

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Švent, N., 2016. Nosilni elementi iz aluminija. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Može, P.): 44 str.

Datum arhiviranja: 19-08-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Švent, N., 2016. Nosilni elementi iz aluminija. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Može, P.): 44 pp.

Archiving Date: 19-08-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

NEJC ŠVENT

NOSILNI ELEMENTI IZ ALUMINIJA

Diplomska naloga št.: 247/B-GR

ALUMINIUM STRUCTURAL ELEMENTS

Graduation thesis No.: 247/B-GR

Mentor:

doc. dr. Primož Može

Ljubljana, 16. 08. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVE

Spodaj podpisani študent Nejc Švent, vpisna številka 26110278, avtor pisnega zaključnega dela z naslovom Nosilni elementi iz aluminija,

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*
 - a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
 - b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno in prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: Ljubljana
Datum: 6. avgust 2016

Podpis študenta:

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 624.014.2(497.4)(043.2)
- Avtor:** Nejc Švent
- Mentor:** doc. dr. Primož Može
- Naslov:** Nosilni elementi iz aluminija
- Tip dokumenta:** Diplomaska naloga
- Obseg in oprema:** 44 str., 12 pregl., 15 sl.
- Ključne besede:** nosilnost aluminijastih konstrukcij, aluminijasti elementi, aluminijaste konstrukcije, evrokod 9

Izveček:

Diplomska naloga obravnava kontrolo nosilnosti aluminijastih elementov po standardu SIST EN 1999-1-1 (Evrokod 9). V uvodu je predstavljena kratka zgodovina uporabe aluminija v konstrukcijske namene, postopki pridobivanja aluminija in metode nadaljnje izdelave in obdelave aluminijastih izdelkov za uporabo v konstrukcijah. V osrednjem delu so predstavljene glavne kontrole nosilnosti po veljavnem standardu Evrokod 9 z izpostavljenimi razlikami v primerjavi z jeklenimi konstrukcijami. Vključeni so značilni računski primeri kontrole nosilnosti elementov, obremenjenih natezno, tlačno, upogibno in s kombinacijo tlaka in upogiba.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.014.2(497.4)(043.2)
Author: Nejc Švent
Mentor: doc. dr. Primož Može
Title: Aluminium structural elements
Document type: Graduation thesis
Scope and tools: 44 p., 12 tab., 15 fig.
Keywords: aluminium design, aluminium structures, aluminium members, eurocode 9

Abstract:

This thesis focuses on the structural analysis of aluminium structural members in accordance with the SIST EN 1999-1-1 standard. In the introduction, historical development of aluminium is summarized, as well as the processes of structural aluminium production and manufacture. Predominantly, resistance control checks of aluminium structural members are covered, with special attention to the major contrasts between aluminium and steel structural analyses. Finally, fundamental examples of resistance control are given for aluminium members loaded axially, in bending, and in a combination of compression force and bending moment.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Iskrena hvala mentorju doc. dr. Primožu Možetu za korektno sodelovanje in konkretne nasvete pri izdelavi diplomske naloge.

Posebej hvala tudi mojim najbližjim za neprecenljivo podporo in spodbudo na vsakem koraku.

Brez očeta in mame najbrž še pisati ne bi znal. Hvala vama za najtoplejšo družino in za vse, kar sta me naučila.

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	ZGODOVINA	1
1.2	MATERIAL	2
1.2.1	<i>Glavne prednosti aluminija</i>	3
1.3	PRIDOBIVANJE IN PROIZVODNJA ALUMINIJA	4
2	KONSTRUKCIJE IZ ALUMINIJA PO SIST EN 1999-1-1	5
2.1	ZLITINE	5
2.2	IZDELAVA IN OBDELAVA ALUMINIJASTIH ELEMENTOV	7
2.3	KOMPAKTNOST PREČNEGA PREREZA	7
2.3.1	<i>Vitke pločevine – določitev sodelujoče debeline</i>	11
2.4	OSLABITVE V OBMOČJU TOPLOTNO-VPLIVNE CONE (TVC)	12
2.4.1	<i>Obseg toplotno-vplivne cone</i>	12
2.4.2	<i>Stopnja oslabitve v toplotno-vplivni coni</i>	13
2.5	ELEMENTI V NATEGU	13
2.6	TLAČENI ELEMENTI	14
2.6.1	<i>Lokalno izbočenje pločevin</i>	14
2.6.2	<i>Tlačna porušitev prereza</i>	15
2.6.3	<i>Uklon tlačnega elementa</i>	15
2.6.3.1	Upogibni uklon tlačnega elementa	15
2.6.3.2	Torzijski in upogibno-torzijski uklon	18
2.7	UPOGIBNI ELEMENTI	19
2.7.1	<i>Elementi, obremenjeni s čistim upogibom</i>	19
2.7.1.1	Strig	20
2.7.1.2	Vpliv interakcije upogib – strig	22
2.7.1.3	Vnos koncentrirane sile	23
2.7.1.4	Bočna zvrnitev upogibnega nosilca	24
2.7.2	<i>Elementi, obremenjeni z upogibom in osno silo</i>	28
3	PRIMERI KONTROLE NOSILNOSTI ELEMENTOV	30
3.1	NATEZNO OBREMENJEN ELEMENT	30
3.2	TLAČNO OBREMENJEN ELEMENT	31
3.2.1	<i>Varianta z ekstrudiranim nosilcem</i>	31
3.2.2	<i>Varianta z vzdolžnimi zvari</i>	33
3.2.3	<i>Varianta s prečnim zvarom na sredini razpona</i>	35
3.3	UPOGIBNO OBREMENJEN ELEMENT	36
3.4	UPOGIBNO IN TLAČNO OBREMENJEN ELEMENT	38
4	ZAKLJUČEK	42
	VIRI	43

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Časovni potek razvoja aluminija (povzeto po Müller, 2011: str. 7).....	2
Preglednica 2: Vpliv legirnih elementov na lastnosti zlitin (Paškulin, 2012: str. 14).....	5
Preglednica 3: Razvrstitev zlitin v glavne skupine s pregledom prednosti in pomanjkljivosti (podatki povzeti po Paškulin, 2012).....	6
Preglednica 4: Izračun parametra vitkosti za posamezne variante neojačanih delov prečnega prereza (po SIST EN 1999-1-1, 6.1.4.3).....	8
Preglednica 5: Vrednosti parametrov vitkosti po standardu EN 1999-1-1.	10
Preglednica 6: Vrednosti konstant C_1 in C_2 za izračun faktorja lokalnega izbočenja po SIST EN 1999-1-1.....	11
Preglednica 7: Razdalja b_{haz} od zvara do roba TVC.	13
Preglednica 8: Določitev faktorja uklonske dolžine k (SIST EN 1999-1-1:2007, 6.8).	16
Preglednica 9: Določitev faktorja oblike α (SIST EN 1999-1-1:2007).	20
Preglednica 10: Vrednosti faktorjev pri bočni zvrnitvi (SIST EN 1999-1-1).....	27
Preglednica 11: Vrednosti koeficientov X in Y za določitev parametra relativne vitkosti za bočno zvrnitev (Vir: SIST EN 1999-1-1, Dodatek I.2).....	27
Preglednica 12: Primerjava rezultatov kontrole nosilnosti.	31

KAZALO SLIK

Slika 1: Postopek toplotne obdelave zlitin (Paškulin, 2012: str. 19)	7
Slika 2: Značilni deli prečnih prerezov.	8
Slika 3: Potek gradienta napetosti, definicija faktorja Ψ .	9
Slika 4: Diagrami odvisnosti srednje napetosti in deformacije pri različnih vrednostih parametra vitkosti (Höglund, 2009: str. 23).	10
Slika 5: Vpliv toplote na trdnost materiala v okolici zvarov.	12
Slika 6: Diagrami za grafično določitev redukcijskega faktorja na podlagi relativne vitkosti za posamezni uklonski razred materiala (Vir: SIST EN 1999-1-1, slika 6.11, str. 73).	17
Slika 7: Določitev faktorja χ za torzijski in upogibno-torzijski uklon. (SIST EN 1999-1-1, Slika 6.12)	19
Slika 8: Določitev faktorja ρ_V strižne izbočitve (SIST EN 1999-1-1).	22
Slika 9: Fenomen bočne zvrnitve (Höglund, 2009: str. 41).	24
Slika 10: Krivulje za grafično določitev redukcijskega faktorja (SIST EN 1999-1-1:2007).	27
Slika 11: Tlačno obremenjen nosilec.	31
Slika 12: Obseg TVC v obravnavanem prerezu.	34
Slika 13: Tlačno obremenjen nosilec s prečnim zvarom na sredini razpona.	35
Slika 14: Upogibni nosilec, obremenjen s porazdeljeno prečno obtežbo q .	36
Slika 15: Nosilec, obremenjen s kombinacijo tlaka in upogiba.	38

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Aluminij kot konstrukcijski material poznamo že vsaj od začetka 20. stoletja. Kljub temu bi lahko rekli, da njegov čas pomembnejše uporabe v gradbeništvu šele prihaja. Zaradi nizke lastne teže, ki znaša zgolj tretjino teže jekla, je postal nepogrešljiv pri proizvodnji vseh vrst transportnih sredstev. V nosilnih gradbenih konstrukcijah pa je uporaba aluminija še vedno navidez omejena na postranske vloge, saj ga večinoma uporabljamo za začasne in montažne konstrukcije, podkonstrukcije, stavbno pohištvo in fasadne elemente. Razlog za to gre iskati v boljši cenovni dostopnosti jekla, čeprav cene obeh materialov na svetovnih borzah kažejo večletni padajoči trend. Do uvedbe standarda SIST EN 1999-1-1 je bil pomemben dejavnik, ki je oviral širšo uporabo aluminija v konstrukcijske namene, tudi negotovost pri načrtovanju zaradi pomanjkanja izkušenj in znanja, zbranega v obliki standardov, pravilnikov in smernic.

Na morebitno povečanje uporabe aluminija v gradbenih konstrukcijah prihodnosti bi lahko pozitivno vplivalo dejstvo, da je material zaradi možnosti učinkovitega recikliranja in ponovne uporabe zelo okolju prijazen. Upoštevajoč številne ugodne mehanske in fizikalne lastnosti, kot so odpornost proti koroziji, enostavnost obdelave in nizka lastna teža, lahko aluminij uvrstimo med pomembne gradbene materiale 21. stoletja.

V pričujoči diplomski nalogi so opisane bistvene značilnosti aluminija in posebnosti v kontrolah nosilnosti po Evrokodu 9 (SIST EN 1999-1-1), predvsem v primerjavi z jeklenimi elementi. Na primerih v tretjem poglavju je prikazana kontrola nosilnosti elementov obremenjenih natezno, tlačno, upogibno in s kombinacijo tlaka in upogiba.

1.1 Zgodovina

Čeprav je aluminij eden izmed najbolj zastopanih kemijskih elementov v Zemljini skorji, in najbolj zastopan kovinski element, je bil odkrit razmeroma pozno. To lahko pripišemo temu, da se v naravi ne nahaja v čisti obliki.

Kot kemijski element je v začetku 19. stoletja aluminij prvič omenil Sir Humphrey Davy. Leta 1821 je Pierre Berthier odkril boksitno rudo. Štiri leta kasneje ga je Hans Christian Ørsted prvič uspešno izoliral. Od laboratorijskih poskusov do širše industrijske proizvodnje aluminija je minilo še nekaj desetletij. V letu 1886 sta Charles Martin Hall in Paul Héroult istočasno odkrila učinkovitejši postopek pridobivanja čistega aluminija iz aluminijevega oksida (glinice) z elektrolizo, še danes uporabljan in poznan kot Hall-Héroultov proces. Širša proizvodnja

aluminija se je začela leta 1888, ko je bil razvit tudi Bayerjev postopek pridobivanja glinice iz boksitne rude, ki ga uporabljamo še danes. (Müller, 2011)

Prvotno je aluminij veljal za prestižen material. Uporabljal se je za proizvodnjo nakita, umetnin in pribora. Leta 1865 je Jules Verne v svojem romanu Potovanje na Luno opisal raketo iz aluminija. Nedolgo zatem se je tudi v resnici začela doba uporabe aluminija v gradnji transportnih sredstev. Leta 1891 je bil v Švici zgrajen potniški čoln Le Migron, delno izdelan iz aluminija po naročilu Alfreda Nobela. Aluminij so kmalu začeli široko uporabljati tudi v železniški, avtomobilski in letalski industriji. V gradbeništvu se je začel širše uporabljati šele v tridesetih letih 20. stoletja. Znan primer prve vidnejše uporabe aluminija v gradbene namene je fasada newyorške stolpnice Empire State Building. (UC RUSAL, 2016)

Vse to je omogočilo razvoj aluminijevih zlitin in s tem rast proizvodnje aluminija, ki se po podatkih International Aluminium Institute (2016) nadaljuje še danes. V Preglednici 1 je pregledno prikazan časovni potek razvoja proizvodnje aluminija.

Preglednica 1: Časovni potek razvoja aluminija (povzeto po Müller, 2011: str. 7)

1807	prva omemba aluminija, Sir Humphrey Davy
1821	odkritje boksita, Pierre Berthier
1825	prva uspešna proizvodnja aluminija, H.C. Ørsted
1886	elektrolitični postopek Hall-Héroult
1888	začetek industrijske proizvodnje aluminija v Franciji, Švici in ZDA
1889	razvit Bayerjev postopek
1939	razvite vse današnje zlitine, razen varilnega aluminija 7xxx

1.2 Material

Večino aluminija je v naravi vezanega v obliki rude boksit, ki je tudi glavni vir za njegovo proizvodnjo. Največje rezerve boksita se nahajajo na ozemljih Gvineje, Avstralije in Brazilije (Bray, 2016).

Čisti aluminij je mehka kovina z natezno trdnostjo v območju 90-140 N/mm², zato je v takšni obliki primeren samo za proizvodnjo preprostih izdelkov kot so npr. folije za uporabo v gospodinjstvu (Müller, 2011). Za uporabo v nosilnih konstrukcijah pa postane uporaben v obliki zlitin, s katerimi se mu natezna trdnost lahko poveča na raven mehkega konstrukcijskega jekla. Tako lahko s pridom izkoristimo njegove pozitivne lastnosti, ki ga uvrščajo med obetavne materiale s širokim spektrom uporabnosti.

1.2.1. Glavne prednosti aluminija

Za uporabo v gradbeništvu je najbolj pomembna prednost aluminija predvsem njegova nizka teža, ki omogoča njegovo uporabo v strešnih in fasadnih konstrukcijah, mostovih, podkonstrukcijah in konstrukcijskih nadgradnjah obstoječih objektov. Nizka lastna teža aluminija je tudi razlog za njegovo priljubljenost v letalski, avtomobilski in železniški industriji.

Odpornost proti koroziji je zagotovljena z naravnim odzivom aluminija ob stiku z zrakom. Material na svoji površini namreč tvori zaščitni sloj, ki preprečuje nadaljnjo korozijo. Ob dodatnih ukrepih protikorozijske zaščite je tako lahko uporaben tudi v najbolj agresivnih okoljih.

Aluminij je relativno lahko obdelovati s postopki ekstruzije, hladnega valjanja in ukrivljanja. Posledično material dopušča veliko svobode pri načrtovanju zaradi praktično neomejenih možnosti oblikovanja prečnega prereza.

V primerjavi z jeklom se aluminij obnaša bolje tudi pri uporabi v okoljih z nizko temperaturo. Pri temperaturah pod ničlo se njegove lastnosti skoraj ne spremenijo, lahko pa se še celo povišajo, odvisno od zlitine (Müller, 2011).

Aluminij je možno reciklirati praktično brez izgub kvalitete. Za recikliranje aluminija se po taljenju in čiščenju uporabijo enaki proizvodni procesi kot pri primarni proizvodnji. Ob ponovni uporabi aluminija porabimo samo 5% energije, potrebne za proizvodnjo novega aluminija, prihranimo pa tudi veliko boksitne rude in ostalih kemikalij (Müller, 2011). Po ugotovitvah Boin (2004) je ob odstranitvi gradbenih objektov zbranega več kot 90% vgrajenega aluminija, zato je potencial za recikliranje velik. Te okolju prijazne lastnosti so pomemben faktor pri razvoju aluminija kot konstrukcijskega materiala prihodnosti, ko bo naraščala potreba po trajnostni gradnji in zmanjševanju okoljskega odtisa gradbenih objektov.

Poleg številnih prednosti pa je potrebno pri izbiri materiala posvetiti pozornost tudi številnim pomanjkljivostim aluminija. Čeprav dosega zadovoljive natezne trdnosti, je njegova glavna slabost v primerjavi z jeklom nižji modul elastičnosti. Zaradi občutno nižjega tališča so aluminijaste konstrukcije tudi manj požarno odporne. Visoka toplotna prevodnost lahko predstavlja težavo npr. pri izpolnjevanju energetskih zahtev za objekte. Poleg tega je sprememba fizikalnih in mehanskih lastnosti pri visokih temperaturah tudi razlog za precejšnje oslavitve v toplotno vplivni coni varjenih nosilnih elementov. Upoštevati je potrebno tudi utrujanje materiala. Ob pravilni izbiri materiala, premišljenem načrtovanju konstrukcij in dimenzioniranju detajlov je mogoče navedene pomanjkljivosti uspešno zaobiti

in izkoristiti prednosti aluminija. Vsi postopki načrtovanja aluminijastih konstrukcij so opisani v standardu SIST EN 1999-1-1 in povzeti v poglavju 2 tega diplomskega dela.

1.3 Pridobivanje in proizvodnja aluminija

Pridobivanje aluminija se začne z izkopavanjem boksitne rude. Z drobljenjem in izsuševanjem se rudo pripravi na pridobivanje glinice. Glinica (angl. *alumina*) je slovensko poimenovanje za aluminijev oksid Al_2O_3 , ki ga iz boksitne rude pridobivamo z uporabo Bayerjevega postopka. Rudo najprej meljemo in jo nato pri temperaturah okoli $200^{\circ}C$ raztopimo z natrijevim hidroksidom. Neraztopljeni ostanek boksita se izloči v obliki rdečega blata. Raztopljeni boksit se v rotacijski peči segreva pri približno $1000^{\circ}C$, da se izloči vodna para. Beli prah, ki ostane, je čisti aluminijev (III) oksid oziroma glinica. Sledi Hall-Heroultov postopek elektrolize glinice, ki jo raztopimo v staljenem kriolitu. Skozi glinico preko anode steče močan električni tok pri nizki napetosti. Zaradi električnega toka se kisik loči od aluminija in izhlapi, medtem ko se tekoči aluminij usede na dno, ki deluje kot katoda, in je izsesan iz rezervoarja. Sledi vlivanje v ingote ali v aluminijaste polizdelke. (UC RUSAL, 2016)

Za izdelavo 1 kg aluminija potrebujemo približno 4 kg boksita, 2 kg glinice, 0,5 kg ogljika in 15 kWh električne energije (Müller, 2011: str. 9). Največje proizvajalke boksita se nahajajo v tropskem pasu. V letu 2015 je tretjino svetovne proizvodnje boksita zastopala Avstralija. Največje zaloge boksita se nahajajo v Gvineji, Avstraliji in Braziliji. Največja proizvajalka glinice pa je danes Kitajska s skoraj polovico svetovne proizvodnje (U.S. Geological Survey, 2016: str. 33).

2 KONSTRUKCIJE IZ ALUMINIJA PO SIST EN 1999-1-1

2.1 Zlitine

Ker je aluminij v svoji čisti obliki mehak material, kot tak ni primeren za uporabo v nosilnih konstrukcijah. Z namenom izboljšanja mehanskih lastnosti se mu dodajajo t.i. legirni elementi. Z uporabo različnih kombinacij legirnih elementov dobimo zlitine, ki jih v grobem delimo na gnetne in livne.

Gnetne aluminijeve zlitine so namenjene nadaljnji predelavi v končne produkte z uporabo ekstrudiranja, valjanja, kovanja in vlečenja. Livne zlitine uporabljamo za vlivanje končnih izdelkov. Zaradi boljših mehanskih lastnosti prevladuje uporaba gnetnih zlitin. Livne zlitine v Evrokodu 9 niso zajete.

Legirni elementi, ki jih dodajamo aluminiju, so npr. mangan, silicij, cink, magnezij, baker. Obstaja še veliko ostalih legirnih elementov, ki se uporabljajo za specifične namene. Prednosti in slabosti pogostih legirnih elementov so prikazane v Preglednici 2.

Preglednica 2: Vpliv legirnih elementov na lastnosti zlitin (Paškulin, 2012: str. 14)

element	povečuje	znižuje
mangan	žilavost	/
magnezij	korozijska odpornost, varljivost, trdnost	/
magnezij + silicij	trdnost preoblikovalnost, korozijska odpornost	/
silicij	odpornost proti obrabi	tališče, korozijsko odpornost, viskoznost
baker	trdnost, obdelovalnost	korozijska odpornost, varljivost
cink	trdnost	močno zniža kor. odpornost
svinec	preoblikovalnost	/

Tako gnetne kot livne zlitine v odvisnosti od glavnih uporabljenih legirnih elementov razvrščamo v osem skupin, označenih s številčnimi oznakami od 1xxx do 8xxx. V Preglednici 3 je prikazana razvrstitev zlitin. S simboli (“+” in “-“) je označeno, katere dobre lastnosti oz. pomanjkljivosti se pojavijo pri določeni skupini zlitin

Preglednica 3: Razvrstitev zlitin v glavne skupine s pregledom prednosti in pomanjkljivosti (podatki povzeti po Paškulin, 2012).

oznaka zlitine	glavni legirni el.	glavne karakteristike			
		T	V	K	P
1XXX	Al (99%)	-	+++	+++	+++
2XXX	Al, Cu	+	-	-	-
3XXX	Al, Mn		+	+	+
4XXX	Al, Si		+	+	+
5XXX	Al, Mg	++	++	+++	+
6XXX	Al, Mg, Si	+/++	-	+	+
7XXX	Al, Zn	++	-	-	
8XXX	Al, Li				+++

T - trdnostne karakteristike, V - varivost, K - korozijska odpornost, P - preoblikovalne lastnosti

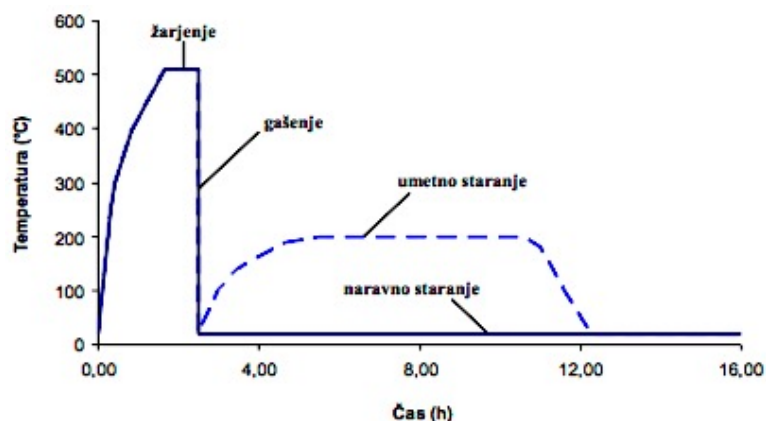
-	= pomanjkljivost
+	= prednost

Od izbire zlitine je odvisno, s kakšnimi nadaljnjimi postopki lahko material utrjujemo oz. obdelujemo. Te postopke v splošnem delimo na hladne in tople.

Hladni postopki utrjevanja vključujejo mehanske postopke: valjanje, ukrivljanje, stiskanje in vlečenje. Zlitine v skupinah 1xxx, 3xxx, in 5xxx so primerne le za hladno obdelavo. Stanje zlitine označujemo z naslednjimi oznakami:

- F – osnovno, neobdelano stanje zlitine;
- O – zlitina, mehčana z žarjenjem;
- H – zlitine, ki so bile mehansko obdelane.

Za razliko od omenjenih zlitin pa je zlitine skupin 2xxx, 4xxx, 6xxx in 7xxx mogoče toplotno obdelati. Zlitino z žarjenjem najprej segrejemo do temperature 500°C. Staljeno zlitino potopimo v hladilno tekočino, kjer se hitro ohladi do sobne temperature. Sledi staranje, s katerim dosežemo končno stanje zlitine. Poznamo naravno in umetno staranje. Naravno staranje poteka na zraku pri sobni temperaturi, umetno pa v posebni peči za staranje, kjer zlitino počasi ponovno segrejemo in ohladimo. Časovni potek takšne obdelave je prikazan na Sliki 1 (Paškulin, 2012).



Slika 1: Postopek toplotne obdelave zlitin (Paškulin, 2012: str. 19)

2.2 Izdelava in obdelava aluminijastih elementov

Iz aluminijevih zlitin s postopki ekstrudiranja, valjanja, vlivanja in kovanja izdelujemo polizdelke v obliki pločevin v kolutih in ploščah, ekstrudiranih elementov ali cevi. Za konstrukcijske namene najpogosteje uporabljamo predvsem ekstrudiranje in valjanje. Pri ekstrudiranju zlitino, ogreto na 500°C, potisnemo skozi matrico pod pritiskom 500-700 MPa (Müller, 2011).

Za nadaljnjo obdelavo polizdelkov se uporabljajo enaki postopki kot za jeklene konstrukcije: ukrivljanje, vrtanje, rezanje, rezkanje, prebijanje in varjenje. Obdelava aluminija je precej enostavnejša.

2.3 Kompaktnost prečnega prereza

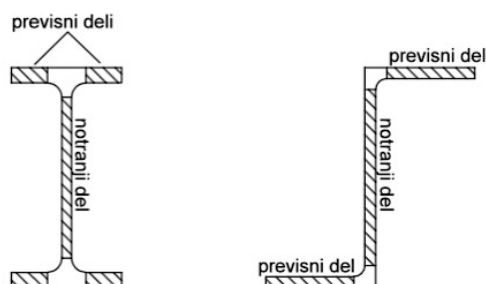
Konstrukcijski elementi iz aluminija so v večini primerov sestavljeni iz večjih pločevinastih delov. Značilnost tankih pločevin je, da se pod vplivom tlačnih napetosti lokalno izbočijo. Lokalno izbočenje vpliva na odpornost delov prečnih prerezov v tlaku.

Po standardu SIST EN 1999-1-1 se lokalno izbočenje, podobno kot pri jeklenih konstrukcijah, upošteva s pomočjo razvrščanja prečnih prerezov v razrede kompaktnosti.

Posameznemu tlačnemu delu prečnega prereza moramo za razvrstitev v razred kompaktnosti najprej določiti tip. Poznamo tri tipe delov prečnih prerezov (gl. Slika 2):

- ravni previsni deli,
- ravni notranji deli,

- ukrivljeni notranji deli.



Slika 2: Značilni deli prečnih prerezov.

Najprej moramo določiti parameter vitkosti β . V grobem je pri neojačanih pločevinah definiran kot razmerje med širino pločevine b in njeno debelino t . Določitev parametra β je podrobneje opredeljena v Preglednici 4.

Preglednica 4: Izračun parametra vitkosti za posamezne variante neojačanih delov prečnega prereza (po SIST EN 1999-1-1, 6.1.4.3)

notranji tlačeni deli brez gradienta napetosti	$\beta = b/t$
previsni tlačeni deli brez gradienta napetosti	
previsni deli z gradientom napetosti, kjer je maksimum tlačnih napetosti na podprtem robu pločevine	
notranji deli z gradientom napetosti, nevtralna os v središču	$\beta = 0,4 \times b/t$
notranji deli z gradientom napetosti	$\beta = \eta \times b/t$, za vrednosti η glej
previsni deli z maksimalno tlačno napetostjo na nepodprtem robu	

V Preglednici 4 je (SIST EN 1999-1-1, 6.1.4.3)

β – parameter vitkosti

b – širina dela prečnega prereza

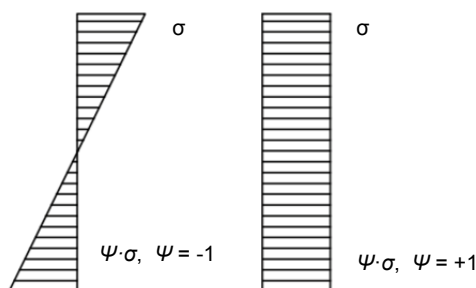
t – debelina dela prečnega prereza

η – faktor razporeditve (gradienta) napetosti, definiran kot:

$$\eta = 0,7 + 0,3 \times \psi \quad \text{za } -1 \leq \psi \leq 1$$

$$\eta = 0,8 / (1 - \psi) \quad \text{za } \psi < -1$$

kjer je ψ razmerje med napetostmi na robovih (Slika 3)



Slika 3: Potek gradienta napetosti, definicija faktorja Ψ .

Deli prečnih prerezov pa so lahko tudi ojačani na različne načine. V primeru ojačanih prečnih prerezov je potrebno parametre vitkosti za posamezne dele določiti na drugačen način, z upoštevanjem treh različnih načinov lokalnega izbočenja, definiranih v SIST EN 1999-1-1, 6.1.4.3(2). V prvem načinu lokalnega izbočenja se ojačani del izboči kot celota, ojačitev pa ima enako ukrivljenost, v drugem načinu se osnovna ploščevina in ojačitev izbočita različno, tretji način pa je kombinacija prvih dveh.

Za vsak posamezni način izbočenja je potrebno določiti vrednost parametra vitkosti β . Vrednost parametra β je odvisna od načina izbočenja, razporeditve napetosti in tipa ojačitve (glej SIST EN 1999-1-1, 6.1.4.3.(3)).

S pomočjo izračunanega parametra vitkosti posamezni del prečnega prereza klasificiramo po naslednjem ključu:

TLAČENI DELI UPOGIBNIH NOSILCEV

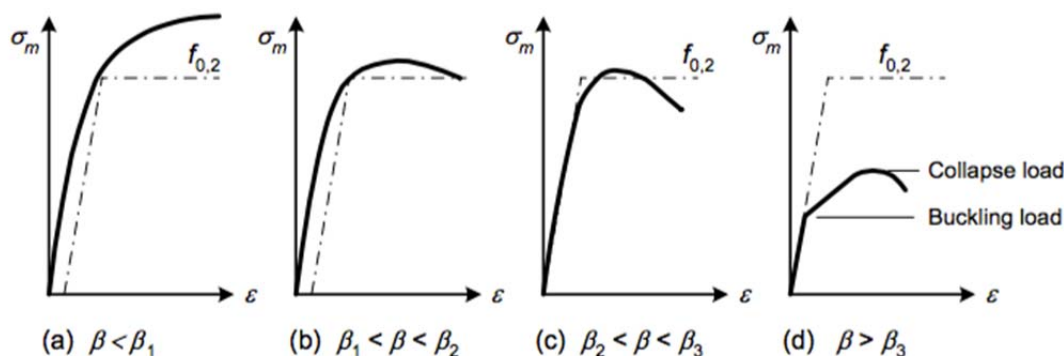
- 1. razred: $\beta \leq \beta_1$
- 2. razred: $\beta_1 < \beta \leq \beta_2$
- 3. razred: $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$
- 4. razred: $\beta_3 < \beta$

TLAČENI DELI TLAČENIH PALIC

- 1. in 2. razred: $\beta \leq \beta_2$
- 3. razred: $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$
- 4. razred: $\beta_3 < \beta$

V 1. razredu je vitkost β zelo majhna, zato do lokalnega izbočenja ne pride. Za ploščevino v 2. razredu je značilno, da se lokalno izbočenje zgodi, ko pride do plastičnih deformacij. Pri

pločevini v 3. razredu se lokalno izbočenje pojavi, ko napetosti dosežejo dogovorno napetost, pri kateri po razbremenitvi ostane 0,2% nepovratne plastične deformacije. Za 4. razred (vitki prerezi) pa je vitkost tako velika, da se izbočenje zgodi že preden je dosežena $f_{0,2}$. Navedene razlike s pomočjo diagramov odvisnosti deformacije in srednje napetosti prikazuje Slika 4 (Höglund, 2009).



Slika 4: Diagrami odvisnosti srednje napetosti in deformacije pri različnih vrednostih parametra vitkosti (Höglund, 2009: str. 23).

Razred kompaktnosti celotnega prečnega prereza je odvisen od razredov kompaktnosti posameznih tlačnih delov le-tega. Celoten prečni prerez je tistega razreda, v katerem je njegov najšibkejši člen.

Razred posameznega dela prečnega prereza je potrebno določiti za vsak vpliv posebej. Ob različni vrsti obtežbe (čisti tlak, upogib okoli močne osi, upogib okoli šibke osi) lahko prečni prerez namreč pripada različnim razredom kompaktnosti.

Vrednosti parametrov vitkosti β_1 , β_2 in β_3 so podane v Preglednici 5.

Preglednica 5: Vrednosti parametrov vitkosti po standardu EN 1999-1-1.

notranji tlačeni deli		β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ
razred A	brez zvarov	11	16	22
	z zvari	9	13	18
razred B	brez zvarov	13	16,5	18
	z zvari	10	13,5	15

previsni tlačeni deli		β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ
razred A	brez zvarov	3	4,5	6
	z zvari	2,5	4	5
razred B	brez zvarov	3,5	4,5	5
	z zvari	3	3,5	4

Kjer je $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_o}}$, f_o v $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

Razvrstitev materialov v uklonska razreda A in B je definirana s preglednico 3.2 v SIST EN 1999-1-1.

2.3.1 Vitke pločevine – določitev sodelujoče debeline

Pri pločevinah v 1.-3. razredu kompaktnosti lokalnega izbočenja ni, pri vitkih pločevinah 4. razreda lokalno izbočenje upoštevamo z zmanjšanjem debeline tlačnega dela in z izračunom efektivnih geometrijskih lastnosti prereza (metoda sodelujočih širin).

Za razliko od jeklenih konstrukcij, kjer govorimo o sodelujoči širini pločevine b_{eff} in bruto debelini t , pri aluminijastih prerezi zmanjšujemo debelino, torej npr. za izračun sodelujoče površine A_{eff} množimo sodelujočo debelino pločevine t_{eff} z bruto širino b .

V ta namen Evrokod 9 vpelje faktor lokalnega izbočenja ρ_c , s katerim zmanjšamo debelino pločevine pri vitkih pločevinah, ki so v celoti ali delno v tlaku. Faktor lokalnega izbočenja ρ_c izračunamo za vsak del prečnega prereza posebej

$$\rho_c = 1,0 \text{ za } \beta \leq \beta_3 \quad (2.1)$$

$$\rho_c = \frac{C_1}{\beta/\varepsilon} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} \text{ za } \beta > \beta_3 \quad (2.2)$$

Parameter vitkosti β je definiran v Preglednici 4, β_3 v Preglednici 5, ε je podan z izrazom

$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_o}}$, konstanti C_1 in C_2 pa sta podani v Preglednici 6.

Preglednica 6: Vrednosti konstant C_1 in C_2 za izračun faktorja lokalnega izbočenja po SIST EN 1999-1-1.

		notranji deli prereza		zunanji deli prereza	
		C_1	C_2	C_1	C_2
razred A	brez zvarov	32	220	10	24
	z zvari	29	198	9	20
razred B	brez zvarov	29	198	9	20
	z zvari	25	150	8	16

Za ravne zunanje (previsne dele) prereza faktor ρ_c ne sme preseči vrednosti $120/(\beta/\varepsilon)^2$.

Za ojačane dele prečnih prerezov je postopek nekoliko drugačen, saj je potrebno preveriti vse načine lokalnega izbočenja in v nadaljnjih izračunih upoštevati najmanjšo vrednost ρ_c .

Sledi

$$t_{eff} = \rho_c \times t \quad (2.3)$$

kjer je

t_{eff} – efektivna (sodelujoča) debelina pločevine

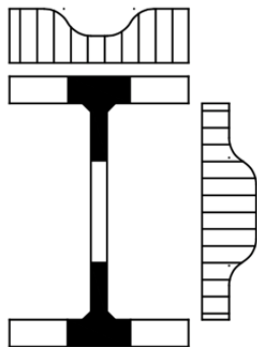
t – prvotna (bruto) debelina pločevine

ρ_c – faktor lokalnega izbočenja

Ko za vsak vitek del prečnega prereza določimo efektivno debelino pločevine t_{eff} , izračunamo nove geometrijske karakteristike prečnega prereza A_{eff} , I_{eff} , W_{eff} itd.

2.4 Oslabitve v območju toplotno-vplivne cone (TVC)

S toplotno obdelavo, npr. varjenjem, ob vnosu toplote spremenimo kristalno strukturo materiala v območju, imenovanem toplotno-vplivna cona (angl. *heat-affected zone*, HAZ). To ima za posledico poslabšanje mehanskih lastnosti. Stopnja poslabšanja trdnosti je lahko pri aluminijastih elementih velika, zato tega vpliva ne smemo zanemariti.



Slika 5: Vpliv toplote na trdnost materiala v okolici zvarov.

Pri presoji vpliva sta pomembna dejavnika obseg TVC in stopnja oslabitve, ki ju obravnavamo ločeno.

2.4.1 Obseg toplotno-vplivne cone

Definirana je razdalja b_{haz} od zvara, znotraj katere se pojavijo spremembe zaradi vpliva toplote. Ta razdalja je odvisna od tipa varjenja, vrste materiala in debeline pločevine. Kot

prikazuje Preglednica 7, je v primeru varjenja s postopkom TIG (angl. *tungsten inert gas*) obseg TVC v primeru tankih pločevin nekoliko večji kot pri varjenju MIG.

Preglednica 7: Razdalja b_{haz} od zvara do roba TVC.

debelina pločevine [mm]	b_{haz} [mm]	
	MIG varjenje	TIG varjenje
$0 < t \leq 6$	20	30
$6 < t \leq 12$	30	30 do 35
$12 < t \leq 25$	35	35 do 40
$25 < t$	40	40 do 50

2.4.2 Stopnja oslabitve v toplotno-vplivni coni

Oslabitev v toplotno vplivni coni upoštevamo z vpeljavo faktorja toplotno-vplivne cone ρ_{haz} , s katerim množimo nosilnost materiala:

$$\rho_{0,haz} = \frac{f_{0,haz}}{f_0} \quad (2.4)$$

$$\rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u} \quad (2.5)$$

Kjer je $f_{0,haz}$ napetost tečenja v TVC in $f_{u,haz}$ mejna napetost za material v TVC. Vrednosti so odvisne od izbrane zlitine in so podane v Tabeli 3.2 standarda SIST EN 1999-1-1.

2.5 Elementi v nategu

Potrebno je zagotoviti:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.6)$$

kjer je N_{Ed} = natezna osna sila, $N_{t,Rd}$ = natezna osna nosilnost prečnega prereza.

Porušitev nastopi v večini primerov takrat, ko je napetost enaka elastični trdnosti f_0/γ_{M1} . V resnici porušitev sicer nastopi šele pri večji napetosti, a takrat konstrukcija zaradi deformacij ni več uporabna. Kadar je prerez oslabljen zaradi npr. lukenj in zvarov, za kontrolo uporabimo mejno vrednost f_u/γ_{M2} .

Vrednost $N_{t,Rd}$ je torej najmanjša izmed naslednjih treh vrednosti:

- a) nosilnost bruto prereza: (2.7)

$$N_{0,Rd} = A_g \cdot f_0 / \gamma_{M1}$$

- b) nosilnost prereza z luknjami: (2.8)

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2}$$

- c) nosilnost prereza s TVC: (2.9)

$$N_{u,Rd} = A_{eff} \cdot f_u / \gamma_{M2}$$

kjer je

A_g bruto površina prečnega prereza

A_{net} neto površina prečnega prereza. V primeru zamaknjenih lukenj za določitev neto površine velja postopek, opisan v točki 6.2.2.2(4) standarda SIST EN 1999-1-1, s katerim določimo najbolj neugodno pot natezne porušitve med luknjami.

A_{eff} sodelujoča površina prereza s TVC

f_0 trdnost aluminija pri 0,2% deformaciji

f_u natezna trdnost aluminija

$\gamma_{M1} = 1,1$ delni varnostni faktor po SIST EN 1999-1-1:2007/A101

$\gamma_{M2} = 1,25$ delni varnostni faktor po SIST EN 1999-1-1:2007/A101

2.6 Tlačeni elementi

Porušitev tlačanih elementov se zgodi zaradi enega ali kombinacije naslednjih treh pojavov:

- lokalno izbočenje pločevin
- tlačna porušitev prereza
- uklon elementa

2.6.1 Lokalno izbočenje pločevin

Lokalno izbočenje pločevin se pojavi pri vitkih pločevinah. To upoštevamo z določitvijo efektivne debeline vitkih pločevin po postopku, opisanem v poglavju 2.3.1. V nadaljnjih izračunih nato podobno kot pri jeklenih konstrukcijah upoštevamo geometrijske karakteristike efektivnega (sodelujočega, neizbočenega) prečnega prereza.

2.6.2 Tlačna porušitev prereza

Porušitev se zgodi, ko prečni prerez ne zdrži osne obremenitve. Kontrola se izvaja v kritičnem prerezu.

Projektna tlačna obremenitev ne sme preseči projektne tlačne nosilnosti prereza:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.10)$$

kjer za $N_{c,Rd}$ vzamemo manjšo od spodnjih dveh vrednosti.

- a) upoštevamo morebitne luknje in oslabitve zaradi TVC

$$N_{u,Rd} = A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2}$$

- b) upoštevamo lokalno izbočenje pločevine in oslabitve zaradi TVC

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot f_0 / \gamma_{M1}$$

Kjer je

A_{net}	neto površina prečnega prereza
A_{eff}	sodelujoča površina prereza s TVC
f_0	trdnost aluminija pri 0,2% deformaciji
f_u	natezna trdnost aluminija
γ_{M1}	delni varnostni faktor za odpornost prereza
γ_{M2}	delni varnostni faktor za natezno razpokanje

2.6.3 Uklon tlačnega elementa

Poznamo upogibni, torzijski in upogibno-torzijski uklon tlačanih elementov, ki jih preverjamo ločeno. Porušitev zaradi uklona nastopi pri vitkih elementih, odvisna pa je tudi od lastnosti materiala in karakteristik prečnega prereza.

2.6.3.1 Upogibni uklon tlačnega elementa

Oсно obremenjen, teoretično raven in elastičen element se ukloni v trenutku, ko je dosežena elastična kritična sila N_{cr} . Realna nosilnost pa je odvisna od različnih začetnih nepopolnosti in zaostalih napetosti, ki imajo pri jeklenih elementih večji vpliv kot pri ekstrudiranih aluminijastih profilih, kjer so zaostale napetosti razmeroma majhne. Zato je pri aluminijastih elementih poudarek na nelinearnosti zveze med napetostmi in deformacijami ter vplivu zvarov v toplotno vplivni coni (Höglund, 2009).

Poznamo dva redukcijska faktorja: faktor upogibnega uklona χ in faktor κ , ki upošteva oslabitve zaradi zvarov. Odvisna sta od uklonskega razreda materiala, relativne vitkosti in od površine TVC.

Relativna vitkost $\bar{\lambda}$ je odvisna od dolžine elementa, pogojev podpiranja in geometrije prečnega prereza. Po SIST EN 1999-1-1 je definirana kot:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_0}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_0}{A_g \cdot E}} \quad (2.12)$$

Kjer je

$L_{cr} = L \cdot k$ uklonska dolžina v obravnavani uklonski ravnini, kjer je L dejanska dolžina elementa, faktor k pa je odvisen od pogojev podpiranja ($k=1$ pri prostoležečem nosilcu). Uklonsko dolžino dobimo tako, da dejansko dolžino elementa pomnožimo s faktorjem uklonske dolžine k , odvisnim od pogojev vpetja na robovih elementa. Faktor k določimo na podlagi Preglednice 8.

$i = \sqrt{\frac{I}{A_g}}$ vztrajnostni polmer bruto prečnega prereza

$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}$ Eulerjeva (elastična) kritična sila za upogibni uklon

A_{eff} sodelujoča površina prereza

A_g bruto površina prereza

E modul elastičnosti

Preglednica 8: Določitev faktorja uklonske dolžine k (SIST EN 1999-1-1:2007, 6.8).

End conditions	k
1. Held in position and restrained in direction at both ends	0,7
2. Held in position at both ends and restrained in direction at one end	0,85
3. Held in position at both ends, but not restrained in direction	1,0
4. Held in position at one end, and restrained in direction at both ends	1,25
5. Held in position and restrained in direction at one end, and partially restrained in direction but not held in position at the other end	1,5
6. Held in position and restrained in direction at one end, but not held in position or restrained at the other end	2,1

Na podlagi izračunane relativne vitkosti $\bar{\lambda}$ lahko redukcijski faktor χ izračunamo po izrazih 2.13-2.14, ali po krivuljah na Sliki 6. Izbira krivulje je odvisna od uklonskega razreda materiala.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (2.13)$$

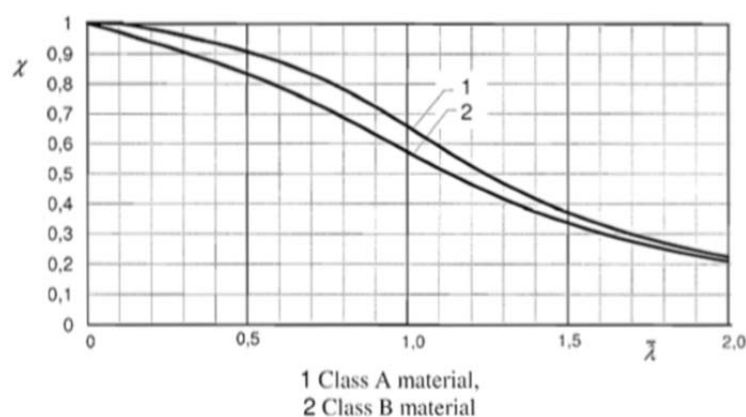
$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) \quad (2.14)$$

kjer je α faktor nepopolnosti, $\bar{\lambda}_0$ pa predstavlja mejo horizontalnega platoja (gl. Sliko 6).

Faktorja α in $\bar{\lambda}_0$ sta odvisna od uklonskega razreda materiala:

za uklonski razred A je $\alpha = 0,2$ in $\bar{\lambda}_0 = 0,1$,

za uklonski razred B je $\alpha = 0,32$ in $\bar{\lambda}_0 = 0$.



Slika 6: Diagrami za grafično določitev redukcijskega faktorja na podlagi relativne vitkosti za posamezni uklonski razred materiala (Vir: SIST EN 1999-1-1, slika 6.11, str. 73).

Postopek za določitev faktorja κ , ki upošteva oslabitve zaradi zvarov, pa je pri upogibnem uklonu tlačnih elementov odvisen od površine TVC in lastnosti materiala $\rho_{0,haz}$.

Če zvarov ni, je κ enako 1. Za element z vzdolžnimi zvari je vrednost odvisna od uklonskega razreda in podana z izrazi, zapisanimi v Tabeli 6.5. standarda SIST EN 1999-1-1. Če imamo element s prečnimi zvari, je $\kappa = \omega_x$, kot opisuje SIST EN 1999-1-1: 6.3.3.3.

Po določitvi faktorjev χ in κ določimo projektno uklonsko nosilnost tlačnega elementa z izrazom

$$N_{b,Rd} = \kappa \cdot \chi \cdot A_{eff} \cdot f_0 / \gamma_{M1} \quad (2.15)$$

2.6.3.2 Torzijski in upogibno-torzijski uklon

Torzijski in upogibno-torzijski uklon lahko zanemarimo pri naslednjih prerezih (Müller, 2011):

- votli prerezi
- dvojno simetrični I-prerezi
- kotniki, T-prerezi in podobni prerezi v 1. in 2. razredu kompaktnosti.

Postopek določitve odpornosti proti torzijskemu in upogibno torzijskemu uklonu je v principu podoben predhodno opisanemu postopku za upogibni uklon. Vrednosti parametrov za določitev kritične osne sile N_{cr} za torzijski ($N_{cr,T}$) ali upogibno torzijski uklon ($N_{cr,TF}$) in relativne vitkosti $\bar{\lambda}_T$ so podani v Dodatku I standarda SIST EN 1999-1-1.

Izraz za določitev projektne odpornosti proti torzijskemu in upogibno-torzijskemu uklonu je definiran z izrazom 2.15. Relativna vitkost je določena kot

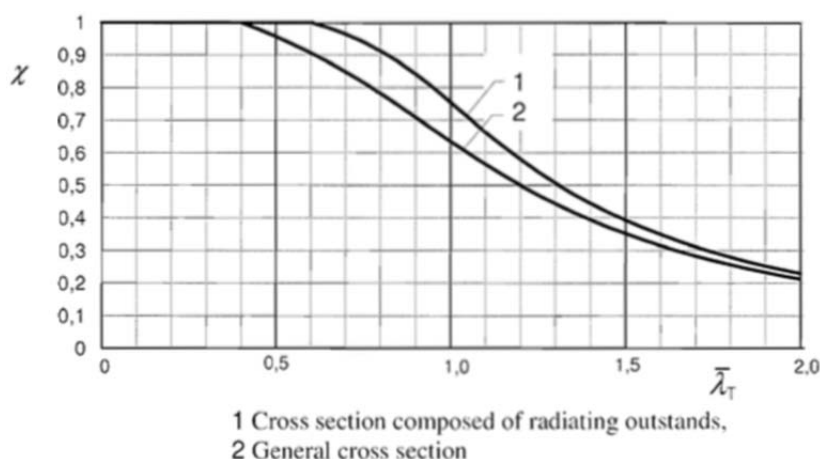
$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_0}{N_{cr}}} \quad (2.16)$$

kjer je

A_{eff} površina prečnega prereza, definirana v preglednici 6.7. standarda SIST EN 1999-1-1. Za splošne prereze velja, da pri izračunu A_{eff} upoštevamo vpliv lokalnega izbočenja in/ali TVC. V primeru kotnikov in podobnih prerezov, sestavljenih iz samih previsnih delov, vpliva lokalnega izbočenja ne upoštevamo, po potrebi pa upoštevamo vpliv TVC.

N_{cr} kritična osna sila za torzijski ($N_{cr,T}$) ali upogibno-torzijski ($N_{cr,TF}$) uklon. Analitične rešitve za določene primere so podane v Dodatku I standarda SIST EN 1999-1-1.

Podobno kot pri upogibnem uklonu na podlagi izračunane relativne vitkosti določimo vrednost faktorja χ za torzijski in upogibno torzijski uklon na podlagi krivulj na Sliki 7.



Slika 7: Določitev faktorja χ za torzijski in upogibno-torzijski uklon. (SIST EN 1999-1-1, Slika 6.12)

2.7 Upogibni elementi

Zaradi nekaterih lastnosti aluminijevih zlitin, npr. manjšega modula elastičnosti v primerjavi z jeklom in vpliva TVC, postopek kontrole upogibne nosilnosti aluminijastih elementov ni povsem enak kot pri jeklenih elementih.

Čeprav je napetost na meji elastičnosti za ta dva materiala lahko približno enaka, npr. pri jeklenem elementu tipa S275 (275 N/mm²) in aluminijastem elementu tipa 6082-T6 (250 N/mm²), je razlika v modulu elastičnosti, ki je pri aluminiju trikrat manjši kot pri jeklu. Ker je stabilnost odvisna od togosti, ki je torej trikrat manjša, dobimo na sredini aluminijastega nosilca trikrat večje pomike v primerjavi z jeklenim, zmanjša pa se tudi odpornost proti izbočenju tlačnih delov prereza. Upoštevati je potrebno tudi vpliv TVC zaradi oslabitve okoli zvarov, za kar obstajajo posebne kontrole.

Evrokod 9 zato vpelje faktor oblike α , ki zajema vpliv lokalnega izbočenja in toplotno-vplivne cone. Faktor α je po grobi definiciji razmerje med plastičnim odpornostnim momentom W_{pl} in elastičnim odpornostnim momentom W_{el} . Točne definicije faktorja oblike α – v odvisnosti od razreda prečnega prereza in prisotnosti zvarov – so podane v preglednici Preglednici 9.

2.7.1 Elementi, obremenjeni s čistim upogibom

Za čisti upogib je značilno, da je element obremenjen izključno pravokotno na svojo vzdolžno os. Projektna obremenitev M_{Ed} mora v skladu s SIST EN 1999-1-1 pri enosnem upogibu zadostiti pogoju $\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$.

$$M_{Rd} = \min \begin{cases} M_{u,Rd} = W_{net} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \\ M_{0,Rd} = \alpha \cdot W_{el} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} \end{cases} \quad (2.17)$$

Pri tem je

W_{net} elastični odpornostni moment neto prereza z upoštevanjem lukenj in oslabitve TVC v primeru varjenega prereza ($\rho_{u,haz} \cdot t$)

W_{el} elastični odpornostni moment bruto prereza

α faktor oblike

Kot omenjeno v prejšnji točki, je vrednost faktorja α odvisna od razreda kompaktnosti prereza in od prisotnosti zvarov.

Preglednica 9: Določitev faktorja oblike α (SIST EN 1999-1-1:2007).

razred prečnega prereza	brez zvarov	z vzdolžnimi zvari
1	W_{pl}/W_{el}	$W_{pl,haz}/W_{el}$
2	W_{pl}/W_{el}	$W_{pl,haz}/W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff}/W_{el}	$W_{eff,haz}/W_{el}$

2.7.1.1 Strig

Potrebni sta dve kontroli: kontrola lokalnega izbočenja stojine v strigu in kontrola strižne porušitve.

Kontrolo lokalnega izbočenja stojine v strigu zajamemo s klasifikacijo prečnega prereza. Večino strižnih napetosti prevzame stojina. Zato klasificiramo samo stojino, in sicer po naslednjem ključu:

$$\beta = \frac{h_w}{t_w} \quad (2.18)$$

$\beta \leq 39 \cdot \varepsilon \rightarrow$ stojina je kompaktna v strigu

$\beta > 39 \cdot \varepsilon \rightarrow$ stojina je vitka v strigu

Za kompaktne stojine določimo strižno nosilnost prereza po izrazu

$$V_{Rd} = A_V \cdot \frac{f_0}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad (2.19)$$

Strižni prerez A_V je za običajne, odprte prereze določen po naslednjem izrazu:

$$A_V = \sum_{i=1}^n \left[(h_w - \sum d) \cdot (t_w)_i - (1 - \rho_{0,haz}) \cdot b_{haz} \cdot (t_w)_i \right] \quad (2.20)$$

kjer je

- n število stojin
- h_w višina stojine
- d premer lukenj v strižni ravnini
- t_w debelina stojine
- $\rho_{0,haz}$ redukcijski faktor za TVC
- b_{haz} skupna višina TVC

Pri vitkih in ojačanih stojinah pa je postopek izračuna odvisen od razporeditve strižnih ojačitev. Na voljo je tudi postopek, ki zanemari ugoden učinek nateznega polja, gl. SIST EN 1999-1-1, 6.5.5(2).

Če se strižne ojačitve nahajajo samo ob podporah (SIST EN 1993-1-1, 6.7.4.), je potrebno preveriti odpornost proti strižnemu izbočenju, če velja

$$\frac{h_w}{t_w} > \left(\frac{2,37}{\eta} \right) \sqrt{E/f_0} \quad (2.21)$$

kjer je

$$\eta = 0,7 + 0,35 f_{uw}/f_{0w}$$

f_{uw} natezna trdnost aluminija, vgrajenega v območju stojine

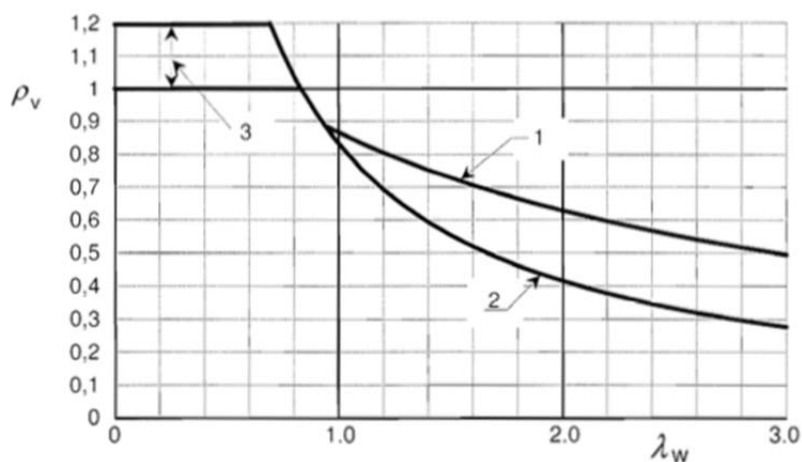
f_{0w} napetost aluminija, vgrajenega v stojini, pri 0,2% deformaciji

Strižna nosilnost je torej določena po izrazu

$$V_{Rd} = \rho_v t_w h_w \frac{f_0}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad (2.22)$$

kjer je ρ_v faktor strižnega izbočenja, določen v odvisnosti od parametra vitkosti λ_w iz krivulj na Sliki 8 ali po Preglednici 6.13 v SIST EN 1999-1-1.

$$\lambda_w = 0,35 \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} \quad (2.23)$$



1 – togo podpiranje, 2 – podajno podpiranje, 3 – razpon za η

Slika 8: Določitev faktorja ρ_v strižne izbočitve (SIST EN 1999-1-1).

Če pa je stojina strižno ojačana tudi z vmesnimi podporami, vzdolžnimi in/ali prečnimi, je postopek nekoliko bolj zamuden. Pravila glede kontrole so v tem primeru podana v poglavju 6.7.4.2 standarda SIST EN 1999-1-1.

2.7.1.2 Vpliv interakcije upogib – strig

Ker v upogibnih elementih pride do hkratnega delovanja upogiba in striga, je potrebno upoštevati dejstvo, da strig lahko zmanjša upogibno nosilnost elementa. To lahko zanemarimo, kadar velja

$$V_{Ed} < 0,5 \cdot V_{Rd} \quad (2.24)$$

Kadar imamo strižno izbočenje, interakcije tudi v primeru izpolnitve zgornjega pogoja ne smemo zanemariti.

Upogibna nosilnost se nato izračuna z upoštevanjem zmanjšane trdnosti materiala $f_{0,v}$

$$f_{0,v} = f_0(1 - (2V_{Ed}/V_{Rd} - 1)^2) \quad (2.25)$$

Naslednji izraz velja za izračun upogibne odpornosti dvojno simetričnega I-prereza v 3. razredu kompaktnosti.

$$M_{v,Rd} = t_f b_f (h - t_f) \frac{f_0}{\gamma_{M1}} + \frac{t_w h_w^2}{6} \frac{f_{0,v}}{\gamma_{M1}} \quad (2.26)$$

Za 1. in 2. razred se v zgornjem izrazu vrednost imenovalca predzadnjega ulomka s 6 zmanjša na 4. Za 4. razred kompaktnosti gledamo točko 6.2.5. v SIST EN-1999-1-1.

2.7.1.3 Vnos koncentrirane sile

V okolici mesta vnosa koncentrirane sile, npr. ob podporah ali točkovnih obremenitvah, lahko pride do posebnega načina porušitve stojine, podobno kot pri jeklenih konstrukcijah. Kadar je prerez obremenjen v stojini, kontrola načeloma ni potrebna. Kritična je situacija, ko je prerez obremenjen na mestu zgornje ali spodnje pasnice. Porušitev je odvisna od efektivne obremenjene dolžine, pogojev podpor oz. ojačitev in od vitkosti stojine (Müller, 2011: str. 123).

Postopek izračuna odpornosti proti takšni porušitvi je opisan v odstavku 6.7.5 standarda SIST EN 1999-1-1 in zajema izračun naslednjih faktorjev:

k_F	faktor uklona zaradi prečne sile; odvisen je od načina vnosa obremenitve, razdalje med prečnimi ojačitvami in višine stojine med zvaroma
F_{cr}	kritična uklonska sila; odvisna je od faktorja k_F , modula elastičnosti in geometrije prečnega prereza
m_1, m_2	brezdimenzijska parametra; odvisna sta od karakterističnih trdnosti stojine f_{0w} in pasnice f_{0f} in od geometrije prečnega prereza.

Navedene količine potrebujemo za izračun efektivne obremenjene dolžine l_y in redukcijskega faktorja χ_F , ki nam da efektivno dolžino $L_{eff} = \chi_F \cdot l_y$.

Projektno odpornost proti prečni sili nato izračunamo z izrazom

$$F_{Rd} = \frac{L_{eff} \cdot t_w \cdot f_{0w}}{\gamma_{M1}} \quad (2.27)$$

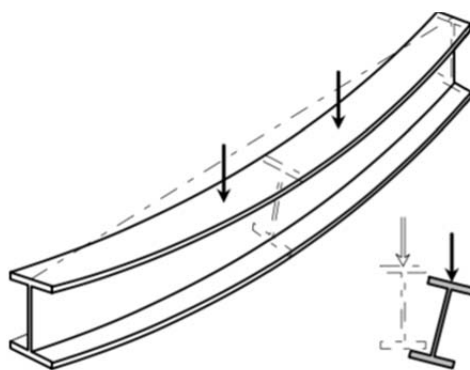
in preverimo, ali velja pogoj

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1 \quad (2.28)$$

2.7.1.4 Bočna zvrnitev upogibnega nosilca

V primeru upogibnega nosilca se tlačena pasnica, ki ni podprta izven svoje ravnine, poskuša zvrniti izven svoje ravnine. Natezna pasnica se temu upira. Dobimo poseben primer torzije, ki ima za posledico ukrivitev stojine izven njene ravnine. Fenomen bočne zvrnitve je prikazan na Sliki 9 in je v osnovi enak kot pri jeklenih elementih.

V smislu bočne zvrnitve so najbolj občutljivi ozki I in U-prerezi in pravokotni prerezi, podolgovati v smeri višine prereza.



Slika 9: Fenomen bočne zvrnitve (Höglund, 2009: str. 41).

Če torej nosilec ni dovolj bočno podprt (izven svoje ravnine), je lahko ta kontrola merodajna in je potrebno nosilcu primerno zmanjšati upogibno nosilnost.

Kot navaja Müller (2011), kontrole bočne zvrnitve ni potrebno izvajati v naslednjih primerih:

- element je v celoti bočno podprt
- uklon se zgodi okoli šibke osi pri elementu s presežkom oblike I
- med bočnimi podporami relativna vitkost λ_{LT} ne presega 0,4 v primeru 3. razreda kompaktnosti (glej Sliko 10)
- za pravokotne votle prereze, kjer velja $h/b < 2$
- za okrogle votle prereze.

V ostalih primerih kontrola bočne zvrnitve poteka po postopku, v nadaljevanju opisanem v skladu s poglavjem 6.3.2.1 standarda SIST EN 1999-1-1.

Zadostiti moramo pogoju

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.29)$$

kjer je projektna odpornost proti bočni zvrnitvi, $M_{b,Rd}$, definirana z izrazom

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \alpha \cdot W_{el,y} \cdot f_0 / \gamma_{M1} \quad (2.30)$$

- χ_{LT} redukcijski faktor pri bočni zvrnitvi
 α faktor oblike, definiran v Preglednici 9, a ne večji kot $W_{pl,y}/W_{el,y}$
 $W_{el,y}$ elastični odpornostni moment bruto prereza
 f_0 napetost na meji elastičnosti
 γ_{M1} delni varnostni faktor za odpornost prereza

Redukcijski faktor χ_{LT} določimo na podlagi parametra relativne vitkosti, ki je v standardu Evrokod 9 splošno definiran z izrazom

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot W_{el,y} f_0}{M_{cr}}} \quad (2.31)$$

kjer je α parameter oblike (Preglednica 9), M_{cr} pa elastični kritični moment za bočno zvrnitev.

M_{cr} lahko izračunamo s pomočjo Dodatka I.1 standarda SIST EN 1999-1-1. Odvisen je od lastnosti materiala, geometrije prečnega prereza, odpornosti proti torziji in popačenju (angl. *warping*) oz. njune preprečenosti, pozicije prečne obtežbe glede na strižno središče in od razporeditve momentov (Müller, 2011). Elastični kritični moment za bočno zvrnitev je za nosilec z enakomernim, simetričnim prerezom z enakima pasnicama, pod standardnimi pogoji podpiranja na obeh koncih, in pod vplivom enakomernega momenta v ravnini skozi strižno središče podan z izrazom (SIST EN 1999-1-1, Dodatek I.1.1(1)):

$$M_{cr} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L} \cdot \sqrt{1 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L^2 \cdot G \cdot I_t}} \quad (2.32)$$

kjer je

- I_t torzijska konstanta prečnega prereza
 I_z vztrajnostni moment okoli šibke osi
 I_w konstanta popačenja
 L razdalja med bočnimi podporami

Pri tem so standardni pogoji podpiranja na obeh koncih (SIST EN 1999-1-1, Dodatek I.1.1(2)):

- preprečeni so pomiki izven ravnine ($k_z=1$)
- preprečena je rotacija okoli vzdolžne osi, dovoljeno je popačenje ($k_w=1$)
- preprečeni so pomiki v ravnini obtežbe, dovoljeni so zasuki v tej ravnini ($k_y=1$).

Za določitev parametra $\bar{\lambda}_{LT}$ obstaja tudi poenostavljen postopek, opisan v Dodatku I.2 standarda SIST EN 1999-1-1. Velja za prečne prereze v Preglednici 11. Določen je z izrazom

$$\bar{\lambda}_{LT} = \lambda_{LT} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\alpha \cdot f_0}{E}} \quad (2.33)$$

kjer je

$$\lambda_{LT} = \frac{XL_{cr,z}/i_z}{\left[1 + Y \left(\frac{L_{cr,z}/i_z}{h/t_2}\right)^2\right]^{\frac{1}{4}}}$$

$L_{cr,z}$ uklonska dolžina za bočno zvrnitev

i_z vztrajnostni radij neto prereza za šibko os

h skupna višina prereza

t_2 debelina pasnice (v primerih 2 in 4 iz Preglednice 11 je $t_2=t$)

X in Y sta koeficienta, dobljena iz preglednice 11. V vseh primerih veljata konzervativni vrednosti $X=1,0$ in $Y=0,05$ (SIST EN 1999-1-1, Dodatek I.2(2)).

Ko določimo parameter $\bar{\lambda}_{LT}$, lahko redukcijski faktor χ_{LT} določimo grafično iz krivulj na Sliki 10 ali pa po izrazu

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{kjer } \chi_{LT} \leq 1 \quad (2.34)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (2.35)$$

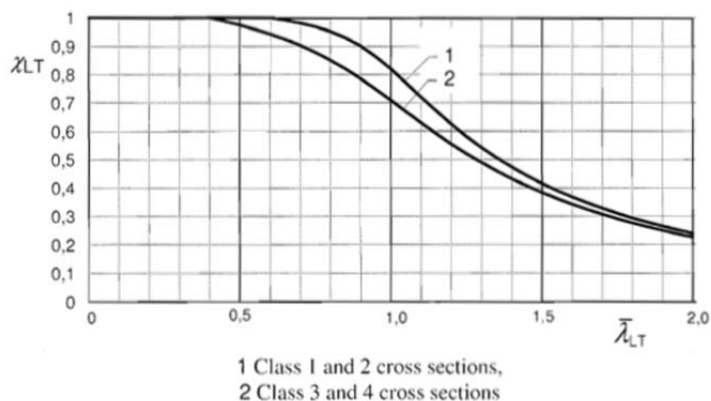
α_{LT} faktor nepopolnosti, odvisen od razreda; glej Preglednico 10.

$\bar{\lambda}_{0,LT}$ vrednost na robu horizontalnega platoja uklonske krivulje; glej Pregl. 10.

$\bar{\lambda}_{LT}$ parameter vitkosti

Preglednica 10: Vrednosti faktorjev pri bočni zvrnitvi (SIST EN 1999-1-1)

Razred kompaktnosti	α_{LT}	$\bar{\lambda}_{0,LT}$
1. in 2.	0,1	0,6
3. in 4.	0,2	0,4



Slika 10: Krivulje za grafično določitev redukcijskega faktorja (SIST EN 1999-1-1:2007).

Preglednica 11: Vrednosti koeficientov X in Y za določitev parametra relativne vitkosti za bočno zvrnitev (Vir: SIST EN 1999-1-1, Dodatek I.2)

1		$1,5 \leq h/b \leq 4,5$ $1 \leq t_2/t_1 \leq 2$	$X = 0,90 - 0,03h/b + 0,04t_2/t_1$ $Y = 0,05 - 0,010\sqrt{(t_2/t_1 - 1)h/b}$
2		$1,5 \leq h/b \leq 4,5$ $0 \leq c/b \leq 0,5$	$X = 0,94 - (0,03 - 0,07c/b)h/b - 0,3c/b$ $Y = 0,05 - 0,06c/h$
3		$1,5 \leq h/b \leq 4,5$ $1 \leq t_2/t_1 \leq 2$	$X = 0,95 - 0,03h/b + 0,06t_2/t_1$ $Y = 0,07 - 0,014\sqrt{(t_2/t_1 - 1)h/b}$
4		$1,5 \leq h/b \leq 4,5$ $0 \leq c/b \leq 0,5$	$X = 1,01 - (0,03 - 0,06c/b)h/b - 0,3c/b$ $Y = 0,07 - 0,10c/h$

2.7.2 Elementi, obremenjeni z upogibom in osno silo

Element, obremenjen z upogibnim momentom in tlačno osno silo, moramo po standardu SIST EN 1999-1-1 preveriti na nivoju prereza in na nivoju elementa.

Na nivoju prereza moramo zadostiti naslednjima pogojema, ki veljata za dvojno simetrične prereze.

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 \cdot N_{Rd}}\right)^{\eta_0} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 \cdot M_{y,Rd}} \leq 1 \quad (2.36)$$

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 \cdot N_{Rd}}\right)^{\eta_0} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 \cdot M_{y,Rd}}\right)^{\gamma_0} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 \cdot M_{z,Rd}}\right)^{\xi_0} \leq 1 \quad (2.37)$$

Pri tem je

$$N_{Rd} = A_{eff} \cdot f_0 / \gamma_{M1}$$

$$M_{y,Rd} = \alpha_y \cdot W_{el,y} \cdot f_0 / \gamma_{M1}$$

$$M_{z,Rd} = \alpha_z \cdot W_{el,z} \cdot f_0 / \gamma_{M1}$$

α_y in α_z sta faktorja oblike po Preglednici 9, a ne več kot 1,25.

$\omega_0 = 1$ za nevarjene prereze, drugače $\omega_0 = \rho_{0,haz}$

$\eta_0 = 1$, lahko tudi $\alpha_z^2 \cdot \alpha_y^2$, če velja $1 \leq \eta_0 \leq 2$

$\gamma_0 = 1$, lahko tudi α_z^2 , če velja $1 \leq \gamma_0 \leq 1,56$

$\xi_0 = 1$, lahko tudi α_y^2 , če velja $1 \leq \xi_0 \leq 1,56$

Klasifikacija prečnega prereza se izvede ločeno za vsako obremenitev posebej, kombinacija različnih napetosti pa je upoštevana v izrazu. Prav tako je potrebno pri izračunu nosilnosti N_{Rd} , $M_{y,Rd}$ in $M_{z,Rd}$ upoštevati vpliv vzdolžnih zvarov, prečni zvari pa so upoštevani s faktorjem ω_0 . (Höglund, 2009, str. 94).

Na nivoju elementa lahko pride do dveh načinov porušitve elementa, obremenjenega z upogibnim momentom in osno silo. Potrebno je preveriti uklonsko stabilnost elementa in odpornost proti bočni zvrnitvi.

Za odprte dvojno simetrične prereze moramo zadostiti enemu izmed naslednjih dveh pogojev (SIST EN 1999-1-1, poglavje 6.3.3.1):

- interakcija uklona okoli močne osi in upogiba M_y :

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}} \right)^{\xi_{yc}} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 \cdot M_{y,Rd}} \leq 1 \quad (2.38)$$

- interakcija uklona okoli šibke osi in upogiba M_z :

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}} \right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 \cdot M_{z,Rd}} \right)^{\xi_{zc}} \leq 1 \quad (2.39)$$

Za elemente, občutljive na bočno zvrnitev (I, H, T in ostali odprti enojno ali dvojno simetrični prerezi), pa moramo zadostiti tudi naslednjemu izrazu.

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}} \right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \omega_{xLT} \cdot M_{y,Rd}} \right)^{\gamma_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 \cdot M_{z,Rd}} \right)^{\xi_{zc}} \leq 1 \quad (2.40)$$

Kjer je

N_{Ed} projektna osna (tlačna) sila

$M_{y,Ed}$ upogibni moment okoli osi y

$M_{z,Ed}$ upogibni moment okoli osi z

$N_{Rd} = \frac{Af_0}{\gamma_{M1}}$, v primeru vitkega prereza upoštevamo A_{eff} , v primeru vzd. zvarov še faktor κ

$M_{y,Rd} = \alpha_y W_{y,eff} f_0 / \gamma_{M1}$ upogibna nosilnost okoli osi y-y

$M_{z,Rd} = \alpha_z W_{z,eff} f_0 / \gamma_{M1}$ upogibna nosilnost okoli osi z-z

α_y in α_z faktorja oblike po Preglednici 9, a ne več kot 1,25

χ_y oz. χ_z uklonska redukcijska koeficienta za uklon v ravnini x-z oz. x-y

χ_{LT} redukcijski faktor bočne zvrnitve

Za vrednosti η_c , ξ_{yc} in ξ_{zc} lahko vzamemo 0,8, lahko pa jih določimo z izrazi:

$\eta_c = \eta_0 \chi_z$, vendar ne manj kot 0,8

$\xi_{yc} = \xi_0 \chi_y$, vendar ne manj kot 0,8

$\xi_{zc} = \xi_0 \chi_z$, vendar ne manj kot 0,8

$\omega_x = \omega_0 = \omega_{xLT} = 1$, če ni lokaliziranih zvarov. V primeru zvarov gl. SIST EN 1999-1-1, poglavje 6.3.3.3.

3 PRIMERI KONTROLE NOSILNOSTI ELEMENTOV

V nadaljevanju je kontrola nosilnosti aluminijastih elementov po standardu SIST EN 1999-1-1 predstavljena na nekaterih najbolj značilnih primerih.

3.1 Natezno obremenjen element

Obravnavamo nosilnost elementa v čistem nategu. Za primer izberemo element s pravokotnim prečnim prerezom dimenzij 100/20mm. Izberemo zlitino EN AW-6028.

Podatki:

$$h = 100 \text{ mm}$$

$$b = 20 \text{ mm}$$

$$A = 2000 \text{ mm}^2$$

$$d_0 = 20 \text{ mm}$$

EN AW-6028 T6

$$f_0 = 250 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 295 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{0,haz} = 125 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{u,haz} = 185 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{0,haz} = 0,5$$

$$\rho_{u,haz} = 0,63$$

(SIST EN 1999-1-1, pregl. 3.2b)

Najprej izračunamo projektno nosilnost bruto prereza:

$$N_{0,Rd} = A \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 2000 \cdot \frac{250}{1,1} = 454545,45 \text{ N} = 454,54 \text{ kN}$$

Upoštevamo, da je v prečnem prerezu luknja premera $d_0 = 20 \text{ mm}$. Torej je neto prerez enak $A_{net} = (h - d_0) \cdot b = (100 - 20) \cdot 20 = 1600 \text{ mm}^2$. Sledi izračun nosilnosti neto prereza:

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \cdot 1600 \cdot \frac{295}{1,25} = 339840 \text{ N} = 339,8 \text{ kN}$$

Prečni čelni zvar predstavlja toplotno vplivno cono (TVC), zato moramo izračunati sodelujočo površino prečnega prereza, A_{eff} :

$$A_{eff} = \rho_{u,haz} \cdot b \cdot h = 0,63 \cdot 20 \cdot 100 = 1260 \text{ mm}^2$$

Sledi izračun nosilnosti prereza z TVC

$$N_{u,Rd} = A_{eff} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 1260 \cdot \frac{295}{1,25} = 297360 \text{ N} = 297,4 \text{ kN}$$

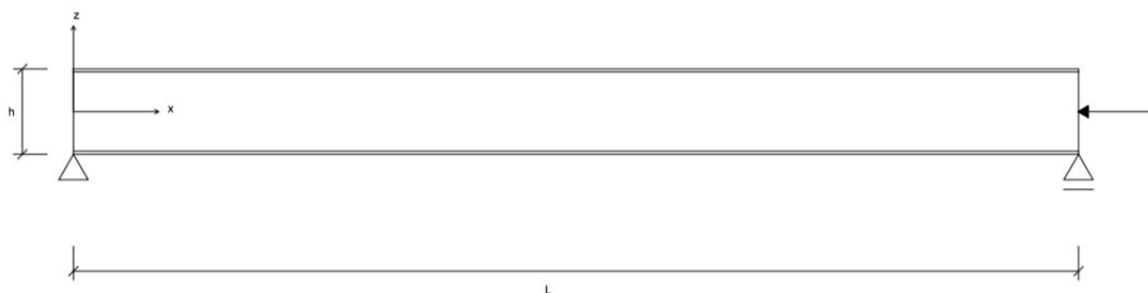
Ugotovimo, da je nosilnost obravnavanega prečnega prereza definirana z nosilnostjo v TVC. Nosilnost z upoštevanjem TVC znaša približno 65% nosilnosti bruto prečnega prereza, kot prikazuje Preglednica 12.

Preglednica 12: Primerjava rezultatov kontrole nosilnosti.

Nosilnost bruto prereza	Nosilnost neto prereza	Nosilnost v TVC
454,54 kN	339,8 kN	297,36 kN
100%	75%	65%

3.2 Tlačno obremenjen element

Obravnavamo element, ki je obremenjen le z osno tlačno silo, kot prikazuje Slika 10. Prikazali bomo izračun tlačne nosilnosti za tri variante: ekstrudirani nosilec, varjeni nosilec in čelno spojeni nosilec.



Slika 11: Tlačno obremenjen nosilec.

3.2.1 Varianta z ekstrudiranim nosilcem

Podatki:

	$h = 200 \text{ mm}$	$A = 2455 \text{ mm}^2 = 24,55 \text{ cm}^2$
	$h_f = 193 \text{ mm}$	$I_y = 18056060 \text{ mm}^4 = 1805,606 \text{ cm}^4$
	$b = 120 \text{ mm}$	$I_z = 2017375 \text{ mm}^4 = 201,738 \text{ cm}^4$
	$t_w = 4 \text{ mm}$	$i_y = 8,58 \text{ cm}$
	$t_f = 7 \text{ mm}$	$i_z = 2,87 \text{ cm}$
	$L = 2500 \text{ mm}$	

Material:

EN AW-6082 T6 EP

$$\rho_{0,haz} = 0,50$$

$$f_0 = 250 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{u,haz} = 0,64$$

$$f_u = 290 \text{ N/mm}^2$$

Uklonski razred: A

$$f_{0,haz} = 125 \text{ N/mm}^2$$

(SIST EN 1999-1-1: 3.2.2)

$$f_{u,haz} = 185 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{250}}{f_0} = \frac{\sqrt{250}}{250} = 1$$

Kompaktnost:

- stojina

$$\beta = b/t = 174/4 = 43,5$$

$$\beta_3 = 22$$

$$\beta_3 > \beta$$

→ stojina je vitka v tlaku

- pasnica

$$\beta = b / 2t = 52 / 7 = 7,42$$

$$\beta_3 = 6$$

$$\beta_3 > \beta_f$$

→ pasnici sta vitki v tlaku

Ker je prerez vitke, v njem pride do lokalnega izbočenja. V skladu s postopkom, opisanim v poglavju 2.3.1, moramo določiti sodelujočo debelino t_{eff} stojine in pasnice.

$$\rho_{c, stojina} = \frac{c_1}{\beta/\varepsilon} - \frac{c_2}{(\beta/\varepsilon)^2} = \frac{32}{43,5/1} - \frac{220}{(43,5/1)^2} = 0,62$$

$$\rho_{c, pasnica} = \frac{c_1}{\beta/\varepsilon} - \frac{c_2}{(\beta/\varepsilon)^2} = \frac{10}{7,42/1} - \frac{24}{(7,42/1)^2} = 0,91$$

$$t_{w, eff} = \rho_{c, stojina} \cdot t_w = 0,62 \cdot 4 = 2,48 \text{ mm}$$

$$t_{f, eff} = \rho_{c, pasnica} \cdot t_f = 0,91 \cdot 7 = 6,37 \text{ mm}$$

Za nadaljnje izračune potrebujemo geometrijske karakteristike efektivnega (sodelujočega) prečnega prereza, torej upoštevamo zmanjšane debeline pločevin.

$$I_{eff, y} = 16167035 \text{ mm}^4 = 1616,7 \text{ cm}^4$$

$$I_{eff, z} = 1835659 \text{ mm}^4 = 183,6 \text{ cm}^4$$

$$A_{eff} = 2059,4 \text{ mm}^2 = 20,6 \text{ cm}^2$$

$$i_{eff, y} = \sqrt{\frac{I_{eff, y}}{A_{eff}}} = \sqrt{\frac{1616,7}{20,6}} = 8,86 \text{ cm}$$

$$i_{eff, z} = \sqrt{\frac{I_{eff, z}}{A_{eff}}} = \sqrt{\frac{183,6}{20,6}} = 2,99 \text{ cm}$$

Odpornost prečnega prereza v tlaku $N_{c, Rd}$:

$$N_{c, Rd} = A_{eff} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 2059,4 \cdot \frac{250}{1,1} = 468045,5 \text{ N} = 468 \text{ kN}$$

Preidemo h kontroli nosilnosti na nivoju elementa.

(i) Uklon okoli močne osi y-y (ni merodajen. Kontrola je prikazana zaradi primerjave z naslednjima podprimeroma)

$$\bar{\lambda} = \frac{l_{cr}}{i \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_0}{A_g \cdot E}} = \frac{2500}{86 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2059,4 \cdot 250}{2455 \cdot 70000}} = 0,51 \rightarrow$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,51 - 0,1) + 0,51^2) = 0,67$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,67 + \sqrt{0,67^2 - 0,51^2}} = 0,91$$

$$\kappa = 1,0$$

$$N_{b,Rd} = \kappa \cdot \chi \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot 0,91 \cdot 2059,4 \cdot \frac{250}{1,1} = 425921 \text{ N} = 426 \text{ kN}$$

(ii) Uklon okoli šibke osi z-z

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_0}{A_g \cdot E}} = \frac{2500}{28,7 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2059,4 \cdot 250}{2455 \cdot 70000}} = 1,52$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5(1 + 0,2(1,52 - 0,1) + 1,52^2) = 1,80$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,80 + \sqrt{1,80^2 - 1,52^2}} = 0,36$$

$$N_{b,Rd} = \kappa \cdot \chi \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot 0,36 \cdot 1910,5 \cdot \frac{250}{1,1} = 168496 \text{ N} = 168,5 \text{ kN}$$

Projektna uklonska nosilnost elementa torej znaša 168,5 kN. To je tudi merodajna nosilnost obravnavanega elementa; obtežba mora zadostiti pogoju $N_{Ed} \leq 168,5 \text{ kN}$.

3.2.2 Varianta z vzdolžnimi zvari

Ekstrudirani nosilec iz primera 3.2.1 zamenjamo z varjenim. Glavne dimenzije (h , b , t_w , t_f) ostanejo enake. Kotni zvari med stojino in pasnicami so velikosti $a=3 \text{ mm}$. Privzamemo, da se površina A in vztrajnostni moment I bruto prečnega prereza zaradi doprinosa površine zvarov ne spremenita.

Ker ob prisotnosti zvarov v prečnem prerezu standard SIST EN 1999-1-1 predpisuje drugačne vrednosti parametrov vitkosti, moramo ponovno preveriti kompaktnost prečnega prereza:

- stojina

$$\beta = b/t = 177,5/4 = 44,4$$

$$\beta_3 = 18$$

$\beta > \beta_3 \rightarrow$ stojina je vitka v tlaku

$$\rho_{c, stojina} = \frac{c_1}{\beta/\varepsilon} - \frac{c_2}{(\beta/\varepsilon)^2} = \frac{29}{44,4/1} - \frac{198}{(44,4/1)^2} = 0,55$$

$$t_{w, eff} = \rho_{c, stojina} \cdot t_w = 0,55 \cdot 4 = 2,2 \text{ mm}$$

- pasnica

$$\beta = b / 2t = 53,8 / 7 = 7,69$$

$$\beta_3 = 5$$

$\beta > \beta_3 \rightarrow$ tudi pasnici sta vitki

$$\rho_{c,pasnica} = \frac{c_1}{\beta/\varepsilon} - \frac{c_2}{(\beta/\varepsilon)^2} = \frac{9}{7,69/1} - \frac{20}{(7,69/1)^2} = 0,83$$

$$t_{f,eff} = \rho_{c,pasnica} \cdot t_f = 0,83 \cdot 7 = 5,81 \text{ mm}$$

Efektivne geometrijske karakteristike:

$$A_{eff} = 1880 \text{ mm}^2 = 18,8 \text{ cm}^2$$

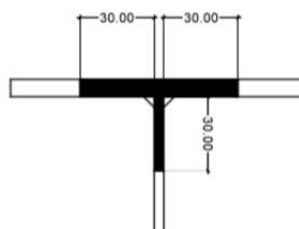
$$I_{y,eff} = 14837425 \text{ mm}^4 = 1484 \text{ cm}^4$$

$$I_{z,eff} = 1674295 \text{ mm}^4 = 1674 \text{ cm}^4$$

Obseg toplotno-vplivne cone (TVC) je definiran z razdaljo b_{haz} od zvara (SIST EN 1999-1-1:

6.1.6.3):

$$b_{haz} = 30 \text{ mm za } t \leq 6 \text{ mm, kjer je } t = \frac{t_w + t_f}{2} = 5,5 \text{ mm}$$



Slika 12: Obseg TVC v obravnavanem prerezu.

Stopnja oslabitve aluminijeve zlitine v TVC je zajeta v naslednjih količinah (SIST EN 1999-1-1: 6.1.6.2):

$$f_{0,haz} = 125 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{u,haz} = 185 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{0,haz} = 0,50$$

$$\rho_{u,haz} = 0,64$$

Uklon okoli močne osi y-y:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_0}{A_g \cdot E}} = \frac{2500}{86 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1880 \cdot 250}{2455 \cdot 70000}} = 0,484 \rightarrow$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,484 - 0,1) + 0,484^2) = 0,655$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,655 + \sqrt{0,655^2 - 0,484^2}} = 0,91$$

$$A_1 = A - A_{haz} \cdot (1 - \rho_{0,haz}) = 24,55 - (11,36) \cdot (1 - 0,5) = 18,87$$

$$\kappa = 1 - \left(1 - \frac{A_1}{A}\right) \cdot 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0,05 + 0,1 \cdot \frac{A_1}{A}\right) \cdot \bar{\lambda}^{1,3(1-\bar{\lambda})}$$

$$\kappa = 1 - \left(1 - \frac{18,87}{24,55}\right) \cdot 10^{-0,484} - \left(0,05 + 0,1 \cdot \frac{18,87}{24,55}\right) \cdot 0,484^{1,3(1-0,484)} = 0,846$$

$$N_{b,Rd} = \kappa \cdot \chi \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 0,846 \cdot 0,91 \cdot 1880 \cdot \frac{250}{1,1} = 328940 \text{ N} = 329 \text{ kN}$$

Uklon okoli šibke osi z-z:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_0}{A_g \cdot E}} = \frac{2500}{29 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1880 \cdot 250}{2455 \cdot 70000}} = 1,436 \rightarrow$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5(1 + 0,2(1,436 - 0,1) + 1,436^2) = 1,66$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,66 + \sqrt{1,66^2 - 1,436^2}} = 0,40$$

$$A_1 = A - A_{\text{haz}} \cdot (1 - \rho_{0,\text{haz}}) = 24,55 - (11,36) \cdot (1 - 0,5) = 18,87$$

$$\kappa = 1 - \left(1 - \frac{A_1}{A}\right) \cdot 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0,05 + 0,1 \cdot \frac{A_1}{A}\right) \cdot \bar{\lambda}^{1,3(1-\bar{\lambda})}$$

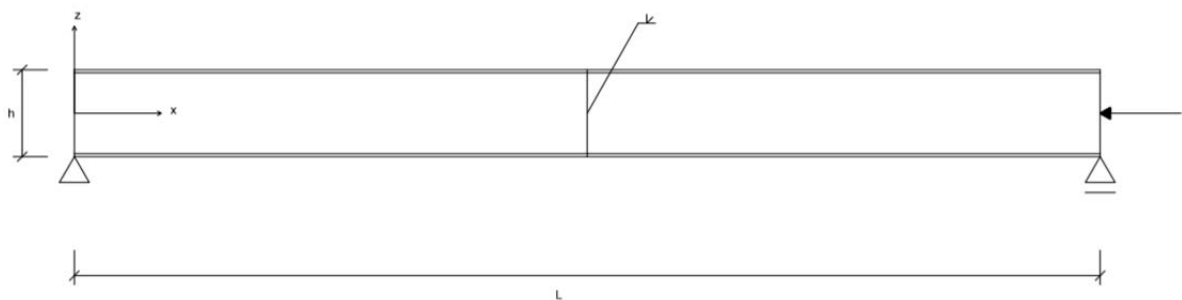
$$\kappa = 1 - \left(1 - \frac{18,87}{24,55}\right) \cdot 10^{-1,436} - \left(0,05 + 0,1 \cdot \frac{18,87}{24,55}\right) \cdot 1,4^{1,3(1-1,436)} = 0,887$$

$$N_{b,Rd} = \kappa \cdot \chi \cdot A_{\text{eff}} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 0,887 \cdot 0,4 \cdot 1880 \cdot \frac{250}{1,1} = 151596 \text{ N} = 151,6 \text{ kN}$$

Projektna uklonska nosilnost obravnavanega nosilca znaša 151,6 kN. Obremenitev varjenega nosilca mora torej zadostiti pogoju $N_{Ed} \leq 151,6 \text{ kN}$. Ugotovimo, da je projektna uklonska nosilnost v primeru varjenega nosilca okoli obeh osi precej nižja v primerjavi z ekstrudiranim nosilcem.

3.2.3 Varianta s prečnim zvarom na sredini razpona

Na sredini razpona variante z ekstrudiranim nosilcem (poglavje 3.2.1) predpostavimo čelni zvar.



Slika 13: Tlačno obremenjen nosilec s prečnim zvarom na sredini razpona.

V računu uklonske nosilnosti iz poglavja 3.2.1 se spremeni le faktor κ , katerega zamenja faktor k , določen z izrazom

$$k = \omega_x = \frac{\rho_{u,\text{haz}} \cdot f_u / \gamma_{M2}}{f_0 / \gamma_{M1}} = \frac{0,64 \cdot 295 / 1,25}{250 / 1,1} = 0,664 \quad (\text{SIST EN 1991-1-1, 6.3.1.1(2)})$$

→Uklonska nosilnost okoli šibke osi z-z:

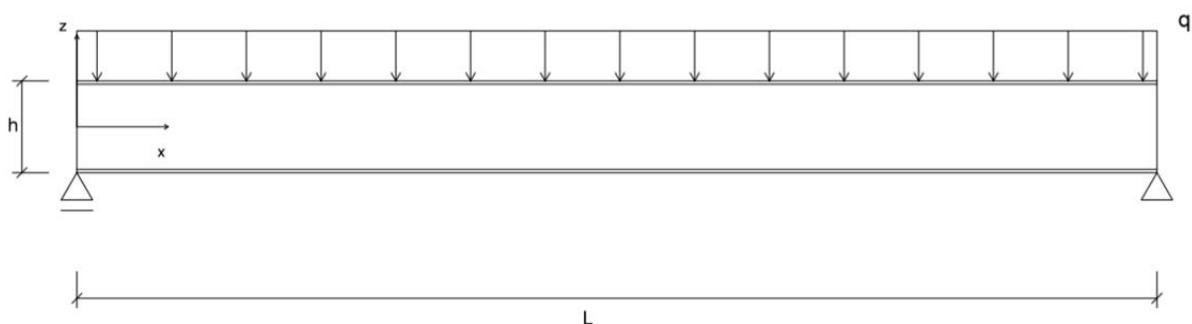
$$N_{b,Rd} = k \cdot \chi \cdot A_{\text{eff}} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 0,664 \cdot 0,36 \cdot 2059,4 \cdot \frac{250}{1,1} = 111881,6 \text{ N} = 112 \text{ kN}$$

Predpostavljen zvar na sredini obravnavanega nosilca torej njegovo uklonsko nosilnost zmanjša s 168,5 kN na 112 kN.

Torej mora v primeru obravnavanega nosilca veljati $N_{Ed} \leq 112 \text{ kN}$.

3.3 Upogibno obremenjen element

Vsi geometrijski in materialni vhodni podatki ostanejo enaki kot pri primeru 3.2.1. V tem primeru element obremenimo upogibno s porazdeljeno obtežbo $q = 10 \text{ kN/m}$, kot prikazuje Slika 13.



Slika 14: Upogibni nosilec, obremenjen s porazdeljeno prečno obtežbo q .

1) Razvrstitev prečnega prereza pri upogibu

- stojina – upogib:

$$\beta = 0,4 \cdot b/t = 0,4 \cdot 174/4 = 17,4$$

$$\beta_3 = 22$$

$$\beta_3 > \beta \rightarrow \text{stojina je v 3. razredu kompaktnosti}$$

- pasnica – tlak:

$$\beta = b/2t = 52/7 = 7,43$$

$$\beta_3 = 6$$

$$\beta > \beta_3 \rightarrow \text{vitka pasnica}$$

$$\rho_{c,pasnica} = \frac{c_1}{\beta/\varepsilon} - \frac{c_2}{(\beta/\varepsilon)^2} = \frac{10}{7,43/1} - \frac{24}{(7,43/1)^2} = 0,91$$

$$t_{f,eff} = \rho_{c,pasnica} \cdot t_f = 0,91 \cdot 7 = 6,37 \text{ mm}$$

2) Geometrijske karakteristike sodelujočega prereza

$$A_{eff} = 2389,4 \text{ mm}^2 = 23,89 \text{ cm}^2$$

$$I_{y,eff} = 17445189 \text{ mm}^4 = 1744,5 \text{ mm}^4$$

$$I_{z,eff} = 1926871 \text{ mm}^4 = 192,7 \text{ cm}^4$$

$$W_{el,eff,ZG} = 169954,5 \text{ mm}^3 = 170 \text{ cm}^3$$

$$W_{el,eff,SP} = 179193,7 \text{ mm}^3 = 179,1 \text{ cm}^3$$

$$i_y = 85,45 \text{ mm}$$

$$i_z = 28,40 \text{ mm}$$

3) Izvedemo še eno iteracijo.

Zaradi premika težišča je zdaj večji del stojine v tlaku.

$$\sigma_{eff,zg} = \frac{M_{Ed}}{W_{eff,zg}} = \frac{7,8125 \cdot 100}{170} = 4,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{eff,sp} = \frac{M_{Ed}}{W_{eff,sp}} = \frac{7,8125 \cdot 100}{179,1} = 4,36 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Psi = -1,05$$

$$\eta = 0,8 / (1 - \Psi) = 0,39$$

$$\beta = \eta \cdot \frac{b}{t} = 0,39 \cdot \frac{174}{4} = 17$$

$\beta > \beta_3$ - stojina je še vedno v 3. razredu kompaktnosti.

4) Projektna upogibna nosilnost prereza

$$\alpha = W_{eff} / W_{el} \text{ (EN 1999-1-1, Table 6.4)}$$

$$M_{0,Rd} = \alpha \cdot W_{el} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = W_{eff,ZG} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 169954,5 \cdot \frac{250}{1,1} = 38,6 \text{ kNm}$$

5) Strig

$$\beta = \frac{h_w}{t_w} = \frac{200}{4} = 50 > 39 \rightarrow \text{stojina je vitka v strigu}$$

Predpostavimo, da imamo strižne ojačitve samo ob podporah.

$$\eta = 0,7 + \frac{0,35 f_{uw}}{f_{ow}} = 0,7 + \frac{0,35 \cdot 290}{250} = 1,106$$

$$\frac{h_w}{t_w} > \left(\frac{2,37}{\eta}\right) \sqrt{E/f_0}$$

$$\frac{200-2 \cdot 7}{4} > \left(\frac{2,37}{1,106}\right) \sqrt{70000/250}$$

$46,5 > 35,86 \rightarrow$ preveriti moramo odpornost proti strižnemu izbočenju.

$$\lambda_w = 0,35 \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 0,35 \frac{200-2 \cdot 7}{4} \sqrt{\frac{250}{70000}} = 0,97$$

$$\rho_v(\lambda_w) = 0,87$$

$$V_{Rd} = 0,87 \cdot 4 \cdot 186 \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 84,9 \text{ kN}$$

6) Interakcija upogib-strig

$V_{Ed} < 0,5 \cdot V_{Rd} \rightarrow$ vpliva interakcije ni potrebno upoštevati.

6) Bočna zvrnitev; po alternativnem postopku, opisanem v SIST EN 1999-1-1, dodatek I.2.

$$X = 0,9 - 0,03 \frac{200}{120} + 0,04 \frac{7}{4} = 0,92$$

$$Y = 0,05 - 0,01 \sqrt{\left(\frac{7}{4} - 1\right) \frac{200}{120}} = 0,04$$

$$\text{Sledi } \lambda_{LT} = \frac{X \cdot L_{cr,z} / i_z}{\left[1 + Y \cdot \left(\frac{L_{cr,z} / i_z}{h / t_2}\right)^2\right]^{1/4}} = \frac{0,92 \cdot 2500 / 27,62}{\left[1 + 0,04 \cdot \left(\frac{2500 / 27,62}{200 / 7}\right)^2\right]^{1/4}} = 76,53$$

$$\alpha = \frac{W_{eff}}{W_{el}} = 0,88$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \lambda_{LT} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot f_0}{E}} = 76,53 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{0,88 \cdot 250}{70000}} = 1,37$$

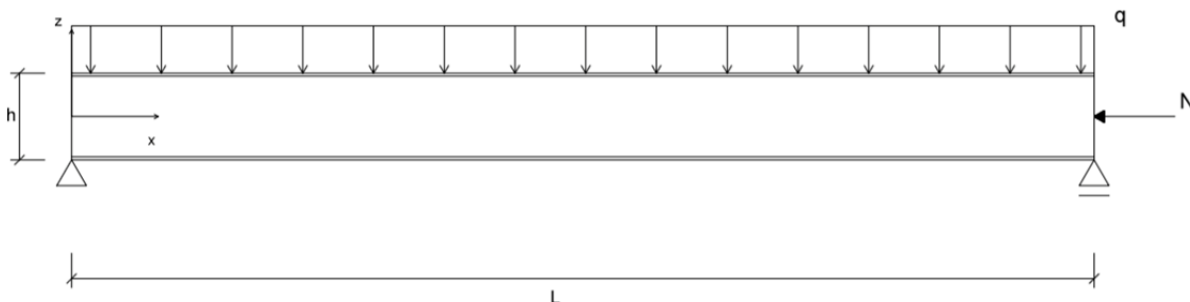
$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2\right] = 0,5 \left[1 + 0,2(1,37 - 0,4) + 1,37^2\right] = 1,535$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{1,535 + \sqrt{1,535^2 - 1,37^2}} = 0,45$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \alpha \cdot W_{el,y} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 0,45 \cdot 0,88 \cdot 158842,57 \cdot \frac{250}{1,1} = 14,3 \text{ kNm}$$

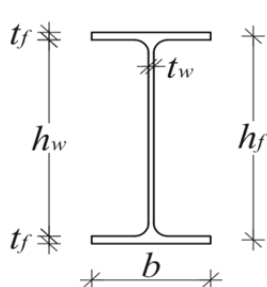
3.4. Upogibno in tlačno obremenjen element

Obravnavamo nosilec, obremenjen s porazdeljeno obtežbo q in osno silo N , kot prikazuje spodnja slika.



Slika 15: Nosilec, obremenjen s kombinacijo tlaka in upogiba.

Podatki:



$$h = 160 \text{ mm}$$

$$h_f = 149 \text{ mm}$$

$$b = 80 \text{ mm}$$

$$t_w = 7 \text{ mm}$$

$$t_f = 11 \text{ mm}$$

$$L = 2,5 \text{ m}$$

$$r = 10,5 \text{ mm}$$

$$A = 28,2 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 1174 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 94,6 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 147 \text{ cm}^3$$

$$W_z = 23,6 \text{ cm}^3$$

$$i_y = 6,45 \text{ cm}$$

$$i_z = 1,83 \text{ cm}$$

Material:

EN AW-6082 T6 EP

$$f_0 = 250 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 290 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{u,haz} = 0,64$$

$$f_{0,haz} = 125 \text{ N/mm}^2$$

Uklonski razred: A

$$f_{u,haz} = 185 \text{ N/mm}^2$$

(SIST EN 1999-1-1: 3.2.2)

$$\rho_{0,haz} = 0,50$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{250}}{f_0} = \frac{\sqrt{250}}{250} = 1$$

Obremenitev:

$$q_{Ed} = 5 \text{ kN/m}$$

$$N_{Ed} = 50 \text{ kN (tlak)}$$

$$M_{Ed} = \frac{ql^2}{8} = 4 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = \frac{ql}{2} = 6,25 \text{ kN}$$

Klasifikacija prečnega prereza za vsako obremenitev posebej:

- tlačna osna sila

$$\text{Pasnica } \beta = \frac{b}{t} = \frac{26}{11} = 2,36, \beta_3 = 6\varepsilon = 6 \Rightarrow \text{pasnica v 3. razredu kompaktnosti}$$

$$\text{Stojina } \beta = \frac{h-2t_f-2r}{t} = \frac{160-22-21}{7} = 2,39, \beta_3 = 22\varepsilon = 22 \Rightarrow \text{stojina je v 3. r.k.}$$

- upogibni moment

$$\text{Tlačena pasnica } \beta = \frac{b}{t} = \frac{26}{11} = 2,36, \beta_3 = 6\varepsilon = 6 \Rightarrow \text{pasnica je v 3. r.k.}$$

$$\text{Stojina (upogib) } \beta = 0,4 \cdot \frac{h-2t_f-2r}{t} = 0,4 \cdot \frac{160-22-21}{7} = 6,69, \beta_3 = 22\varepsilon = 22 \Rightarrow \text{3. r.k.}$$

$$N_{Rd} = A \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 2820 \cdot \frac{250}{1,1} = 641 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = \alpha_y \cdot W_{el,y} \cdot \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 1 \cdot 147000 \cdot \frac{250}{1,1} = 33,4 \text{ kNm}$$

$$\chi_y = ?$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_0}{A_g \cdot E}} = \frac{2500}{64,5 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2820 \cdot 250}{2820 \cdot 70000}} = 0,74 \rightarrow$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,74 - 0,1) + 0,74^2) = 0,84$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,84 + \sqrt{0,84^2 - 0,74^2}} = 0,81$$

$$\chi_z = ?$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_0}{A_g \cdot E}} = \frac{2500}{18,3 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2820 \cdot 250}{2820 \cdot 70000}} = 2,6 \rightarrow$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5(1 + 0,2(2,6 - 0,1) + 2,6^2) = 4,13$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{4,13 + \sqrt{4,13^2 - 2,6^2}} = 0,14$$

$\chi_{LT} = ?$

$$\lambda_{LT} = \frac{X \cdot L_{cr,z} / i_z}{\left[1 + Y \cdot \left(\frac{L_{cr,z} / i_z}{h / t_2}\right)^2\right]^{1/4}} = \frac{1,0 \cdot 2500 / 18,3}{\left[1 + 0,05 \cdot \left(\frac{2500 / 18,3}{160 / 11}\right)^2\right]^{1/4}} = 89,6$$

Opomba: Za vrednost parametrov X in Y smo v zgornjem izrazu vzeli konzervativni vrednosti $X=1,0$ in $Y=0,05$, kar dovoljuje SIST EN 1999-1-1. Postopek izračuna dejanskih vrednosti je prikazan v prejšnjem primeru.

$$\alpha = \frac{W_{eff}}{W_{el}} = 1$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \lambda_{LT} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot f_0}{E}} = 89,6 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 250}{70000}} = 1,71$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2\right] = 0,5 \left[1 + 0,2(1,71 - 0,4) + 1,71^2\right] = 2,09$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{2,09 + \sqrt{2,09^2 - 1,71^2}} = 0,30$$

Kontrola prereza:

$\omega_0 = 1$ za prerez brez lokaliziranih zvarov ali lukenj (SIST EN 1999-1-1, 6.2.9.1)

$\eta_0 = 1$ za dvojno simetrični odprti prerez (SIST EN 1999-1-1, 6.2.9.1)

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 \cdot N_{Rd}}\right)^{\eta_0} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 \cdot M_{y,Rd}} = \left(\frac{50}{1 \cdot 641}\right)^{1,0} + \frac{4}{1 \cdot 33,4} = 0,20 \leq 1$$

Kontrola upogibnega uklona:

- okoli osi y-y

$\xi_{yc} = 0,8$ za dvojno simetrični odprti prerez (SIST EN 1999-1-1, 6.3.3.1(1))

$\omega_x = \omega_0 = 1$

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}}\right)^{\xi_{yc}} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 \cdot M_{y,Rd}} = \left(\frac{50}{0,81 \cdot 1 \cdot 641}\right)^{0,8} + \frac{4}{1 \cdot 33,4} = 0,27 \leq 1$$

Ta kontrola ni merodajna, ker element ni bočno podprt.

- okoli osi z-z:

$\eta_c = 0,8$ za dvojno simetrični odprti prerez (SIST EN 1999-1-1, 6.3.3.1(1))

$\omega_x = 1$

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}}\right)^{\eta_c} = \left(\frac{50}{0,14 \cdot 1 \cdot 641}\right)^{0,8} = 0,63 \leq 1$$

Kontrola bočne zvrnitve:

$\omega_x = \omega_{xLT} = 1$ ker ni prečnih zvarov.

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}}\right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \omega_{xLT} \cdot M_{y,Rd}}\right)^{\gamma_c} \leq 1$$

$$\left(\frac{50}{0,2 \cdot 1,641}\right)^{0,8} + \left(\frac{4}{0,3 \cdot 1,33,4}\right)^{0,8} = 0,94 \leq 1$$

Ugotovimo, da je obtežba obravnavanega elementa v mejah, predpisanih v standardu Evrokod 9 (SIST EN 1999-1-1). Merodajna kontrola je kontrola bočne zvrnitve.

4 ZAKLJUČEK

Aluminij kot konstrukcijski gradbeni material predstavlja zanimivo izbiro v številnih zahtevnih okoliščinah, ko tradicionalni materiali ne nudijo zadostne odpornosti. Poleg praktičnih lastnosti, kot so npr. korozijska odpornost, nizka lastna teža in neomejene možnosti mehanskega preoblikovanja, velja omeniti tudi estetsko vrednost, ki jo je mogoče doseči z uporabo aluminija npr. v ovoju stavb. Vsekakor pa je zanimiva prednost aluminija tudi njegov popoln življenjski krog, ki omogoča gradnjo trajnostnih in okolju prijaznih objektov.

Kontrola nosilnosti aluminijastih konstrukcij zaradi nekaterih posebnosti materiala na prvi pogled deluje zapletena. V resnici je seveda zelo podobna analizi jeklenih konstrukcij. Glavne razlike v računu so predvsem posledica znatnih oslabitev v toplotno-vplivni coni varjenih profilov, za kar SIST EN 1999-1-1 vpelje dodatne faktorje. Nekoliko drugačna je tudi razvrstitev prečnih prereзов v razrede kompaktnosti, saj se pri vitkih prerezech sodelujoča površina prečnega prereza izračuna z zmanjšanjem debeline pločevine, sicer pa je princip enak kot pri jeklenih konstrukcijah po Evrokodu 3.

Z doslednim upoštevanjem vseh omejitev in pomanjkljivosti materiala lahko aluminij s pridom uporabimo kot alternativni gradbeni material, njegovo širšo uporabo pa seveda še vedno precej omejuje njegova višja cena v primerjavi z jeklom.

VIRI

Beg, D. 2010. Projektiranje jeklenih konstrukcij v skladu z Evrokodom 3 – kratek povzetek. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 113 str.

Boin, U. 2004. Collection of Aluminium From Buildings in Europe. A Study by Delft University of Technology. Bruselj, European Aluminium Association.

<http://greenbuilding.world->

aluminium.org/uploads/media/1256565286Delft_Brochure_and_TU_Delft_Report-1.pdf

(Pridobljeno 7. 8. 2016)

Bray, Lee E., 2016. Mineral Commodity Summaries 2016. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf> (Pridobljeno 15. 7. 2016).

Höglund, T., 2009. TALAT Lecture 2301. Design of Members. Bruselj, European Aluminium Association.

<http://core.materials.ac.uk/repository/eaa/talat/2301.pdf> (Pridobljeno 15. 7. 2016).

Müller, U., 2011. Introduction to Structural Aluminium Design. Dunbeath, Whittles Publishing: 182 str.

Paškulin, M. 2012. Vpliv sestave aluminijevih zlitin 5754, 5083 in 6082 na njihovo ceno in mehanske lastnosti. Diplomski naloga.. Nova Gorica, Univerza v Novi Gorici, Poslovno-tehniška fakulteta (samozaložba M. Paškulin): 62 str.

Prevc, M., 2013. Nosilne jeklene konstrukcije za skladiščne šotorske objekte. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Prevc): 157 str.

SIST EN 1999-1-1:2007. Evrokod 9: Projektiranje konstrukcij iz aluminijevih zlitin – 1-1. del: Splošna pravila za konstrukcije.

SIST EN 1993-1-1:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

The International Aluminium Institute, 2016. Primary Aluminium Production.

<http://www.world-aluminium.org/statistics/> (Pridobljeno 7. 8. 2016)

UC RUSAL, 2016. Aluminium History.

http://www.aluminiumleader.com/history/industry_history/ (Pridobljeno 7. 8. 2016)

UC RUSAL, 2016. How Aluminium Is Produced.

http://www.aluminiumleader.com/production/how_aluminium_is_produced/ (Pridobljeno 7. 8. 2016)

Wilquin, H., 2001. Aluminium Architecture: Construction and Details. Basel, Berlin, Boston.
Birkhäuser: 150 str.