека за различите случајеве напрезања.



а) Притисак б) Савијање око у-у осе в) Савијање око z-z осе

Слика 8. Ефективни попречни пресеци за различите случајеве напрезања

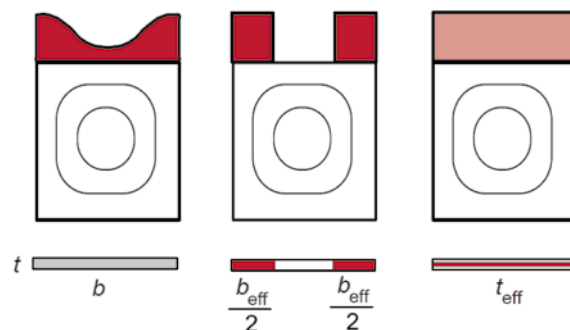
Код алуминијума се избочавање притиснутог дела пресека, као и утицај заваривања у ЗУТ-у увводе у прорачун преко ефективне дебелине пресека t_{eff} док се код челика ефективни пресек одређује на основу ефективне ширине b_{eff} (слика 9). Ово имплицира и различите облике прорачунских дијаграма нормалних напона (слика 10).



а) Алуминијум

б) Челик

Слика 9. Поређење ефективних пресека од алуминијума и челика



а) Стварна расподела напона б) Ефективна ширина в) Ефективна дебелина

Слика 10. Стварни и прорачунски дијаграми нормалног напона притиска

Одређивање ефективног попречног пресека помоћу ефективне дебелине омогућава једноставнији прорачун, јер отпада потреба за одређивањем почетка и краја ефективне ширине и лакше комбиновање утицаја избочавања и ЗУТ-а.

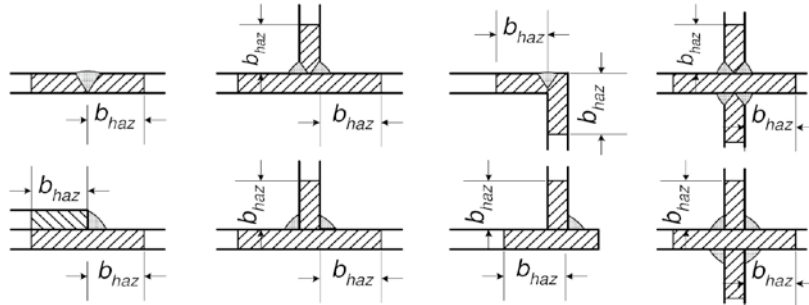
3.3. Редукција пресека у зони утицаја топлоте

Алуминијум је знатно осетљивији на дејство топлоте од челика. У околини шавова (ЗУТ) долази до редукције својстава материјала услед топлоте која се развија приликом процеса заваривања. Ради једноставнијег прорачуна усвојено је да редукована својства алуминијума у зони утицаја топлоте имају константну вредност. Умањене вредности границе развлачења $f_{o,haz}$ и чврстоће на затезање $f_{u,haz}$ за различите легуре алуминијума су дате у стандарду EN 1999-1-1. Редукција својстава материјала у зони утицаја топлоте се узима у обзир помоћу фактора редукције који се одређују на следећи начин:

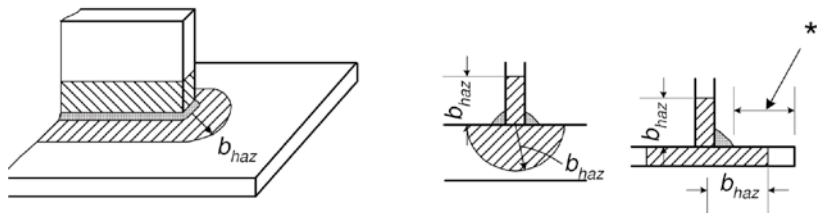
$$\rho_{o,haz} = \frac{f_{o,haz}}{f_o} \quad \rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u}$$

Зона у којој је потребно редуковати својства материјала се простире у свим правцима од шавова на дужини од b_{haz} , као што је приказано на слици 11. Ради једноставнијег прорачуна, уместо редукције карактеристика материјала у Еврокоду 9 се врши смањење дебелине делова пресека у оквиру ЗУТ-а. Код танких лимова за границе зоне утицаја топлоте могу да се усвоје праве линије, док се у случају већих дебелина усвајају као криве линије (слика 12). Ако је растојање од ивице шавова до ивице препуста мање од $3b_{haz}$ може се усвојити да се зона утицаја топлоте простире читавом дужином препуста.

Ширина зоне утицаја топлоте зависи од примењеног поступка заваривања и дебелине елемената који се заварују. Вредности b_{haz} се за МИГ поступак



Слика 11. Простирање зоне утицаја топлоте



Слика 12. Зона утицаја топлоте у елементима веће дебљине

крећу од 20 mm за танке лимове до 40 mm за лимове дебљине изнад 25 mm.

3.4. Карактеристике попречних пресека

За потребе прорачуна носивости пресека конструкција од Ал-легура, у зависности од врсте напрезања, користе се различите површине попречног пресека.

Бруто површина попречног пресека A_g је укупна површина пресека без утицаја избочавања и топлоте заваривања, као и без одбитка услед рупа за спојна средства.

Нето површина попречног пресека A_{net} је површина која се добија када се од бруто пресека одузму површине рупа за спојна средства и евентуални отвори. У случају смакнутог распореда рупа за спојна средства, нето површина пресека се одређује на основу следећих израза (видети слику 13а):

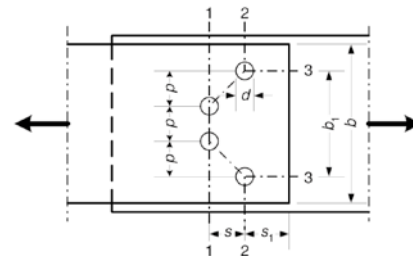
$$A_{net} = \min \left\{ \begin{array}{ll} t(b - 2d) & \text{линија 1} \\ t \left(b - 4d + \frac{2s^2}{4p} \right) & \text{линија 2} \\ t \left(b_1 + 2 \cdot 0,65 s_f - 4d + \frac{2s^2}{4p} \right) & \text{линија 3} \end{array} \right.$$

Површина ефективног попречног пресека A_{eff} је површина која се добија редукијом услед избочавања и/или услед термичких утицаја у материјалу ЗУТ-а. Редукија носивости материјала у ЗУТ-у се узима у обзир на различите начине, у зависности од класе попречног пресека:

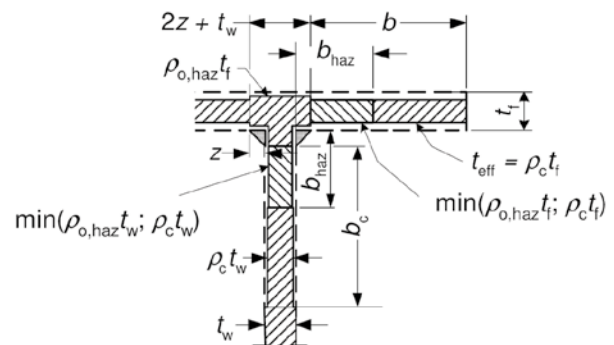
а) Код делова пресека класа 1, 2 и 3 који су изложени термичким утицајима услед заваривања у зонама утицаја топлоте на ширини b_{haz} , смањује се дебелина лимова на вредност: $\rho_{o,haz} t$;

б) Код притиснутих делова пресека класе 4 који нису изложени утицају топлоте, редукована вредност дебљине је: $t_{eff} = \rho_c t$;

в) Код притиснутих делова пресека класе 4 који су изложени утицају топлоте ефективна дебелина је једнака минималној вредности од $\rho_c t$ и $\rho_{o,haz} t$ у делу ЗУТ-а, односно $\rho_c t$ на осталом притиснутом делу пресека (слика 13б).



Слика 13а. Потенцијалне линије лома



Слика 13б. Ефективне дебљине код завареног пресека класе 4

3.5. Гранична стања носивости

При прорачуну алуминијумских конструкција неопходно проверити сва релевантна гранична стања носивости и употребљивости. У овом раду су, због ограниченог обима, издвојена и презентована само нека најзначајнија гранична стања носивости.

3.5.1. Аксијално затезање

Код елемената оптерећених аксијалном силом затезања потребно је проверити само носивост попречног пресека. Следећи услов треба да буде испуњен:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

где је:

N_{Ed} прорачунска вредност аксијалне силе затезања,
 $N_{t,Rd}$ прорачунска носивост попречног пресека на затезање.

Прорачунска вредност носивости попречног пресека на затезање $N_{t,Rd}$ се одређује као најмања од следеће три вредности:

$N_{o,Rd} = A_g \frac{f_o}{\gamma_{M1}}$ носивост при потпуној пластификацији пресека

$N_{u,Rd} = 0,9 A_{net} \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$ гранична носивост нето пресека на месту рупа (ако их има)

$N_{o,Rd} = A_{eff} \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$ гранична носивост у зони заваривања (ако постоји)

где је:

A_g површина бруто попречног пресека,
 A_{net} нето површина попречног пресека која је редукована за величину рупа за спојна средства и смањење дебљине у ЗУТ на $\rho_{u,haz} t$,

A_{eff} ефективна површина попречног пресека која се заснива на дебљини $\rho_{u,haz} t$,

γ_{M1} парцијални коефицијент сигурности за носивост пресека и елемената ($\gamma_{M1} = 1,1$),

γ_{M2} парцијални коефицијент сигурности за носивост на лом затезањем ($\gamma_{M2} = 1,25$),

Због смањења својстава пресека није дозвољено да се рупе за спојна средства налазе у оквиру ЗУТ-а.

3.5.2. Аксијални притисак

Код притиснутих елемената потребно је извршити контролу носивости попречног пресека и контрола елемената на извијање. Носивост попречног пресека треба да се провери на следећи начин:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

где је $N_{c,Rd}$ прорачунска носивост попречног пресека на притисак која треба да се одреди на следећи начин:

$N_{u,Rd} = A_{net} \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$ гранична носивост пресека са отвором или неиспуњеним рупама

$N_{c,Rd} = A_{eff} \frac{f_o}{\gamma_{M1}}$ носивост попречног пресека на притисак

где је:

A_{net} нето површина попречног пресека са редукијом на месту рупа и редукијом у ЗУТ-у ако је то потребно,

A_{eff} површина ефективног попречног пресека заонована на редукији дебљине пресека услед избочавања и утицаја ЗУТ-а када они постоје (то јест код заварених пресека).

3.5.3. Савијање

Код елемената оптерећених на савијање, односно носача, неопходно је да у сваком попречном пресеку буде задовољен следећи услов:

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

где је:

M_{Ed} прорачунска вредност момента савијања,

M_{Rd} прорачунска вредност момента носивости.

Носивост попречних пресека код носача зависи од класе пресека. Прорачунска вредност момента носивости M_{Rd} може да се одреди као мања од следеће две вредности:

$M_{u,Rd} = W_{net} \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$ момент носивости нето пресека на месту слабљења рупама за спојна средства

$M_{c,Rd} = \alpha W_{el} \frac{f_o}{\gamma_{M1}}$ момент носивости попречног пресека, без слабљења

где је:

α коефицијент облика пресека (табела 7),

Табела 7. Коефицијенти облика пресека α

Класа пресека	α (без шавова)	α (са подужним шавовима)
1	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl,haz} / W_{el}$
2	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl,haz} / W_{el}$
3	1	$W_{el,haz} / W_{el}$
4	W_{eff} / W_{el}	$W_{eff,haz} / W_{el}$

W_{pl} пластичан отпорни момент бруто попречног пресека,
 W_{eff} еластичан отпорни момент ефективног пресека, добијен коришћењем редуковане дебљине t_{eff} за пресеке класе 4,
 $W_{el,haz}$ ефективни еластичан отпорни момент бруто пресека, добијен коришћењем редуковане дебљине попречног пресека $\rho_{o,haz} t$ за материјал у ЗУТ-у,
 $W_{pl,haz}$ ефективни пластични отпорни момент бруто попречног пресека, добијен коришћењем редуковане дебљине попречног пресека $\rho_{o,haz} t$ за материјал у ЗУТ-у,
 $W_{eff,haz}$ ефективни еластичан отпорни момент, добијен коришћењем редуковане дебљине попречног пресека $\rho_c t$ за попречне пресеке класе 4, или редуковане дебљине $\rho_{o,haz} t$ за материјал у зони утицаја топлоте (узима се мања од ове две вредности).

W_{el} еластични отпорни момент бруто попречног пресека,

W_{net} еластични отпорни момент нето попречног пресека.

Услед дејства момента савијања код носача који нису бочно придржани може да дође до бочно-торзионог извијања, па је потребно је проверити и ово гранично стање. У Еврокоду 9 су дата детаљна правила за прорачун носивости елемената на бочно-торзионо извијање. У Анексу I EN1999-1-1 је дат поступак за прорачун критичног момента бочно-торзионог извијања.

3.5.4. Смицање

Код елемената оптерећених на смицање потребно је задовољити следећи услов:

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

где је:

V_{Ed} прорачунска вредност силе смицања,

V_{Rd} прорачунска носивост пресека на смицање.

Прорачунска пластична носивост попречног пресека на смицање V_{Rd} може да се одреди на основу следећег израза:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_o}{\gamma_{M1} \sqrt{3}}$$

где је A_v површина смицања која зависи од облика попречног пресека.

3.5.5. Носивост притиснутих елемената на извијање

Поред носивости попречног пресека код притиснутих елемената је неопходна и контрола носивости елемента на извијање:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

где је $N_{b,Rd}$ прорачунска носивост елемената на извијање која треба да се одреди на основу следећег израза:

$$N_{b,Rd} = \kappa \chi A_{eff} \frac{f_o}{\gamma_{M1}}$$

где је:

χ коефицијент редукције за разматрани вид извијања,

κ фактор којим се узима у обзир слабљење услед заваривања, који је једнак јединици за пресеке који нису формиран заваривањем,

A_{eff} површина ефективног пресека (код пресека класе 1, 2 и 3 $A_{eff} = A$).

Коефицијент редукције за разматрани вид извијања χ се одређује на следећи начин:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} < 1,0$$

$$\phi = 0,5 \left(1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_o}{N_{cr}}}$$

где је:

α коефицијент имперфекције који зависи од криве извијања (слика 14),

$\bar{\lambda}$ релативна виткост на извијање,

$\bar{\lambda}_0$ граница хоризонталног платоа криве извијања,

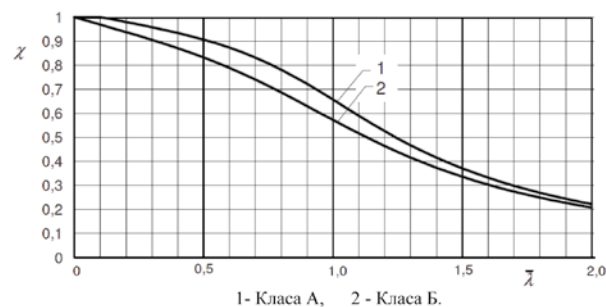
N_{cr} еластична критична сила за релевантни вид извијања (флексионо, торзионо или торзионо-флексионо).

Као последица чињенице да алуминијумске легуре представљају групу материјала чије су механичке карактеристике врло разноврсне, а могућност обликовања попречних пресека екструзацијом врло велика, увођење кривих извијања на начин који је усвојен код челичних елемената би дао веома велики број кривих извијања. Код челичних конструкција су заостали напони који се јављају услед процеса производње елемената значајни, док су код алуминијумских екструдираних профила много мањи, па утицај облика попречног пресека на извијање може да се занемари. Због тога Еврокод 9 предвиђа само две криве извијања: за класу А и класу Б (видети слику 14 и табелу 8).

Коефицијент имперфекције α и граница $\bar{\lambda}_0$ се разликују за флексионо, односно торзионо и торзионо-флексионо извијање. Вредности ових параметара за случај флексионог извијања дате су у табели 8.

Табела 8. Коефицијент имперфекције α и граница $\bar{\lambda}_0$ за флексионо извијање

Класа избочавања материјала према табели 3.2 из EN 1999-1-1	α	λ_0
Класа материјала А	0,20	0,10
Класа материјала Б	0,32	0,00



Слика 14. Криве извијања за елементе алуминијумских конструкција

4. ПРИМЕР

У овом примеру приказан је прорачун носивости завареног I-пресека на затезање, притисак, савијање и смицање. Димензије попречног пресека су прика-

зане на слици 15, где су дата и својства материјала за усвојену легуру алуминијума 6082-T6/T651.



Слика 15. Карактеристике попречног пресека и својства материјала

Коефицијенти виткости за чист притисак:

За ножицу:

$$\beta_f = \frac{47,5}{10} = 4,75 < \beta_3^f \rightarrow \text{Класа 3}$$

За ребро:

$$\beta_w = \frac{320}{5} = 64 > \beta_3^w \rightarrow \text{Класа 4}$$

Када је оптерећен на чист притисак пресек је **класе 4**.

Коефицијенти виткости за чисто савијање:

За ножицу:

$$\beta_f = \frac{47,5}{10} = 4,75 < \beta_3^f \rightarrow \text{Класа 3}$$

За ребро:

$$\beta_w = 0,4 \frac{320}{5} = 25,6 > \beta_3^w \rightarrow \text{Класа 4}$$

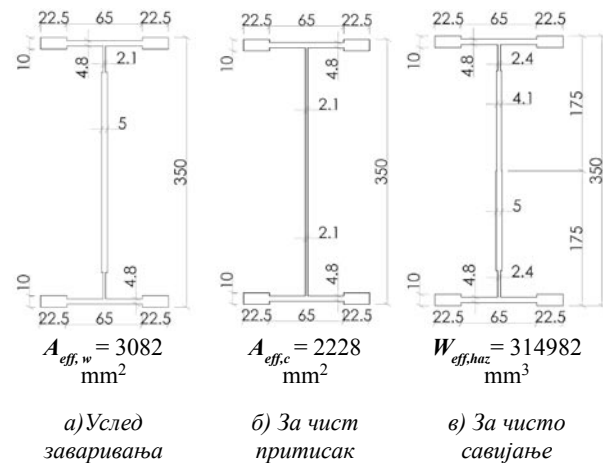
Када је оптерећен на чисто савијање пресек је **класе 4**.

Коефицијенти редуције за класу 4 су $\rho_0^w = 0,42$ за чист притисак, односно $\rho_0^w = 0,82$ за чисто савијање. Како су ножице носача заварене МИГ поступком заваривања потребно је узети у обзир и утицај топлоте који се простире на одстојању од 30 mm од шаву у ножици, и 20 mm од шаву у ребру. Коефицијент редуције у ЗУТ-у је $\rho_{o,haz} = 0,48$. Редукаване дебелине ребра и ножице пресека се одређују као мање вредности од коефицијента редуције услед избочавања и редуције у ЗУТ-у. На слици 16 су приказани ефективни попречни пресеци за затезање (а), притисак (б), и савијање (в).

Ефективне дебелине делова пресека су:

ребро - чист притисак: $t_{w,eff,c} = 0,42 \times 5 = 2,1 \text{ mm}$
 ребро - чисто савијање: $t_{w,eff,b} = 0,82 \times 5 = 4,1 \text{ mm}$

ребро у ЗУТ-у: $t_{w,haz} = 0,48 \times 5 = 2,4 \text{ mm}$
 $(b_{w,haz} = 20 \text{ mm})$
 ножица у ЗУТ-у: $t_{f,haz} = 0,48 \times 10 = 4,8 \text{ mm}$
 $(b_{w,haz} = 30 \text{ mm})$



Слика 16. Ефективни попречни пресеци

Носивост пресека на затезање

$$N_{o,Rd} = A_g \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 3850 \times \frac{260}{1,1} = 910 \text{ kN}$$

$$N_{o,Rd} = A_{eff,w} \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 3082 \times \frac{310}{1,25} = 764,4 \text{ kN}$$

$$N_{o,Rd} = 764,4 \text{ kN}$$

Носивост пресека на притисак

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 2228 \times \frac{260}{1,1} = 526,60 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = 526,60 \text{ kN}$$

Носивост пресека на савијање

$$\alpha = \frac{W_{eff,haz}}{W_{el}} = \frac{314982}{448983} = 0,702$$

$$M_{c,Rd} = \alpha W_{el} \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 0,702 \times 448983 \times \frac{260}{1,1} = 74,45 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Rd} = 74,45 \text{ kNm}$$

Носивост пресека на смицање

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_o}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} = 1544,92 \times \frac{260}{1,1 \sqrt{3}} = 210,83 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = 210,83 \text{ kN}$$

5. ЗАКЉУЧАК

Појава комплетних и кохерентних прописа за прорачун конструкција од алуминијумских легура какав је Еврокод 9, даје много више могућности и

слободе пројектантима металних конструкција, што индиректно може довести до веће примене алуминијумских конструкција. Ипак, главне препреке за већу употребу алуминијума као конструктивног материјала у грађевинарству остају његова висока цена и недовољно искуство у пројектовању и извођењу конструкција овог типа. Међутим, без обзира на несумњиво велике почетне трошкове алуминијумске конструкције, због незнатних трошкова одржавања и мање тежине у односу на челичну конструкције, у одређеним околностима избор алуминијума као основног материјала за конструкцију може бити рационалан. Скорашња примена Еврокода 9 и у нашој земљи донеће многе бенефите у инжењерској пракси, јер ће коначно бити попуњена празнина у прописима који се баве овом проблематиком, али ће бити и отворена врата за знатно већу примену Ал-легура како у земљи тако и на иностраном тржишту. Што се самог прорачуна тиче он се у великој мери ослања на принципе прорачуна челичних конструкција, али узимајући у обзир све специфичности алуминијумских легура које су презентоване у овом раду.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] EUROCODE 9: EN 1999-1-1: Design of aluminium structures, Part 1-1: General structural rules, European Committee for Standardization, 2007.
- [2] Металне конструкције - Основе прорачуна и конструисања, Драган Буђевац, Златко Марковић, Драгана Чукић, Драгослав Тошић, Београд, 2007.
- [3] Aluminium structures, A Guide to Their Specifications and Design, J. Randolph Kissell, Robert L. Ferry, Second Edition, Canada, 2002.
- [4] Aluminium Design and Construction, John Dwight, New York, 2002.
- [5] Handbook of Aluminum - Volume 7, George E. Totten, D. Scott MacKenzie, Physical Metallurgy and Processes, New York, 2003.
- [6] LIGHTWEIGHT STEEL AND ALUMINIUM STRUCTURES, P. Makelainen, R. Hassinen, Fourth International Conference on Steel and Aluminium Structures, Espoo, Finland, 1999.
- [7] Design of Aluminium Structures: Selection of Structural Alloys, R. Gitter, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., Düsseldorf, Germany, February 2008.
- [8] Aluminum Design Manual 2005, The Aluminum Association, Inc., Washington, DC, 2005.
- [9] Strength and stability of aluminium members according to EN 1999-1-1–Eurocode 9, Torsten Höglund, Royal Institute of Technology, European Aluminium Association, Stockholm, 2008.
- [10] Aluminium Alloy Structures, Federico M. Mazzolani, Institute of Construction Technology University of Naples, Italy, 1985.
- [11] DESIGN CRITERIA FOR ALUMINIUM ALLOY STRUCTURES, Federico M. Mazzolani, Department of Structural Analysis and Design, Faculty of Engineering University of Naples University „Federico II“, 2008.
- [12] Understanding aluminium as a material, Sigurd Støren, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, and by Skanaluminium, Oslo, 2008.