

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Tin Hržić

Split, 2019.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

**Analiza zavarenog priključka nosač-stup u
alumijskim konstrukcijama**

Diplomski rad

Split, 2019.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Tin Hržić

BROJ INDEKSA: 671

KATEDRA: **Katedra za metalne i drvene konstrukcije**

PREDMET: Metalne konstrukcije II

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Analiza zavarenog priključka nosač-stup u aluminijskim konstrukcijama

Opis zadatka: Potrebno je izvršiti analizu zavarenog priključka nosač-stup u aluminijskim konstrukcijama. Kao osnovni materijal koristiti će se legura EN AW-6082 T6. U radu je potrebno primijeniti različite dijagrame, odnosno modele materijala.

U Splitu, 08. ožujka 2019.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof. dr. sc. Ivica Boko

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Doc. dr. sc. Ivo Andrić

Analiza zavarenog priključka nosač-stup u aluminijskim konstrukcijama

Sažetak:

U ovom diplomskom radu opisuje se nelinearni numerički proračun dvije varijante zavarenog priključka stup-greda provedene metodom konačnih elemenata. Kao osnovni materijal korištena je legura EN AW-6082 T6. Priključak je promatran u varijanti s zavarenim ukrutama aluminijskog stupa i bez istih. Korištena su dva modela materijala. Prvi je izveden iz važeće norme za aluminijske konstrukcije dok se drugi temelji na rezultatima eksperimenata drugih autora i kalibriran je zasebnim numeričkim proračunom. Iz rezultata proračuna konstruirani su dijagrami moment-rotacija za slučajeve različite geometrije i materijala priključka i izvršena je usporedba istih.

Ključne riječi:

aluminij, zona utjecaja topline, zavareni priključak nosač-stup, nelinearni proračun, materijalna nelinearnost, metoda konačnih elemenata

Analysis of welded girder-column joint in aluminium structures

Abstract:

In this graduation thesis, the nonlinear numerical calculation of two variants of welded column-beam joint is performed using the finite element method. Aluminium alloy EN AW-6082 T6 was used as the base material. The connection was observed in a variant with stiffener plates welded on aluminium column and without them. Two models of materials were used. The first is derived from the applicable standard for aluminum structures while other is based on the results of other authors testing and calibrated by a separate numerical calculation. From the results of the calculations, moment-rotation diagrams for different geometry and material properties of joint have been constructed and they are compared.

Keywords:

aluminium, heat affected zone, welded girder- column connection, nonlinear analysis, material nonlinearity, finite-element method

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1 O aluminiju.....	1
1.1.1 Općenito.....	1
1.1.2 Proizvodnja aluminija.....	3
1.1.3 Legure aluminija.....	5
1.1.4 Toplinska obrada aluminija i aluminijskih legura.....	9
1.1.5 Legura EN AW-6082 T6.....	11
1.2 Spojevi aluminijskih konstrukcija.....	15
1.2.1 Općenito.....	15
1.2.2 Zavarivanje aluminija	15
1.2.2.1 Općenito.....	15
1.2.2.2 Odabir elektroda za zavarivanje.....	18
1.2.2.3 Zona utjecaja topline.....	19
1.2.2.4 Rasprostranjenost zone utjecaja topline.....	21
1.2.3 Ostale tehnike spajanja aluminijskih konstrukcija.....	23
1.2.3.1 Spajanje aluminija mehaničkim spajalima.....	23
1.2.3.2 Lijepljenje aluminija	24
1.2.3.3 Hibrido spajanje.....	24
2. MODELI MATERIJALA.....	25
2.1 Općenito.....	25
2.2 Idealni elastoplastični model materijala (model materijala 1).....	25
2.2.1 Dijagram za osnovni materijal.....	25
2.2.2 Dijagram za HAZ.....	26
2.2.3 Dijagram za zavar.....	26
2.3 Modeli materijala izvedeni iz rezultata testova (model materijala 2)	27
2.3.1 Dijagram za osnovni materijal.....	28
2.3.2 Dijagram za HAZ.....	29
2.3.3 Dijagram za zavar.....	30
2.3.4 Numerički model za evaluaciju modela materijala.....	30
2.3.4.1 Geometrija numeričkog modela.....	31
2.3.4.2 Dijagrami materijala.....	32
2.3.4.3 Opterećenje.....	32

2.3.4.4 Ovisnost rezultata proračuna o mreži konačnih elemenata i zaključak o odabiru veličine konačnog elemenata.....	33
3. NUMERIČKI MODEL.....	37
3.1 Geometrija.....	37
3.1.1 Općenito.....	37
3.1.2 Statički sustav modela.....	37
3.1.3 Geometrija modela 1 – bez ukruta.....	38
3.1.4 Geometrija modela 2 – s ukrutama.....	39
3.2 Opterećenje.....	41
3.3 Ovisnost rezultata o mreži konačnih elemenata.....	41
3.3.1 Rezultati numeričkog modela1 – bez ukruta.....	45
3.3.2 Rezultati numeričkog modela2 – s ukrutama.....	47
3.4 Mjerodavni rezultati	48
3.4.1 Rezultati numeričkog proračuna.....	49
3.4.2 Dijagrami moment - kut zaokreta.....	53
4. ZAKLJUČAK.....	57
5. Literatura	58

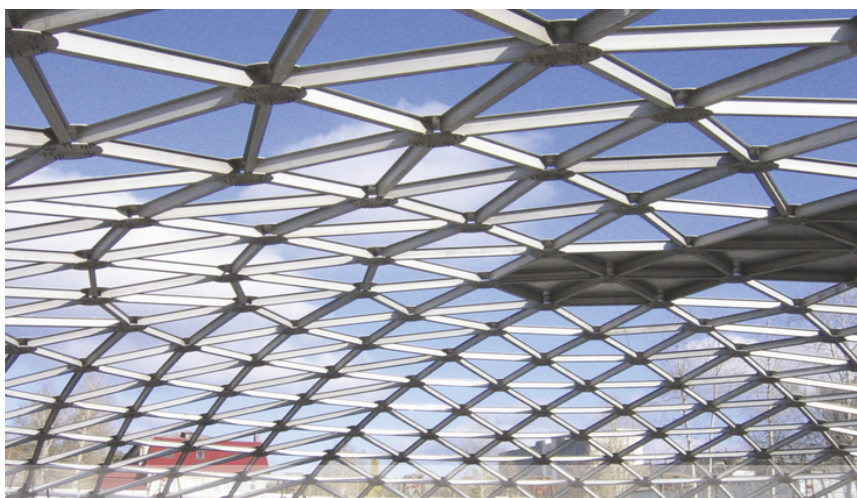
1. UVOD

1.1 O aluminiju

1.1.1 Općenito

Aluminij je metal koji ima kemijski simbol Al, atomski broj 13 i atomsku masu 27. Jezgra atoma aluminija sastoji se od 13 elektrona, 13 protona i 14 neutrona. Aluminij je metal koji je nakon kisika i silicija najzastupljeniji element u zemljinoj kori. Unatoč toj činjenici, postojanje ovog elementa utvrđeno je tek 1808. godine. Prvi komadi aluminija imali su cijenu veću od zlata, prvenstveno radi skupog procesa proizvodnje. U prirodi aluminij se ne nalazi u čistom stanju već u formi oksida, pomiješan sa oksidima željeza, slijca, vanadija i dr. [1].

Kovani aluminij u obliku legure je jako rastezljiv metal i struktura mu je jako slična strukturi čelika. Mehanička svojstva su generalno lošija od svojstava čelika. Aluminij je i nemagnetni metal odnosno nema svojstvo djelovanja privlačnom silom na feromagnetne materijale. Prednosti nad čelikom su prvenstveno manja gustoća te otpornost aluminija na atmosferske utjecaje (ne hrđa). Aluminij ima i prednost žilavosti na niskim temperaturama, odnosno nije sklon krutom lomu. Mehanička svojstva mu se poboljšavaju sa smanjenjem temperature.



Fotografija 1.1: aluminijska kupola kao krov spremnika za tekućine (u izgradnji) [2]

Aluminij i njegove legure podložni su utjecajima visokih temperatura. Toplinsko izduženje dvostruko mu je veće od čelika, a pad mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama je znatno brži i veći nego kod čelika. Isto tako događa se i degradacija svojstava u zoni utjecaja topline u okolini zavar. Aluminij je i podložniji zamoru u usporedbi s čelikom [3].

Čisti aluminij nije pogodan za nosivu konstrukciju tako da se u građevinarstvu koriste isključivo legure aluminija.

Osnovna svojstva aluminija i aluminijskih legura dana su u tablici 1.1:

Tablica 1.1: osnovna svojstva aluminija [4]

Talište	660 °C
Gustoća pri 20 °C	2700 kg/m ³
Toplinsko izduljenje	23·10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Specifični toplinski kapacitet	920 J/kg°C
Toplinska provodljivost	240 W/m°C
Modul elastičnosti	70 000 N/mm ²
Modul posmika	27 000 N/mm ²
Poissonov koeficijent	0,3

Smatra se da aluminijske konstrukcije mogu biti konkurentne u primjenama gdje su bitni sljedeći preduvjeti [1]:

- Mala specifična težina – omogućuje pojednostavljenje faza građenja, prijevoz potpuno okrupljenih komponenata, smanjenje opterećenja na temelje, uštedu energije za vrijeme izgradnje te smanjenje fizičkog rada.
- Otpornost na koroziju – formiranje sloja oksida na površini elemenata koji štiti sam materijal od degradacije smanjuje troškove održavanja.
- Funkcionalnost konstrukcijskih oblika profila – postupak ekstruzije omogućava projektiranje oblika poprečnog presjeka tako da se iskoristi u potpunosti. Ukruženi oblici mogu se dobiti bez zavarivanja te se oblikovanjem samih elemenata mogu izraditi učinkoviti sustavi spajanja.



Fotografija 1.2: lagani aluminijski pješački most koji se montira kao cjelina [5]

Konstrukcije koje najbolje odgovaraju za iskorištavanje ovih prednosti legura aluminija su [6]:

- Krovni sustavi velikih raspona kod kojih su stalna opterećenja dominantna, kao i geodetske kupole ili lagani krovovi tankova i sl.
- Konstrukcije smještene na udaljenim lokacijama gdje je cijena transporta ključni faktor i smanjenje mase značajno doprinosi smanjenju troškova. Na primjer stupovi dalekovoda koji se montiraju helikopterom i slično.
- Konstrukcije koje se nalaze u vlažnim i korozivnim sredinama, kao krovovi bazena, konstrukcije uz more i slično.
- Konstrukcije s pokretnim dijelovima kod kojih manja masa rezultira smanjenom cijenom sklopova za podizanje i sl.

1.1.2 Proizvodnja aluminija

Proizvodnja aluminija započinje dobivanjem glinice iz rude aluminijevih oksida. Pod rudom aluminija, s gledišta njezinog korištenja za dobivanje glinice, odnosno aluminija, podrazumijeva se prirodna sirovina koja ispunjava sljedeće uvjete [7]:

- ima visok sadržaj aluminijevog oksida Al_2O_3 koji omogućuje njezinu preradu po prihvatljivoj cijeni
- da je Al_2O_3 u njoj prisutan u takvom obliku da je omogućeno njegovo izdvajanje u čistom obliku
- da se u prirodi nalazi u obliku velikih rudnih tijela odnosno ležišta.

Uvažavajući navedeno, aluminijeve rude poredane po ovim zahtjevima su: boksiti, nefelini, aluniti, kaolini i gline. Boksiti su najvažnija ruda aluminija iz koje se danas dobiva skoro cjelokupna svjetska proizvodnja glinice i aluminija.

Boksit je polimineralna ruda sastavljena od minerala aluminija, željeza, silicija, titana, kalcija, magnezija i drugih. Porožan je, fine zrnate strukture, kompaktan i nepravilnog loma.

Glinica se dobiva mokrim postupkom pomoću NaOH. Boksit se prvo izlužuje s otopinom NaOH pri visokom tlaku i temperaturi pri čemu aluminij prelazi u otopinu u obliku aluminata.

Zatim se iz otopine taloži čist $\text{Al}(\text{OH})_3$ koji se kalcificira da bi se odstranila voda, te se prženjem u rotacijskoj peći dobiva konačni proizvod, glinica. Neizreagirane nečistoće iz boksita odstranjuju se u obliku ostatka koji se naziva crven mulj.

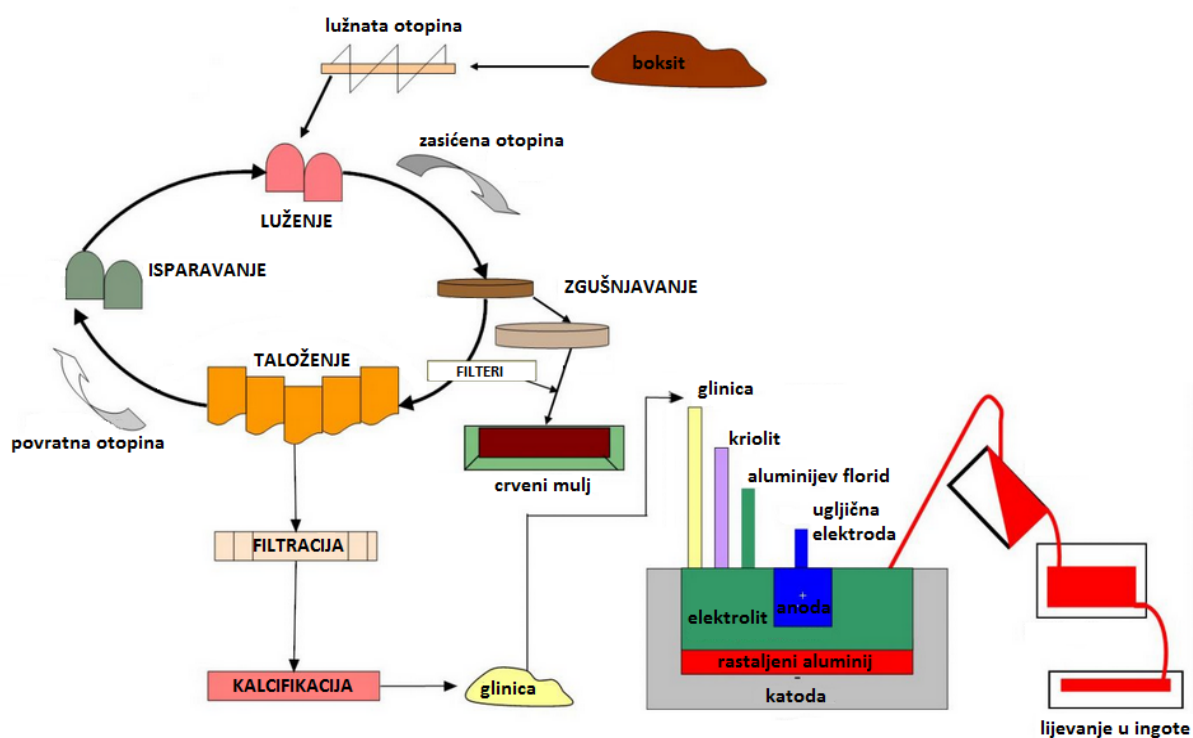
Čista glinica se onda podvrgava procesu elektrolize u rastaljenom kriolitu Na_3AlF_6 . Katode su najčešće izrađene od ugljena te lagano izgaraju i reagiraju s kisikom i fluorom iz elektrolita.

Aluminij se izlučuje na katodi i pada na dno kupke, a na anodi se oslobađa ugljični dioksid.

Sam kriolit ne sudjeluje u elektrolitičkom procesu nego pliva na površini i štiti aluminij od oksidacije. Tako nastaju određene količine plinova CO i CO₂, te plinoviti spojevi s fluorom.

Dobiveni aluminij drži se na visokim temperaturama nekoliko sati kako bi iz njega isparili udjeli silicija, titana, bakra i cinka. Najveću čistoću aluminija moguće je dobiti električnom rafinacijom (99,999%).

Ovako dobiveni aluminij lijeva se u kalupe da bi se dobile ingote. Kasnije se ingote, ili koriste za dobivanje profila od čistog aluminija, ili se ponovno tale u procesu proizvodnje aluminijских legura.



Crtež 1.1: dijagram proizvodnje aluminija [8]

1.1.3 Legure aluminija

Legiranjem aluminija sa legirnim elementima dobivaju se legure različitog kemijskog sastava i mehaničkih svojstava. Za legiranje aluminija nekoliko se elemenata pokazalo pogodnima. To su magnezij (Mg), mangan (Mn), cink (Zn), bakar (Cu) i silicij (Si) koji se koriste ili pojedinačno ili u kombinaciji više legirnih elemenata.

Postoje dvije vrste legura koje se dijele prema načinu prerade. To su legure za gnječenje (kovke legure) i legure za lijevanje.

Legure za gnječenje pogodne su za obradu kovanjem, istiskivanjem, valjanjem i slično.

Prema normama [9][10] gnječive ili kovke aluminijske legure se označavaju kako slijedi:

Tablica 1.2: označavanje glavnih skupina kovkih aluminijskih legura

Glavni legirni element	Brojčana oznaka legure	Kemijski simbol legure
Aluminij (Al)	EN AW 1xxx	EN AW Al
Bakar (Cu)	EN AW 2xxx	EN AW AlCu
Mangan (Mg)	EN AW 3xxx	EN AW AlMn
Silicij (Si)	EN AW 4xxx	EN AW AlSi
Magnezij (Mg)	EN AW 5xxx	EN AW AlMg
Magnezij i silicij (Mg i Si)	EN AW 6xxx	EN AW AlMgSi
Cink (Zn)	EN AW 7xxx	EN AW AlZn
Ostali elementi (Željezo Fe)	EN AW 8xxx	EN AW AlFe

Gnječive aluminijske legure ispred brojčane oznake imaju prefiks EN koji je oznaka za europsku normu. Iza stoji oznaka A (aluminij), odvojena praznim mjestom, te iza nje oznaka W (wrought) što znači da je legura gnječiva.

Skupina 1xxx označava čisti aluminij s minimalnom čistoćom od 99,00% i više. Drugi broj označava promjene u granicama dozvoljenih nečistoća. Ako je drugi broj različit od 0 označava se potreba za dodatnom provjerom nečistoća u leguri. Posljednja dva broja označavaju postotak aluminija u leguri iznad 99,00%.

Drugi broj u oznakama legure aluminija je uvijek 0 kada se radi o izvornoj leguri. Ako se radi o modifikaciji iste, broj se mijenja. Posljednja dva broja nemaju značenja već služi za raspoznavanje legura iz iste grupe.

Legure s dodatkom bakra, oznake EN AW 2xxx, nemaju dobra antikorozivna svojstva i loše se zavaruju. Legure oznake EN AW 3xxx sadrže mangan koji poboljšava mehanička svojstva legure, povećava otpornost na koroziju i povišava temperaturu rekristalizacije. Silicij, element koji se dodaje u legure oznake EN AW 4xxx, utječe na snižavanje temperature tališta bez pojave krtih lomova. Legure sa dodatkom magnezija, oznake EN AW 5xxx se dobro zavaruju i imaju dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama. Najzastupljenije legure u građevinarstvu su legure oznake EN AW 6xxx s dodatkom silicija i magnezija. Dobro se zavaruju i oblikuju plastičnim deformiranjem te posjeduju dobra antikorozivna svojstva. Legure s cinkom i magnezijem oznake EN AW 7xxx imaju najbolja mehanička svojstva ali su osjetljivi na koroziju i mogu se zavarivati samo pod posebnim uvjetima.

Tablica 1.3: usporedba općih značajki i svojstava konstrukcijskih kovkih legura [4]

Legura		Oblikovanje i temperiranje normirani su za					Čvrstoća	Razredba trajnosti ^{a)}	Zavarljivost	Dekorativna anodizacija
EN-oznaka	Lim, trak i ploča	Istisnuti proizvodi			Hladno vučeni proizvodi	Kovanje				
		šipka	cijev	profil						
EN AW-3004	○	–	–	–	–		III/IV	A	I	I
EN AW-3005	○	–	–	–	–		III/IV	A	I	I
EN AW-3103	○	○	○	○	○		III/IV	A	I	II
EN AW-5005	○	○	○	○	○		III/IV	A	I	I
EN AW-5049	○	–	–	–	–		II/III	A	I	I/II
EN AW-5052	○	○	○ x)	○ x)	○		II/III	A	I	I/II
EN AW-5083	○	○	○ x)	○ x)	○	○	I/II	A	I	I/II
EN AW-5454	○	○	○ x)	○ x)	–		II/III	A	I	I/II
EN AW-5754	○	○	○ x)	○ x)	○	○	II/III	A	I	I/II
EN AW-6060	–	○	○	○	○		II/III	B	I	I
EN AW-6061	–	○	○	○	○		II/III	B	I	II/III
EN AW-6063	–	○	○	○	○		II/III	B	I	I/II
EN AW-6005A	–	○	○	○	–		II	B	I	II/III
EN AW-6106	–	–	–	○	–		II/III	B	I	I/II
EN AW-6082	○	○	○	○	○	○	I/II	B	I	II/III
EN AW-7020	○	○	○	○	○		I	C	I	II/III
EN AW-8011A	○	–	–	–	–	–	III/IV	B	II	III/IV

Legenda:

○ normirano u području temperiranja; dostupno sa skladišta kao poluproizvod koji treba kontrolirati za svaki proizvod i dimenziju

– nije normirano

x) samo jednostavni, puni profili (bešavni proizvodi savijani preko trna)

I odlična

II dobra

III zadovoljavajuća

IV slaba

NAPOMENA: Ove naznake služe samo kao smjernica, a svako se razvrstavanje primjenjuje samo za razmatrani stupac jer se može mijenjati s temperiranjem.

^{a)} Vidjeti tablicu 3.1a.

Tablica 1.4: kovke aluminijske legure za konstrukcije [4]

Oznaka legure		Oblik proizvoda	Razredba trajnosti ³⁾
Brojčana	Kemijski simboli		
EN AW-3004	EN AW-AlMn1Mg1	SH, ST, PL	A
EN AW-3005	EN AW-AlMn1Mg0,5	SH, ST, PL	A
EN AW-3103	EN AW-Al Mn1	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B	A
EN AW-5005 / 5005A	EN AW-AlMg1(B) / (C)	SH, ST, PL	A
EN AW-5049	EN AW-AlMg2Mn0,8	SH, ST, PL	A
EN AW-5052	EN AW-Al Mg2,5	SH, ST, PL, ET ²⁾ , EP ²⁾ , ER/B, DT	A
EN AW-5083	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7	SH, ST, PL, ET ²⁾ , EP ²⁾ , ER/B, DT, FO	A ¹⁾
EN AW-5454	EN AW-Al Mg3Mn	SH, ST, PL, ET ²⁾ , EP ²⁾ , ER/B	A
EN AW-5754	EN AW-Al Mg3	SH, ST, PL, ET ²⁾ , EP ²⁾ , ER/B, DT, FO	A
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	ET, EP, ER/B, DT	B
EN AW-6061	EN AW-Al Mg1SiCu	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B, DT	B
EN AW-6063	EN AW-Al Mg0,7Si	ET, EP, ER/B, DT	B
EN AW-6005A	EN AW-Al SiMg(A)	ET, EP, ER/B	B
EN AW-6082	EN AW-Al Si1MgMn	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B, DT, FO	B
EN AW-6106	EN AW-AlMgSiMn	EP	B
EN AW-7020	EN AW-Al Zn4,5Mg1	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B, DT	C
EN AW-8011A	EN AW-AlFeSi	SH, ST, PL	B
Legenda: SH – lim (EN 485) ST – trak (EN 485) PL – ploča (EN 485) ET – istisnuta cijev (EN 755) EP – istisnuti profili (EN 755)		ER/B – istisnuta šipka (EN 755) DT – vučena cijev (EN 754) FO – otkivci (EN 586) ¹⁾ vidjeti dodatak C: točka C2.2.2(2) ²⁾ samo jednostavni, puni (otvoreni) vučeni profili ili cijevi debelih stijenki oblikovane s pomoću trna (bešavne) ³⁾ vidjeti 4. poglavlje, Dodaci C i D	

Legure za lijevanje namijenjene su izradi proizvoda različitim postupcima lijevanja kao: slobodno lijevanje, lijevanje u kokile, lijevanje u pijesku, lijevanje pod tlakom, niskotlačno lijevanje i druge. Prikaz oznaka glavnih skupina aluminijskih legura za lijevanje dan je u tablici 1.5 [11]:

Tablica 1.5: označavanje najučestalijih glavnih skupina lijevanih aluminijskih legura

Glavni legirni element	Brojčana oznaka legure
Bakar (Cu)	EN Ax 2xxx
Silicij (Si)	EN Ax 3xxx
Magnezij (Mg)	EN Ax 4xxx
Cink (Zn)	EN Ax 5xxx

Oznaka lijevanih legura sastoji se od prefiksa EN (europska norma) iza koje, odvojeno praznim mjestom stoji oznaka A (aluminij). Slovna oznaka iza slova A označava oblik proizvoda i može biti: B – legirni ingot namijenjen pretaljivanju, C – odljevci, M – glavne predlegure.

Prvi broj u oznaci legure označava glavni legirni element. Drugi broj pokazuje grupu legure, treći može biti bilo koji, a četvrti je uvijek 0. Peti broj je 0 osim za legure namijenjene upotrebi u zrakoplovnoj industriji. Tablica 1.6 prikazuje oznake lijevanih legura i razredbu trajnosti za iste [12][13].

Tablica 1.6: legure od lijevanog aluminija za konstrukcije

Oznaka legure		Razredba trajnosti ¹⁾
Brojčana	Kemijski simboli	
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3	B
EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6	B
EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	B
EN AC-43300	EN AC-AlSi9Mg	B
EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)	B
EN AC-51300	EN AC-Al Mg5	A

¹⁾ Vidjeti 4. poglavlje, Dodatke C i D

Tablica 1.7: usporedba značajki lijevanja i drugih općih svojstava [4]

Legura za lijevanje	Oblik lijevanja		Sposobnost za lijevanje	Čvrstoća	Razredba trajnosti	Dekorativna anodizacija	Zavarljivost
Oznaka	Jednokratni kalup (pijesak)	Potresni ili stalni kalup					
EN AC-42100		●	II	II/III	B	IV	II
EN AC-42200		●	II	II	B	IV	II
EN AC-43300	●	●	I	II	B	V	II
EN AC-43000		●	I/II	IV	B	V	II
EN AC-44200	●	●	I	IV	B	V	II
EN AC-51300	●	●	III	IV	A	I	II

Legenda:
 I odlična
 II dobra
 III zadovoljavajuća
 IV slaba
 V ne preporučuje se
 ● naznačuje preporučenu metodu lijevanja za nosive dijelove svake legure.

NAPOMENA 1: Ove naznake služe samo kao smjernica, a svako se razvrstavanje primjenjuje samo za razmatrani stupac.
 NAPOMENA 2: Svojstva se mijenjaju sa stanjem lijevanja.

1.1.4 Toplinska obrada aluminija i aluminijских legura

Toplinska obrada legura aluminija može se podijeliti na dvije grupe:

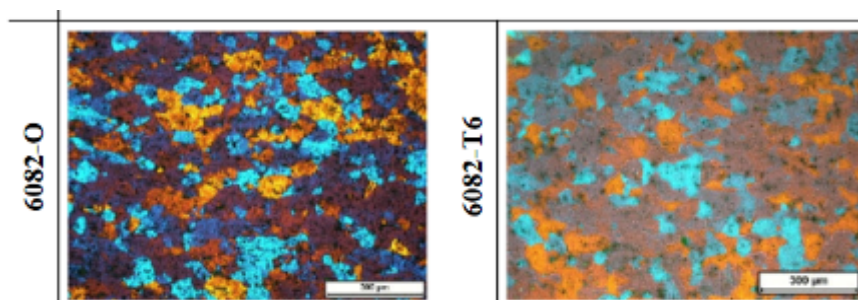
- omekšanjem
- očvršćivanjem

Omekšanje nastaje kao posljedica žarenja nakon plastične deformacije a s ciljem vraćanja duktilnosti materijalu. Žarenje u cilju omekšanja je vraćanje metala u ravnotežno stanje. Žarenjem metal teži ka stanju najmanjih unutarnjih naprezanja. Mijenjaju mu se mehanička svojstva u smjeru smanjenja čvrstoće, tvrdoće i granice elastičnosti, a povećavaju se deformacijska svojstva.

Sam proces se sastoji od zagrijavanja metala do određene temperature a zatim sporog hlađenja do atmosferske. Finalna svojstva žarenog materijala ovise o temperaturama u procesu i vremenu trajanja istog.

Ovaj postupak se najčešće koristi nakon hladne deformacije materijala, uslijed koje dolazi do porasta mehaničkih svojstava materijala ali pada žilavost, da bi se povratila duktilnost.

Toplinsko očvršćivanje je proces koji osigurava porast čvrstoće i tvrdoće metala. Sastoji se od tri faze. Prva faza je rastvorno žarenje. Metal se zagrijava na određenu temperaturu na kojoj se zadržava izvjesno vrijeme. Zadržavanjem aluminija na povišenoj temperaturi (450°C – 550°C) nastaje rastvaranje legiranih elemenata. Legirani elementi se ugrađuju u kristalnu rešetku aluminija zbog čega će on imati poboljšana svojstva. Međutim kruta otopina stvorena zagrijavanjem na visokim temperaturama može se sačuvati samo naglim gašenjem čime se sprječava izlučivanje rastvorenih komponenata [1].



Fotografija 1.3: kristalna struktura legure prije i nakon procesa toplinske obrade [14]

Gašenje je druga faza procesa toplinskog očvršćivanja. Način gašenja, brzina i vrsta rashladnog medija uvelike utječu na krajnji rezultat.

Nakon gašenja materijal postupno dozrijeva, prirodno ili umjetno. Prirodno dozrijevanje podrazumijeva da s očvršćavanjem izlučivanjem provodi na sobnoj temperaturi.

Kod umjetnog, ono se provodi na povišenoj temperaturi određeno vrijeme, nakon čega se materijal hladi do sobne temperature. Treba obratiti pozornost na duljinu trajanja umjetnog dozrijevanja jer nakon nekog vremena (specifično za svaku leguru pojedinačno) dolazi do rapidnog gubitka mehaničkih svojstava.

Osim ova dva procesa postoje i njihove podvrste za specifične namjene. To su homogenizacija, stabilizacija i popuštanje. Homogenizacija se provodi žarenjem na visokoj temperaturi ali prije plastičnog deformiranja. Koristi se za postizanje ravnotežnog stanja legure kod normalnih temperatura.

Stabilizacijom se zaustavlja vremenska promjena svojstava za hladno deformirane legure.

Popuštanje je postupak zagrijavanja metala na umjerenu temperaturu i dugo zadržavanje na istoj, a sa ciljem eliminiranja unutarnjih naprezanja prouzrokovanih naglim hlađanjem

Stanje aluminija, ovisno o stanju toplinske obrade, mogu biti [15]:

- F – proizvedeno stanje, ne postoji čvrste granice za mehanička svojstva
- O – Meko žareno stanje. Iza oznake slijedi jedan broj
- H – Označava stanje materijala očvrsloga mehaničkom deformacijom nakon koje može biti provedeno žarenje. Stanja H primjenjuju se za očvrslu leguru aluminija koje nisu toplinski očvrsnute odnosno za obitelji legura 1xxx, 3xxx i 5xxx. Iza oznake slijede dva broja. Prvi označava vrstu toplinske obrade a drugi daje stupanj hladnog oblikovanja.
- W – Rastvorno žareno stanje
- T – Proizvodi koji svoje stanje postižu toplinskom obradom sa ili bez hladnog očvršćivanja. Ovo stanje primjenjuje se isključivo za legure obitelji 2xxx, 6xxx i 7xxx, odnosno za legure koje su toplinski očvrsnute. Iza oznake stoji jedan ili više brojeva koji označavaju redosljed različitih postupaka.

Svako stanje ima svoja podstanja, takozvani temperi aluminija. Svaki temper je označen slovom koje označava vrstu toplinske obrade i brojevima koji pokazuju redosljed procesa.

Na primjer oznaka T354 znači da je element rastvorno žaren, opušten kroz hladno ravnanje u završnom ukovnju i prirodno dozrijevan.

1.1.5 Legura EN AW-6082 T6

O uvom radu kao osnovni materijal korištena je legura EN AW-6082 T6 zbog čega je ista detaljnije obrađena. Legirni elementi ove legure su magnezij, silicij i mangan.

Legura EN AW-6082 jedna je od najčešće korištenih legura pogodnih za toplinsku obradu i glavna je konstrukcijska legura za primjenu u zavarenim ili nezavarenim konstrukcijama.

Leguru odlikuje velika čvrstoća, a dostupna je u obliku punih šupljih istisnutih profila, cijevi, ploča, limova i otkivaka. Ovo je relativno nova legura.

Dodatak veće količine magnezija kontrolira zrnastu strukturu metala što rezultira legurom veće čvrstoće. Ova legura ima najveću čvrstoću u svojoj grupi. Legura se koristi za izradu rešetkastih sustava, mostova, dizalica, transportnih sredstava i općenito u područjima upotrebe kod kojih se u materijalu javljaju veća naprezanja.

EN AW-6082 ima vrlo dobro svojstvo zavarljivosti. Kao ispunu preporuča se koristiti leguru 4043 ili 5356.

Otpornost na koroziju ove legure je dosta velika zbog dominantnog udjela magnezija kao legirajućeg elementa. Magnezij povećava otpornost aluminijskih legura alkalnim otopinama koje tvore vapno, beton i natrijev karbonat. Isto tako sadržaj bakra, kao elementa koji najviše snižava otpornost na koroziju, je jako mali.

Sastav legure EN AW-6082 prema normi HRN EN 573-3:2014 [16] dan je u tablici 1.8:

Tablica 1.8: kemijski sastav legure EN AW-6082

Element	Udio [%]
Silicij (Si)	0,7-1,3
Magnezij (Mg)	0,6-1,2
Mangan (Mn)	0,4-1,0
Željezo (Fe)	≤0,5
Krom (Cr)	≤0,25
Cink (Zn)	≤0,20
Titan (Ti)	≤0,10
Bakar (Cu)	≤0,10
Ostali (pojedinačno)	≤0,05
Ostali (ukupno)	≤0,15
Aluminij (Al)	ostatak

Oznaka za leguru EN AW-6082 istovjetna je oznakama iz drugih normi:

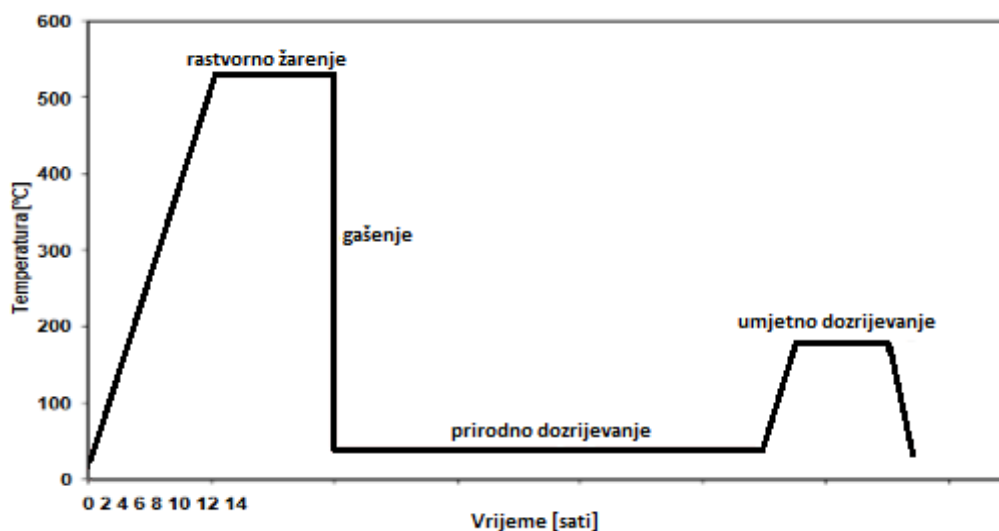
- AA6082
- HE30 – British standard
- ISO: Al Si1MgMn - Međunarodna organizacija za standardizaciju
- A96082 - UNS broj (Sjeverna Amerika)

Oznaka T6 je oznaka za temperiranje aluminija. Znači da je element rastvorno žaren i umjetno dozrijevan.

Element se prvo grije na 530°C i drži na toj temperaturi 24 sata. To dovodi do otapanja legiranih elemenata koji se onda ugrađuju u matricu aluminija. Postojanje ovih elemenata u matrici aluminija povećava čvrstoću legure. Međutim rastvoreni elementi su zarobljeni unutar rešetke i narušavaju red između kliznih ravnina i pravaca te je materijal na sobnoj temperaturi nestabilan u ovakvom stanju.

Da bi se održala dobivena kristalna struktura legure potrebno je provesti postupak gašenja. Element se ubacuje u rashladni medij i dolazi do kristalizacije.

Nakon procesa rastvornog žarenja element se podvrgava procesu umjetnog starenja. Temperatura mu se povećava na oko 160°C te se na istoj održava oko 18 sati. Tada se prestaje sa zagrijavanjem i materijal se prirodno hladi na sobnu temperaturu. Ponovno zagrijavanje dovodi do povećanja čvrstoće materijala ali je duktilnost manja. Na crtežu 1.2 prikazan je dijagram temperature elementa prilikom toplinske obrade.



Crtež 1.2: promjena temperature materijala tijekom procesa toplinske obrade [14]

U sljedećim tablicama dana su zahtjevana mehanička svojstva legure ovisno o vrsti proizvoda, debljini elemenata i temperiranju [4]:

Tablica 1.9: karakteristične vrijednosti dogovorne granice popuštanja pri trajnoj deformaciji od $0,2\% f_0$, vlačne čvrstoće f_u (za nezavavene materijale i za HAZ), minimalno izduljenje A_{50} i razred izvijanja za aluminijsku leguru EN AW-6082 za otkivke

Legura EN-AW	Temperiranje	Debljina do mm	Smjer	f_0	f_u	$f_{0,HAZ}^{1)}$	$f_{u,HAZ}^{1)}$	$A^{3)}$ %	Razred izvijanja
				N/mm ²					
6082	T6	100	uzdužni (L)	260	310	125 ²⁾	185 ²⁾	6	A
			poprečni (T)	250	290			5	A

¹⁾ $f_{0,HAZ}$ i $f_{u,HAZ}$ proračunati u skladu s izrazima (6.13) i (6.14)

²⁾ Za debljine veće od 15 mm (zavarivanje MIG) ili 6 mm (zavarivanje TIG) vidjeti tablicu 3.2.b, fusnotu 4).

³⁾ $A = A_{5,65}^{f_0}$

Tablica 1.10: karakteristične vrijednosti dogovorne granice popuštanja pri trajnoj deformaciji od $0,2\% f_0$, vlačne čvrstoće f_u (za nezavavene materijale i za HAZ), minimalno izduljenje A_{50} , faktori smanjenja $\rho_{0,HAZ}$ i $\rho_{u,HAZ}$ za HAZ, razred izvijanja i eksponent n_p , za aluminijsku leguru EN AW-6082, za istisnute profile, cijevi i šipke i za vučene cijevi

Legura EN-AW	Oblik proizvoda	Temperiranje	Debljina <i>t</i> mm ^{1) 3)}	<i>f</i> ₀ ¹⁾	<i>f</i> _u ¹⁾	<i>A</i> ^{5) 2)} %	<i>f</i> _{0,HAZ} ⁴⁾	<i>f</i> _{u,HAZ} ⁴⁾	Faktor HAZ ⁴⁾		BC ⁶⁾	<i>n</i> _p ⁷⁾
				N/mm ²			N/mm ²		<i>ρ</i> _{0,HAZ}	<i>ρ</i> _{u,HAZ}		
6082	EP,ET,ER/B	T4	<i>t</i> ≤ 25	110	205	14	100	160	0,91	0,78	B	8
	 EP 	T5	<i>t</i> ≤ 5	230	270	8	125	185	0,54	0,69	B	28
	 EP  ET	T6	<i>t</i> ≤ 5	250	290	8	125	185	0,50	0,64	A	32
			5 < <i>t</i> ≤ 15	260	310	10			0,48	0,60	A	25
	ER/B	T6	<i>t</i> ≤ 20	250	295	8			0,50	0,63	A	27
			20 < <i>t</i> ≤ 150	260	310	8			0,48	0,60	A	25
	DT	T6	<i>t</i> ≤ 5	255	310	8			0,49	0,60	A	22
			5 < <i>t</i> ≤ 20	240	310	10			0,52	0,60	A	17

Legenda:
EP istisnuti profili EP/O istisnuti otvoreni profili
EP/H istisnuti šuplji profili ET istisnuta cijev
ER/B istisnute šipke DT vučena cijev

1) Ako su vrijednosti označene masno, smiju se dopustiti veće debljine i/ili veća mehanička svojstva za neke oblike, vidjeti norme EN i prEN popisane u točki 1.2.3.2. Tada se za vrijednosti *R*_{p0,2} i *R*_m smiju uzeti *f*₀ i *f*_u. Pri upotrebi takvih većih vrijednosti odgovarajuće faktore HAZ-a *ρ* treba proračunati u skladu s izrazima (6.13) i (6.14) uz iste vrijednosti *f*_{0,HAZ} i *f*_{u,HAZ}.

2) Ako su vrijednosti minimalnoga izduljenja označene masno, smiju se za neke oblike ili debljine uzeti veće minimalne vrijednosti.

3) U skladu s normom EN 755-2:2008 primjenjuje se ovo pravilo: "Ako se poprečni presjek profila sastoji od različitih debljina koje potpadaju u više skupina određenih vrijednosti mehaničkih svojstava, najmanju određenu vrijednost treba smatrati valjanom za cijeli poprečni presjek profila." Moguća je iznimka, pa se smije upotrijebiti najveća dana vrijednost ako proizvođač može podržati tu vrijednost odgovarajućim certifikatom o osiguravanju kvalitete.

4) Vrijednosti HAZ-a vrijede za zavarivanje MIG i debljinu do 15 mm. Za zavarivanje TIG za legure s očvršćenjem (3xxx i 5xxx) do 6 mm vrijede iste vrijednosti, ali za zavarivanje TIG ostarene legure (6xxx i 7xxx) i debljine do 6 mm vrijednosti HAZ-a treba pomnožiti faktorom 0,8, a isto vrijedi i za faktore *ρ*. Za veće debljine – osim ako nema drugih podataka – vrijednosti HAZ-a i faktora *ρ* treba još smanjiti faktorom 0,8 za ostarene legure (6xxx i 7xxx), a faktorom 0,9 za legure s očvršćenjem (3xxx, 5xxx i 8011A). Ta se smanjenja ne odnose na temperiranje O.

5) *A* = *A*_{5,65*f*₀}

6) BC = razred izvijanja, vidjeti točke 6.1.4.4, 6.1.5 i 6.3.1.

7) Vrijednost *n* u Ramberg-Osgoodovu izrazu za plastični proračun. Primjenjuje se samo zajedno s popisanim vrijednošću *f*₀ (= minimalnom normiranom vrijednošću).

 (izbrisani tekst)

Tablica 1.11: karakteristične vrijednosti dogovorne granice popuštanja pri trajnoj deformaciji od 0,2% f_0 , vlačne čvrstoće f_u (za nezavavene materijale i za HAZ), minimalno izduljenje A_{50} , faktori smanjenja $\rho_{0,haz}$ i $\rho_{u,haz}$ za HAZ, razred izvijanja i eksponent n_p , za aluminijsku leguru EN AW-6082, za limove, trake i ploče

Legura EN-AW	Temperiranje ¹⁾	Debljina mm ¹⁾	f_0 ¹⁾	f_u	A_{50} ^{1) 6)}	$f_{0,haz}$ ²⁾	$f_{u,haz}$ ²⁾	Faktor HAZ ²⁾		BC ⁴⁾	n_p ^{1), 5)}
			N/mm ²		%	N/mm ²		$\rho_{0,haz}$ ¹⁾	$\rho_{u,haz}$		
6082	T4 / T451	≤ 12,5	110	205	12	100	160	0,91	0,78	B	8
	T61/T6151	≤ 12,5	205	280	10	125	185	0,61	0,66	A	15
	T6151	12,5 < t ≤ 100	200	275	12 ³⁾			0,63	0,67	A	14
	T6/T651	≤ 6	260	310	6			0,48	0,60	A	25
		6 < t ≤ 12,5	255	300	9			0,49	0,62	A	27
	T651	12,5 < t ≤ 100	240	295	7 ³⁾			0,52	0,63	A	21

¹⁾ Ako su u jednome retku navedena dva (tri) temperiranja, temperiranja odvojena s " / " imaju različite tehnološke vrijednosti, a ako su odvojena s " / ", imaju iste vrijednosti. (Postoje razlike između temperiranja s obzirom na f_0 , A i n_p .)
²⁾ Vrijednosti HAZ-a vrijede za zavarivanje MIG i debljine do 15 mm. Za zavarivanje TIG za legure s očvršćenjem (3xxx, 5xxx i 8011A) do 6 mm primjenjuju se iste vrijednosti, ali za zavarivanje TIG ostarijelih (6xxx i 7xxx) i debljine do 6 mm vrijednosti HAZ-a treba pomnožiti faktorom 0,8, a istim faktorom treba pomoći faktore ρ . Za veće debljine – osim ako nema drugih podataka – vrijednosti HAZ-a i faktora ρ treba još smanjiti faktorom 0,8 za ostarijele legure (6xxx i 7xxx), a faktorom 0,9 za legure s očvršćenjem (3xxx, 5xxx i 8011A). Ta se smanjenja ne odnose na temperiranje O.
³⁾ Osniva se na A ($= A_{5,85\sqrt{A_0}}$), a ne na A_{50} .
⁴⁾ BC = razred izvijanja, vidjeti točke 6.1.4.4, 6.1.5 i 6.3.1.
⁵⁾ Vrijednost n u Ramberg-Osgoodovu izrazu za plastični proračun. Primjenjuje se samo zajedno s popisanom vrijednošću f_0 .
⁶⁾ Naznačene vrijednosti minimalnog izduljenja ne primjenjuju se na cijeli raspon danih debljina, nego uglavnom na tanje materijale. Pojediniosti vidjeti u normi EN 485-2.

Vrijednosti $f_{0,haz}$ i $f_{u,haz}$ dane u tablicama 1.9, 1.10 i 1.11 vrijede nakon niže navedenog vremena poslije provedenog procesa zavarivanja, uz uvjet da je materijal držan na temperaturi koja nije niža od 10°C:

- legure nizova 6xxx – 3 dana
- legure nizova 7xxx – 30 dana

Ako je materijal držan na temperaturi nižoj od 10°C nakon zavarivanja, vrijeme obnove svojstava će se produljiti.

Stupanj degradacije određuje se pomoću vrijednosti $f_{0,haz}$ i $f_{u,haz}$ danim u tablicama 1.9, 1.10 i 1.11 kao za osnovni materijal ili smanjenjem pretpostavljene površine poprečnog presjeka na kojoj djeluju naprezanja pomoću faktora $\rho_{0,haz}$ i $\rho_{u,haz}$.

1.2 Spojevi aluminijskih konstrukcija

1.2.1 Općenito

Tehnike koje se primjenjuju za spajanje konstruktivnih cjelina od aluminijskih legura su:

- zavarivanje
- spajanje mehaničkim spajalima (različite vrste vijaka i zakovice)
- lijepljenje (adhezivno povezivanje)
- hibridno spajanje

1.2.2 Zavarivanje aluminija

1.2.2.1 Općenito

Zavarivanje se definira kao spajanje materijala upotrebom topline. Toplina se najčešće generira električnom strujom ili trenjem.

Prednosti zavarenih aluminijskih konstrukcija su ušteda u radu i ušteda u materijalu (primjerice za mehanički spojene konstrukcije masa priključaka je oko 10% ukupne mase konstrukcije, a varenjem se taj omjer smanjuje na oko 4%), čime se smanjuju troškovi gradnje. Najveći nedostatak procesa zavarivanja aluminijskih konstrukcija je potreba za kontroliranim uvjetima u zoni zavarivanja da bi zavar bio zahtjevane kvalitete. Tražene uvjete je, upotrebom trenutno dostupnih tehnologija, moguće osigurati samo u radionicama. Spajanje aluminija na mjestu ugradnje moguće je vršiti isključivo mehaničkim spojnim sredstvima ili lijepljenjem.

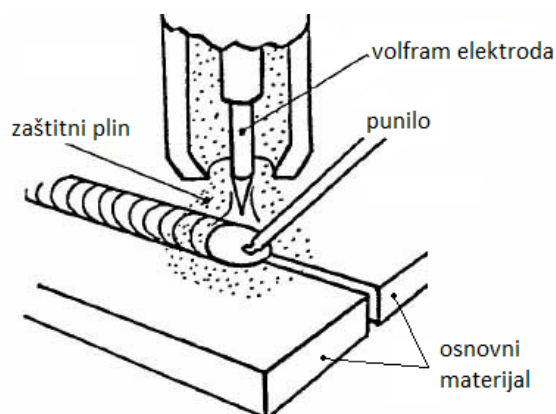


Fotografija 1.4: zavar aluminija [17]

Postupci zavarivanja koji se najčešće koriste u radionicama pri izradi aluminijskih konstrukcija su:

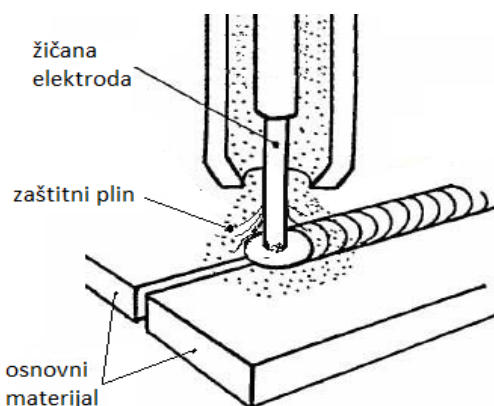
- plinsko zavarivanje
- elektrolučno zavarivanje (elektrode)
- zavarivanje pod zaštitom inertnog plina s trajnom elektrodom (TIG postupak) ili potrošnom elektrodom (MIG postupak)
- lasersko zavarivanje
- zavarivanje trenjem

Plinsko i elektrolučno zavarivanje, postupci koji se najviše primjenjuju kod izrade čeličnih konstrukcija, ne koriste se u velikom obimu u aluminijskim konstrukcijama zbog lošije kvalitete pogotovo u pogledu osjetljivosti na pogreške. Najveća posebnost varenja aluminija u odnosu na čelik je da je potrebno osigurati da rastaljeni metal u varu ne dođe u doticaj s kisikom iz zraka jer bi to dovelo do stvaranja sloja oksida koji onda ostaje kao trajno loše mjesto u varu.



Crtež 1.3: Postupak TIG zavarivanja [18]

Elektrolučna zavarivanja pod zaštitom plina (TIG i MIG) najraširenije su tehnike zavarivanja elemenata aluminijskih konstrukcija koje se učinkovito koriste u svakodnevno u praksi. Razlika TIG i MIG zavarivanja je u korištenju različitog tipa elektrode. Tijekom TIG zavarivanja elektro-luk se održava između volfram elektrode i aluminija koji se vari. Elektroda i rastaljeni bazni metal zaštićeni su mlazom inertnog plina (argon, helij), a dodatni materijal (punilo) se dodaje ručno. Kod MIG zavarivanja elektro-luk se formira između potrošne žičane elektrode, koja se strojno povlači sa namotaja i dozira, i aluminija koji se zavaruje.



Crtež 1.4: Postupak MIG zavarivanja [18]

Zavarivanje TIG postupkom generira manje topline što znači da je penetracija vara manja. Stoga norma HRN EN 1999-1-1 [4] definira da se ovaj postupak koristi samo za elemente debljine $t \leq 6\text{mm}$ i za popravke postojećih konstrukcija. Zavarivanje MIG postupkom moguće je za sve debljine limova.

Nelegirani aluminij i većina aluminijskih legura potpuno su podobne za zavarivanje, ali treba imati na umu da se različite legure ponašaju različito u zoni zavora (zona utjecaja topline).

Kvaliteta zavora ovisi o više parametara:

- odabir ispravnog postupka zavarivanja
- jakost struje elektro-luka
- veličina elektrode
- brzina doziranja punila
- brzina zavarivanja
- izbor inertnog plina
- vrsta spoja
- vještina zavarivača
- svojstva materijala koji se zavaruju
- svojstva materijala elektrode (punila)

Ukoliko neki od ovi parametara odstupa od normiranih može doći do neželjenih iskrivljenja elemenata, pukotina ili prekida u zavoru.

Lasersko zavarivanje provodi se upotrebom lasera koji mogu biti sa čvrstom jezgrom ili plinski. Laser tali osnovni materijal i tako se formira spoj dva elementa.

Zavarivanje trenjem temelji se na generiranju topline trenjem između uređaja za zavarivanje i osnovnog materijala. Toplina izaziva taljenje osnovnog materijala koji se plastificira. Alat se pomiče duž linije spoja te se plastificiran materijal spaja iza alata i generira čvrstu fazu spoja. Primjena ovakvog postupka najčešće ne zahtjeva korištenje punila. Utjecaj zavara na elemente je manji odnosno smanjena je distorzija istih.

1.2.2.2 Odabir elektroda za zavarivanje

Odabir elektroda za zavarivanje za kombinacije legura koje se spajaju treba načiniti prema normi HRN EN 1011-4 [19], zajedno sa zahtjevima za spojeve. Smjernice za odabir elektroda za zavarivanje uobičajeni aluminijskih legura prikazane su u tablicama 1.12 i 1.13, sadržanim unutar HRN EN 1999-1-1 [4]:

Tablica 1.12: preporuke za odabir elektroda

Kombinacija osnovnoga materijala ¹⁾							
Prvi dio	Drugi dio						
	Al-Si odljevci	Al-Mg odljevci	legure nizova 3xxx	legure nizova 5xxx osim 5083	5083	legure nizova 6xxx	7020
7020	NR ²⁾	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 4	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	5556A vrsta 5 5556A	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 4	5556A vrsta 5 vrsta 4 ⁴⁾
legure nizova 6xxx	vrsta 4 vrsta 4 vrsta 4	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	vrsta 4 vrsta 4 vrsta 4	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	vrsta 5 vrsta 4 vrsta 4	
5083	NR ²⁾	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	5556A vrsta 5 vrsta 5		
legure nizova 5xxx osim 5083	NR ²⁾	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	vrsta 5 ³⁾ vrsta 5 vrsta 5			
legure nizova 3xxx	vrsta 4 vrsta 4 vrsta 4	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5	vrsta 3 vrsta 3 vrsta 3				
Al-Mg odljevci	NR ²⁾	vrsta 5 vrsta 5 vrsta 5					
Al-Si odljevci	vrsta 4 vrsta 4 vrsta 4						

¹⁾ U svakom polju tablice elektroda za maksimalnu čvrstoću zavara prikazana je u prvom retku; za legure nizova 6xxx i EN-AW 7020 to će biti manje od čvrstoće potpuno toplinski obrađenog osnovnog materijala. Elektroda za maksimalnu otpornost s obzirom na koroziju prikazana je u srednjem retku. Elektroda kojom se izbjegava stalno raspucavanje zavara prikazana je u trećem retku.

²⁾ NR = ne preporučuje se (en: not recommended). Zavarivanje legura koje sadržavaju približno 2 % ili više Mg u Al-Si elektроди ili obratno ne preporučuje se jer se stvara dovoljno taloga Mg₂Si na granicama fuzije, što daje krhki zavar. Ako je to neizbježno, vidjeti normu prEN 1011-4.

³⁾ Ponašanje zone taljenja pri koroziji vjerojatno će biti bolje ako je sastav legure blizak sastavu osnovnog materijala i nije bitno veći. Stoga za upotrebu u potencijalno korozivnim okolišima prednost ima zavarivanje materijala EN-AW 5454 elektrodom 5454. Međutim, u nekim slučajevima to može biti moguće samo na štetu pravilnosti zavara tako da će biti nužan kompromis.

⁴⁾ Samo u posebnim slučajevima zbog manje čvrstoće zavara i izduljenja priključka.

Tablica 1.13: skupine legura upotrijebljene u tablici 1.12

Skupine elektroda	Legure
vrsta 3	3103
vrsta 4	4043A, 4047A ¹⁾
vrsta 5	5056A, 5356 / 5356A, 5556A / 5556B, 5183 / 5183A
¹⁾ 4047A posebno se upotrebljava kako bi se spriječilo raspucavanje u zoni taljenja u priključcima. U najviše ostalih slučajeva prednost ima 4043A.	

Sukladno normi HRN EN 1991-1-1 [4], za karakterističnu čvrstoću zavara f_w treba uzeti vrijednost iz tablice 1.14 uz uvjet da su upotrijebljene kombinacije elektrode i osnovnog materijala sukladno tablici 1.13.

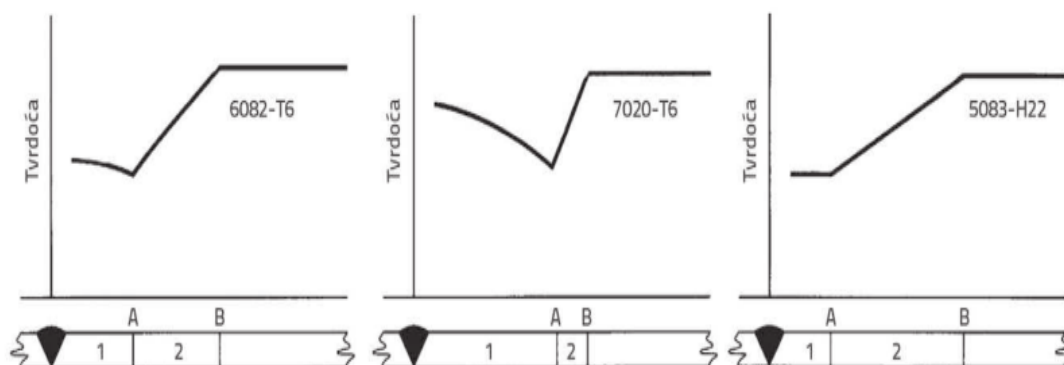
Tablica 1.14: karakteristične čvrstoće zavara f_w

Karakteristična čvrstoća	Elektroda	Legura								
		3103	5052	5083	5454	6060	6005A	6061	6082	7020
f_w [N/mm ²]	5356	–	170	240	220	160	180	190	210	260
	4043A	95	–	–	–	150	160	170	190	210
¹⁾ Za legure EN AW-5754 i EN AW-5049 može se upotrijebiti vrijednost legure 5454 za EN AW-6063, EN AW-3005 i EN AW-5005 može se upotrijebiti vrijednosti legure 6060 za EN AW-6106 može se upotrijebiti vrijednosti legure 6005A za EN AW-3004 može se upotrijebiti vrijednost legure 6082 za EN AW-8011A može se upotrijebiti vrijednost 100 N/mm ² za elektrodu vrste 4 i vrste 5 ²⁾ Ako su upotrijebljene elektrode 5056, 5356A, 5556A/5556B, 5183/5183A (Mg), moraju se primijeniti vrijednosti za 5356. ³⁾ Ako su upotrijebljene elektrode 4047A ili 3103, moraju se primijeniti vrijednosti za 4043A. ⁴⁾ Za kombinacije različitih legura mora se upotrijebiti najniža karakteristična čvrstoća zavara.										

1.2.2.3 Zona utjecaja topline

Pojava karakteristična za aluminij i njegove legure je da u zoni zavarivanja, odnosno u području HAZ-a, dolazi do promjene svojstava osnovnog materijala. Metal unutar zone utjecaja topline može biti slabijih ili boljih karakteristika od osnovnog materijala ovisno o kombinaciji osnovnog materijala i punila [20].

U proračunu zavarenih konstrukcija u kojemu su upotrijebljene očvršćene legure ili umjetno dozrijevanje legure ove promjene se moraju uzet u obzir jer rezultiraju degradacijom svojstava osnovnog materijala. Iznimka od tog pravila nastupa u legurama koje su u stanju O kada nema oslabljenja u blizini zavara ili ako je materijal u stanju F, a proračunska se čvrstoća temelji na svojstvima stanja O. Smanjenje, od utjecaja topline, utječe na dogovornu granicu popuštanja pri 0,2%-tnoj trajnoj deformaciji materijala više nego na vlačnu čvrstoću. Područje utjecaja topline proteže se neposredno oko zavara izvan kojega se svojstva čvrstoće brzo obnavljaju do svojih početnih vrijednosti nezavarenog materijala.



Crtež 1.5: karakteristični dijagrami tvrdoće u zoni utjecaja topline različitih legura [21]

HAZ se može podijeliti na dva dijela (1 i 2) kako je naznačeno na slici, u ovisnosti o udaljenosti od zavora. U području 1, kod toplinski obrađenih legura, metal postiže temperaturu same obrade i postupkom ponovnog starenja djelomično mu se vraćaju svojstva.

U području 2 ta temperatura nije postignuta no s porastom udaljenosti od zavora pada i njegov utjecaj na materijal sve do točke B gdje vrijede sva svojstva osnovnog materijala.

Kod toplinski neobrađenih legura, u području 1 tvrdoća je jednolika i odgovara svojstvima materijala u mekom stanju. Područje 2 je pak slično kao i kod toplinski obrađenih legura. Najmanja čvrstoća je na granici ova dva područja, u točki A.

Kod legura razreda 6xxx, toplina zavarivanja može smanjiti čvrstoću osnovnog materijala čak do 50%. Kod legura razreda 7xxx, oslabljenje je manje ali se proteže u većoj širini od samog zavora.

Širenje područja HAZ-a može se smanjiti kontrolom temperature tijekom proizvodnje. Bitno je pratiti temperaturu osnovnog materijala prije vršenja novog prolaska zavarivanja. Temperatura može biti povećana zbog prethodnog zavora koji je u neposrednoj blizini, prevelike temperature zraka ili jer nije ostavljeno dovoljno vremena da se materijal ohladi između dva prolaska zavarivanja [20].

Čak i mali zavori za spajanje manjih priključnih elemenata mogu znatno smanjiti otpornost samog elementa zbog prisutnosti HAZ-a. Prilikom oblikovanja konstrukcije povoljnije je postaviti zavoru u područje niskih naprezanja, odnosno bliže neutralnoj osi i izvan područja velikog momenta savijanja za grede.

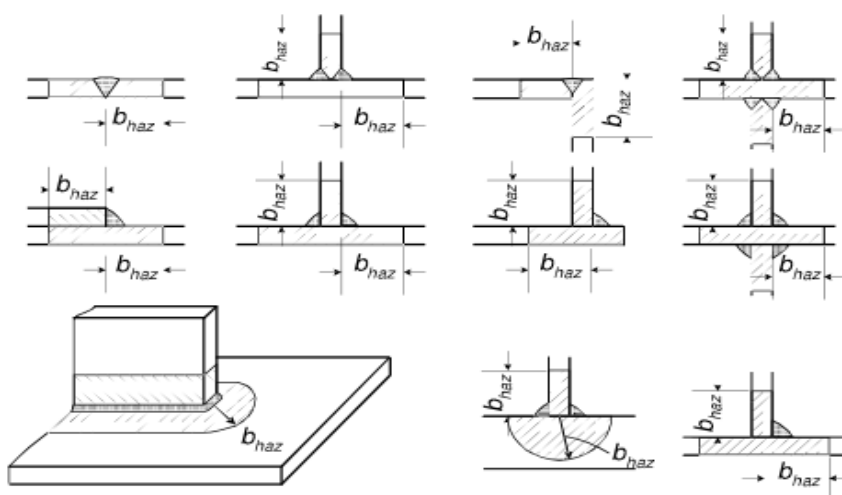
Za neke legure moguće je ublažiti učinke omekšavanja zbog HAZ-a nekima od metoda [22]:

- hladno deformiranje zavora i HAZ-a – ova metoda je podobna za legure koje se ne mogu toplinski obrađivati
- umjetno dozrijevanje – može poboljšati svojstva materijala u zoni utjecaja topline 10% - 20%
- rastvorno žarenje i umjetno dozrijevanje – vraća i do 100% čvrstoće. Međutim postupak se ne može provoditi lokalno već je potrebno žarenje cijelog sklopa elemenata koji je zavaren stoga se ovaj postupak u praksi primjenjuje ograničeno.
- prirodno dozrijevanje – ovisno o trajanju, moguć je povrat do 85% početne čvrstoće materijala.

1.2.2.4 Rasprostranjenost zone utjecaja topline

Pretpostavlja se da se HAZ proteže na udaljenosti b_{HAZ} u svim smjerovima od zavora što je definirano na sljedeći način [4]:

- poprečno od središnje linije ravnog sučeonog zavora
- poprečno od toke presjecišta površina zavora za kutne zavora
- poprečno od točke presjecišta površina zavora za sučeonu zavoru u uglovima priključaka i priključcima oblika T i križa
- u svim radijalnim smjerovima od kraja zavora



Crtež 1.6: rasprostiranje zone utjecaja topline (HAZ) [4]

Granice HAZ-a treba općenito uzeti kao ravne linije okomite na površinu metala, posebno pri zavarivanju tankoga materijala. Međutim, ako se zavarivanje provodi na debelom materijalu, dopušteno je pretpostaviti zakrivljenu granicu polumjera b_{HAZ} .

Za zavare tehnologijom MIG na nezagrijanom materijalu i hlađenjem u međuprolasku do 60°C ili niže, kad se postavljaju zavari u više prolazaka, vrijednosti b_{haz} su slijedeće:

- $0 < t \leq 6 \text{ mm}$ $b_{\text{haz}}=20\text{mm}$
- $6 < t \leq 12 \text{ mm}$ $b_{\text{haz}}=30\text{mm}$
- $12 < t \leq 25 \text{ mm}$ $b_{\text{haz}}=35\text{mm}$
- $t > 25\text{mm}$ $b_{\text{haz}}=40\text{mm}$

Za debljine veće od 12 mm može postojati temperaturni učinak jer hlađenje u međuprolasku može prijeći 60°C, osim ako postoji stroga kontrola kvalitete. To će povećati širinu područja pod utjecajem topline.

Za zavare TIG opseg HAZ-a je veći jer je unos topline veći nego kod zavara MIG. Zavari TIG za ravne sučeonice ili kutne zavare za legure nizova 6xx, 7xxx ili hladno očvršćenih nizova 3xxx i 6xxx imaju vrijednost b_{haz} : za $0 < t \leq 6\text{mm}$ $b_{\text{haz}}=30 \text{ mm}$

Ako se dva ili više zavara nalaze u blizini, njihove granice HAZ se preklapaju. Tada za cijelu skupinu zavara postoji samo jedan HAZ. Ako se zavar nalazi preblizu slobodnome rubu istaka raspršivanje topline je manje. Do toga dolazi ako je razmak od ruba zavara do slobodnog ruba manji od $3 b_{\text{haz}}$. Tada se pretpostavlja da se za cijelu širinu istaka primjenjuje faktor $ro_{0,\text{HAZ}}$.

Ostali faktori koji utječu na vrijednost b_{haz} su:

- Utjecaj temperature više od 60°C

Kada se izvode zavari s više prolazaka, između prolazaka može nastupiti povišenje temperature koje dovodi do porasta opsega HAZ-a.

- Promjena debljine

Ako dijelovi poprečnog presjeka koji se spajaju zavarivanjem nemaju istu debljinu t , može se konzervativno uzeti prosječna debljina svih dijelova kao mjerodavna za izračun utjecaja topline. To vrijedi sve dok prosječna debljina nije 1.5 puta veća od najmanje debljine.

Za veće razlike debljine pojedinih elemenata spoja, opseg HAZ-a treba odrediti iz ispitivanja tvrdoće.

- Promjene broja putova topline

Ako su spojevi dijelova poprečnog presjeka zavareni kutnim zavarima ali imaju različiti broj putova topline (n) od triju navedenih prije u tekstu, vrijednost b_{haz} treba pomnožiti s $3/n$.

Kada se izvode veći zavari, koji zahtijevaju višestruke prijelaze, treba obratiti pažnju na kontrolu temperature. Da bi se spriječilo nakupljanje topline koje štetno djeluje na materijal potrebno je da temperatura spoja prije svakog prijelaza zavarivanja bude u propisanim vrijednostima.

1.2.3 Ostale tehnike spajanja aluminijskih konstrukcija

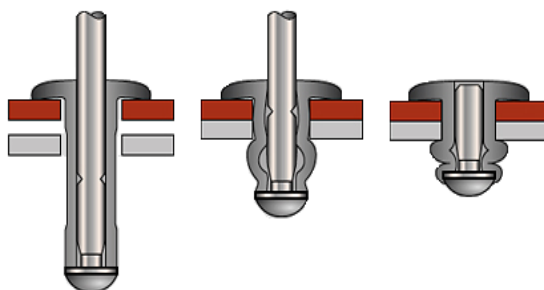
1.2.3.1 Spajanje aluminija mehaničkim spajalima

U primarnim nosivim aluminijskim konstrukcijama najčešće korištena mehanička spojna sredstva su vijci, bilo aluminijski ili čelični. U nekim slučajevima koriste se i zakovice.

Mehanička spajala imaju prednost da ne dolazi do omekšavanja materijala zbog utjecaja topline. Bitna prednost im je da se mogu koristiti na gradilištu za razliku od zavarivanja koje je ograničeno na radionice. Za spajanje aluminijskih elemenata na gradilištu primarno se koriste vijci.

Aluminijski vijci imaju prednost da se jednako toplinski šire kao i osnovni materijal što ne izaziva dodatna naprezanja. Njihova kvaliteta određuje se ovisno o osnovnom materijalu.

Sve češće je korištenje vijaka od nehrđajućeg čelika koji sa sobom nose problem pojave koncentracije naprezanja oko rupe. Problem se izbjegava korištenjem širokih podložnih pločica.



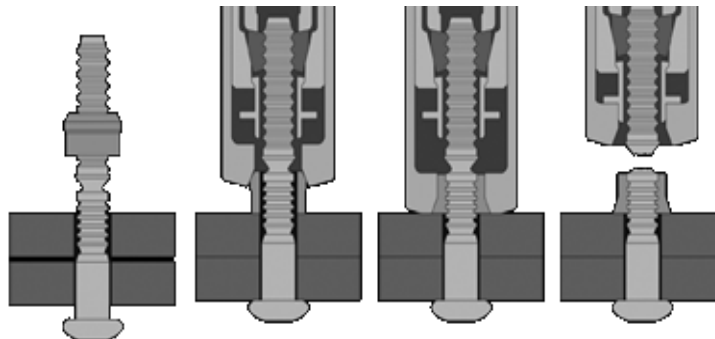
Crtež 1.7: slijepa zakovica ("pop zakovica") [23]

Zakovice se zakivaju u hladnom stanju te se ne skupljaju. To znači da na opterećenje reagiraju slično kao vijci.

Kod tankostijenih konstrukcija mogu se koristiti i posebni tipovi vijaka koji su samobušeci i samourezni ili slijepe zakovice. Prednost samobušecih vijaka je da se ugrađuju samo s jedne strane spoja te druga strana ne mora biti dostupna. Ista činjenica daje prednost slijepim zakovicama ("pop zakovicama") nad običnim.

Pomoću prikladnog alata zakovica se umeće u rupu s jedne strane i pritežu. Tako se na suprotnoj strani formira zatežuća glava i formira se čvrsti spoj dva lima.

Hibrid između zakivanja i vijčanog spoja su takozvani huck vijci. Vijak se ugrađuje u rupu, a s druge strane se montira zatežući prsten. Poseban uređaj zateže vijak i brtvi zatežući prsten nakon čega se višak vijka otkida. Spoj može izdržati veliku razinu posmičnih i vlačnih naprezanja.



Crtež 1.8: Huck vijak [24]

1.2.3.2 Lijepljenje aluminija

Lijepljenje odnosno adhezivno povezivanje aluminija definira se kao proces spajanja dijelova pomoću nemetalnih tvari (ljepila) koje prolazi kroz fizičku ili kemijsku reakciju očvršćivanja uzrokujući pri tome spajanje dijelova preko površinskog prijanjanja (adhezije) i unutarnje čvrstoće ljepila (kohezije).

Prednosti ovakvog spajanja su :

- kontinuirani priključci, bez rupa i bez unosa topline
- ujednačena raspodjela naprezanja i deformacija, koncentracija naprezanja nije izražena
- mogućnost spajanja aluminija i drugih materijala
- mogu se zalijepiti jako tanki elementi
- smanjenje vibracija
- veća fleksibilnost u projektiranju

Nedostaci su:

- specifičnosti u projektiranju priključaka, potrebne velike površine za prijenos naprezanja
- obrada površina
- vrijeme stvrdnjavanja ljepila
- adheziju je teško kontrolirati
- teško demontiranje odnosno popravljivanje spoja

1.2.3.3 Hibrido spajanje

U nekim situacijama kombiniraju se različite metode spajanja. Cilj je iskoristiti prednosti svake metode i tako nadopuniti mane druge. Najučestalija je kombinacija zavarenih spojeva i vijaka. Kod tankostijenih konstruktivnih elemenata uobičajeno je koristiti lijepljenje u kombinaciji sa zakovicama.

2. MODELI MATERIJALA

2.1 Općenito

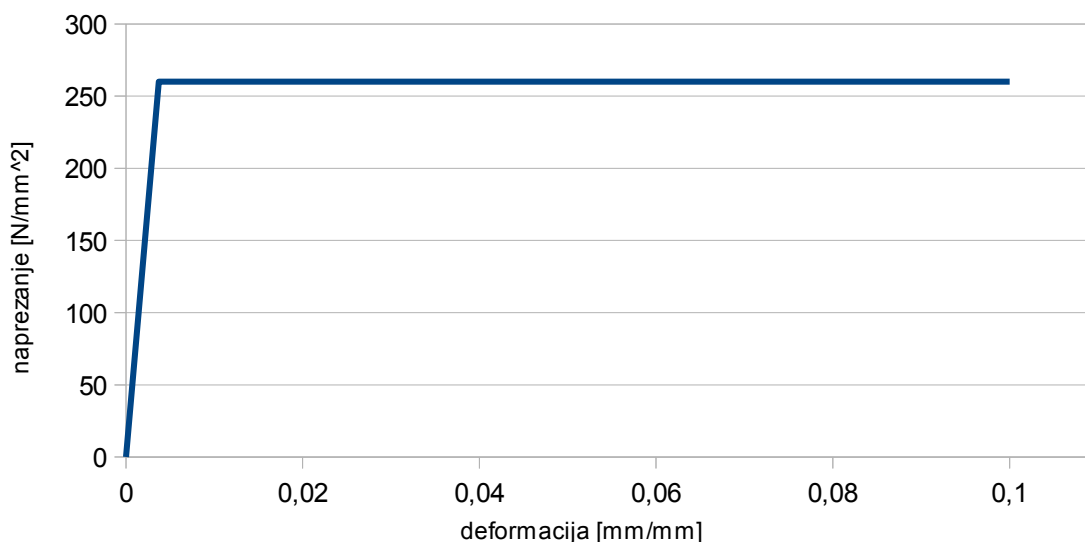
U radu su korištena dva globalna modela materijala koji su u proračunske modele uneseni preko dijagrama naprezanje - deformacija.

U prvom modelu svi su materijali modelirani kao idealni elasto-plastični materijali. Dijagrami za drugi model dobiveni su na osnovi provedenih ispitivanja obrađenim u radovima Dr. Ting Wanga [25][26]. Ovaj model je kalibriran numeričkim testom čiji rezultati su uspoređeni s rezultatima provedenih eksperimentima drugih autora [27] i dobiveno je dobro podudaranje istih.

2.2 Idealni elastoplastični model materijala (model materijala 1)

2.2.1 Dijagram za osnovni materijal

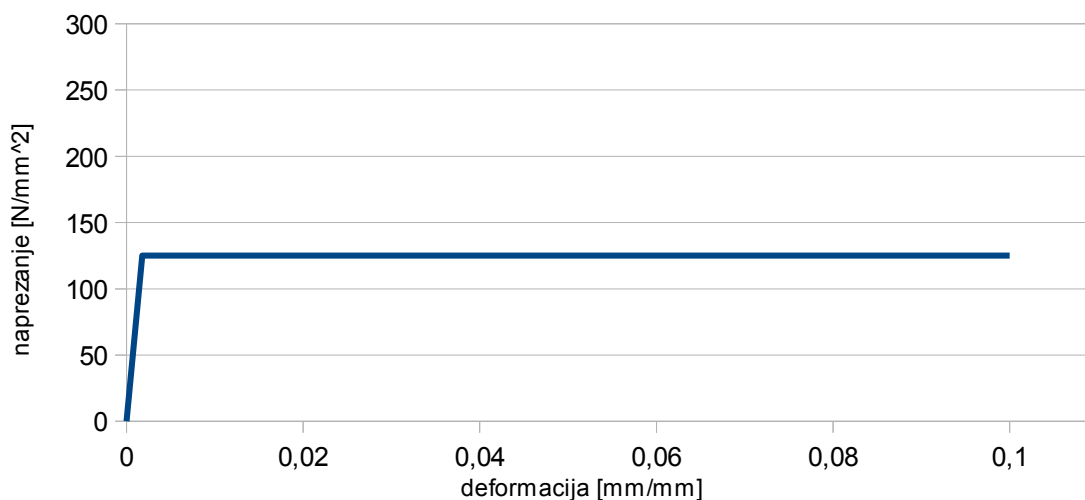
Dijagram je konstruiran koristeći podatke o minimalnim mehaničkim svojstvima za leguru EN AW-6082 T6 prema normi HRN EN 1999-1-1 [4], koji su dani u poglavlju 1.1.5, tablica 1.10. Dijagram je kosi pravac pod nagibom $E=70000 \text{ N/mm}^2$ do točke u kojoj se dostiže granica popuštanja f_0 koja za ekstrudirane profile debljine $5 \text{ mm} < t \leq 15 \text{ mm}$ iznosi 260 N/mm^2 . Nakon toga materijal se ponaša idealno plastično do trenutka dostizanja ukupne deformacije od 10%. Ta točka je definirana kao trenutak kada materijal otkazuje.



Grafikon 2.1: dijagram naprezanje-deformacija za osnovni materijal

2.2.2 Dijagram za HAZ

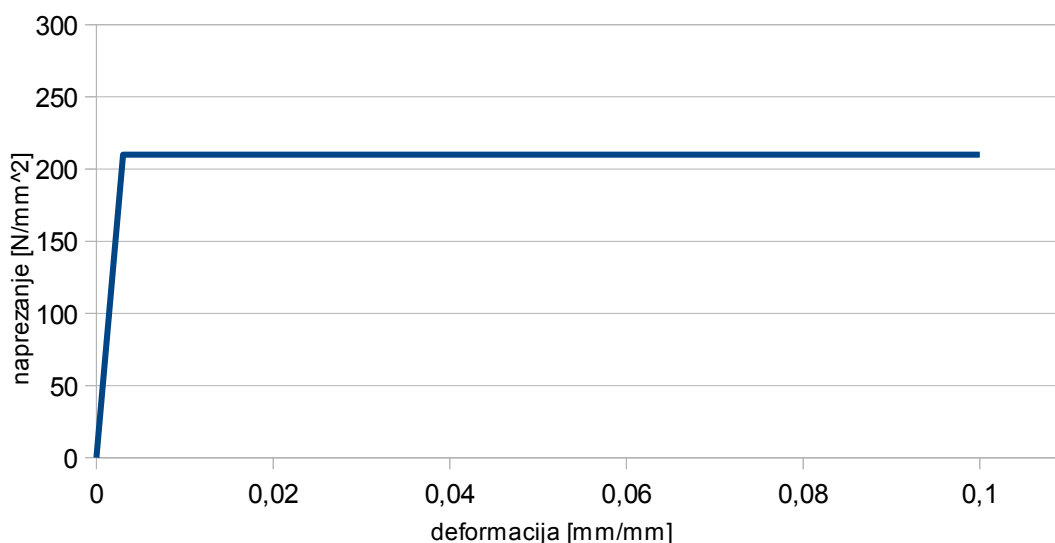
Kao i dijagram za osnovni materijal, i dijagram za materijal u zoni utjecaja topline konstruiran je koristeći podatke o minimalnim mehaničkim svojstvima za leguru EN AW 6082 T6 prema normi HRN EN 1999-1-1 [4] koji su dani u poglavlju 1.1.5, tablica 1.10. Dijagram je kosi pravac pod nagibom $E=70000 \text{ N/mm}^2$ do točke u kojoj se dostiže granica popuštanja $f_{0, \text{HAZ}}$ koja za ekstrudirane profile debljine $5\text{mm} < t \leq 15\text{mm}$ iznosi 125 N/mm^2 . Nakon toga materijal se ponaša idealno plastično do trenutka dostizanja ukupne deformacije od 10%. Ta točka je definirana kao trenutak kada materijal otkazuje.



Grafikon 2.2: dijagram naprezanje-deformacija za materijal u zoni utjecaja topline

2.2.3 Dijagram za zavar

Kao materijal ispune za zavar, sukladno preporukama iz norme HRN EN 1999-1-1 [4] navedenima u poglavlju 1.2.2.2, tablica 1.12, odabrana je legura aluminija 5183. Čvrstoća zavara određena je prema tablici 1.14 iz norme EN 1999-1-1 [4], danoj u poglavlju 1.2.2.2.



Grafikon 2.3: dijagram naprezanje-deformacija za zavar

Za leguru 5183 koriste se vrijednosti koje su u tablici prikazane za leguru 5356. Stoga je čvrstoća vara s legurom 6082 kao osnovnim materijalom 210 N/mm^2 .

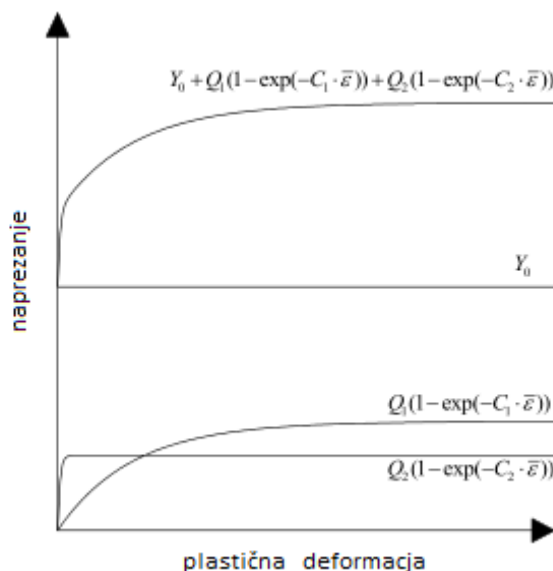
Dijagram je kosi pravac pod nagibom $E=70000 \text{ N/mm}^2$ do točke u kojoj se dostiže čvrstoća zavara nakon čega se materijal ponaša idealno plastično do trenutka dostizanja ukupne deformacije od 10%. Ta točka je definirana kao trenutak kada materijal otkazuje.

2.3 Modeli materijala izvedeni iz rezultata testova (model materijala 2)

Dijagrami naprežanje-deformacija definirani su na osnovi provedenih ispitivanja. Rezultati više testova su statistički obrađeni i kao rezultat određeni su parametri za funkciju naprežanja u ovisnosti o deformaciji. Odnos je definiran pet parametarskim proširenim Voce-ovim zakonom za nelinearno ponašanje materijala:

$$\sigma_y(\bar{\epsilon}) = y_0 + Q_1(1 - e^{(-C_1 \cdot \bar{\epsilon})}) + Q_2(1 - e^{(-C_2 \cdot \bar{\epsilon})}) \quad (2.1)$$

Gdje je y_0 granica popuštanja, a C_i i Q_i su parametri očvršćivanja. Krivulju sačinjavaju tri dijela, prvi je konstantna vrijednost granice popuštanja, a druga dva su varijabilni i ovisni o deformaciji.



Crtež 2.1: dekompozicija funkcije nelinearnog očvršćivanja [26]

2.3.1 Dijagram za osnovni materijal

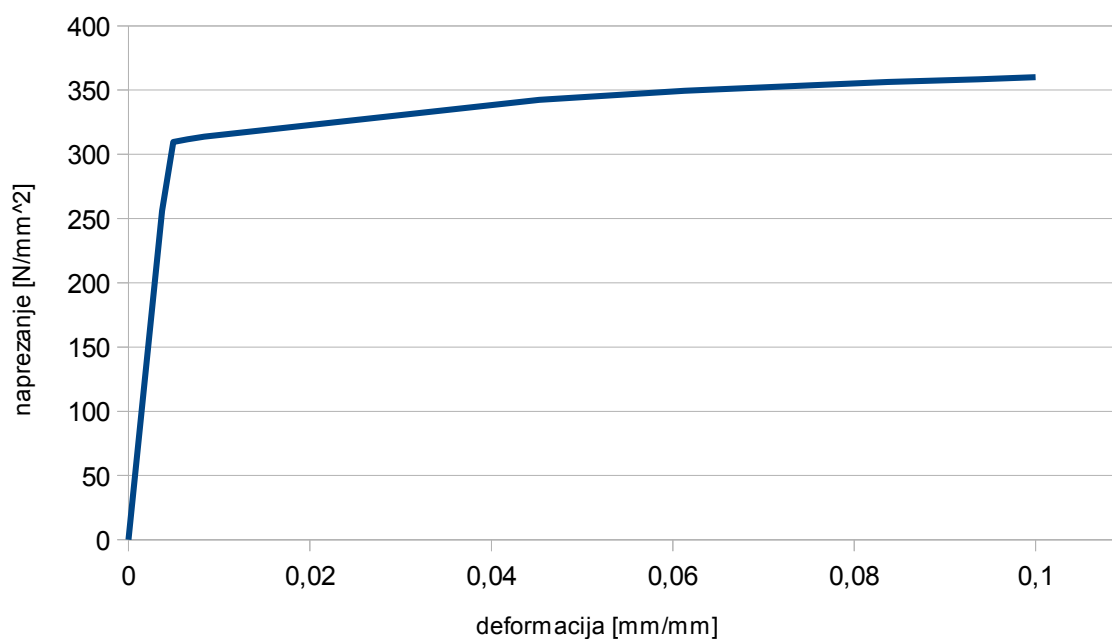
U radu profesora Matusiaka [27] provedena su vlačna ispitivanja uzoraka osnovnog materijala EN AW-6082 T6 u kidalici. Uzorci su uzeti iz pojasnica i hrpta profila korištenog u testu koji je opisan u poglavlju 3.3.4.

Temeljem više ispitivanja određeni su parametri za jednadžbu (2.1) koja definira krivulju koja najbolje opisuje mjerodavan rezultat testova koji je izveden statističkom analizom.

Parametri dijagrama osnovnog materijala prikazani su u tablici 2.1 [26] .

Tablica 2.1: parametri funkcije Voce-ovog zakona za osnovni materijal

Y_0 [MPa]	Q_1 [MPa]	C_1 [-]	Q_2 [MPa]	C_2 [-]
256	52,3	4605	59,5	20,5



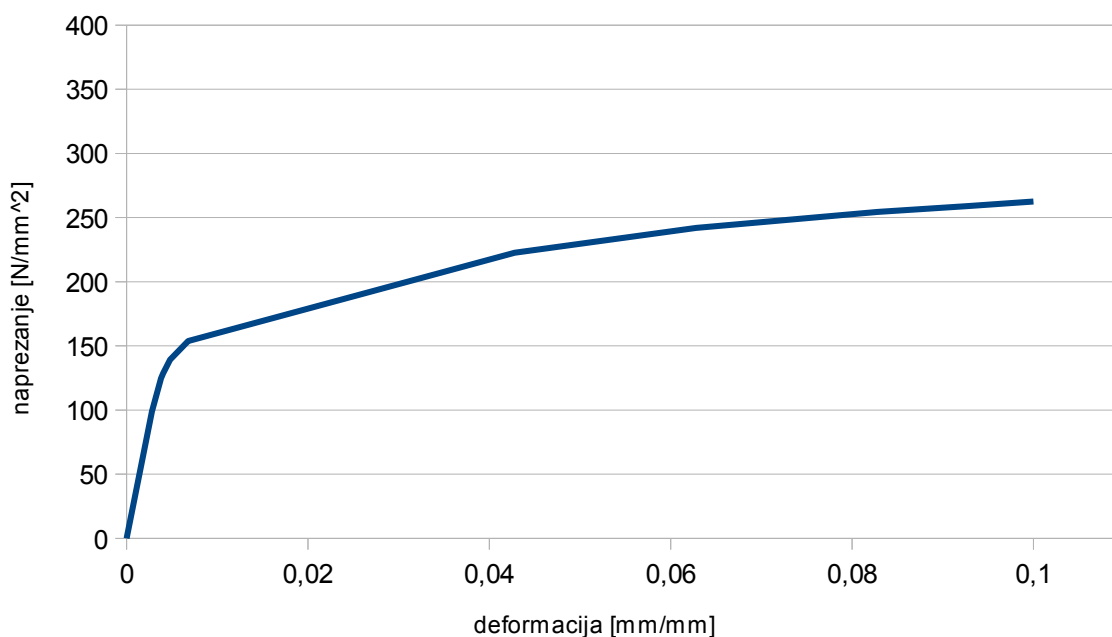
Grafikon 2.4: dijagram naprezanje-deformacija za osnovni materijal

2.3.2 Dijagram za HAZ

U radovima (Matusiak [27]) i (Wang [25][26]) za leguru EN AW 6082 T6 provedena su ispitivanja zone utjecaja topline. Promatrane su mehaničke karakteristike materijala nakon zavarivanja. Ispitivana je tvrdoća materijala u zonama različito udaljenim od samog zavara. Zatim je tvrdoća korelirana s čvrstoćom. Također iz uzorka zavara i njegove okolice izvučeni su uzorci koji su ispitani u kidalici. Rezultat svih testova su krivulje čvrstoće u zoni utjecaja topline ovisno o udaljenosti od zavara. Za potrebe modeliranja materijala u ovom radu koristi se samo jedan dijagram za cijelo područje HAZ-a. Parametri za konstruiranje krivulje priloženi su u tablici 2.2 [26].

Tablica 2.2: parametri funkcije Voce-ovog zakona za zonu utjecaja topline

Y_0 [MPa]	Q_1 [MPa]	C_1 [-]	Q_2 [MPa]	C_2 [-]
99	47	669	131	22



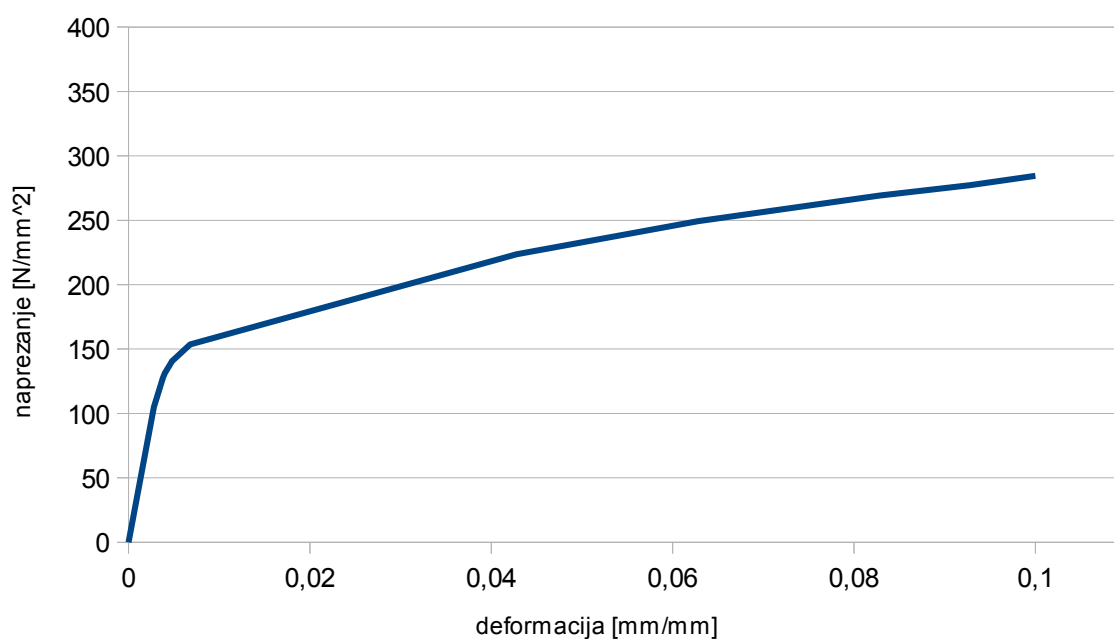
Grafikon 2.5: dijagram naprežanje-deformacija za HAZ

2.3.3 Dijagram za zavar

Parametri dijagrama za zavar određeni su istovjetno kao i parametri za HAZ postupkom objašnjenim u poglavlju 2.3.2. Parametri za konstruiranje krivulje priloženi su u tablici 2.3 [26].

Tablica 2.3: parametri funkcije Voce-ovog zakona za zavar

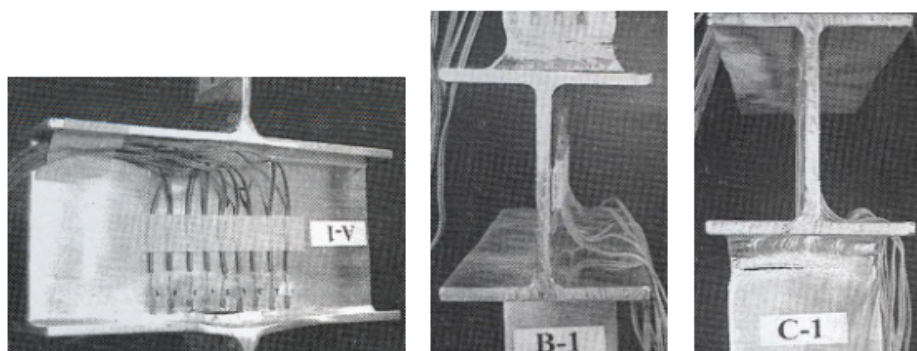
Y_0 [MPa]	Q_1 [MPa]	C_1 [-]	Q_2 [MPa]	C_2 [-]
105	42	656	189	13



Grafikon 2.6: dijagram naprezanje-deformacija za zavar

2.3.4 Numerički model za evaluaciju modela materijala

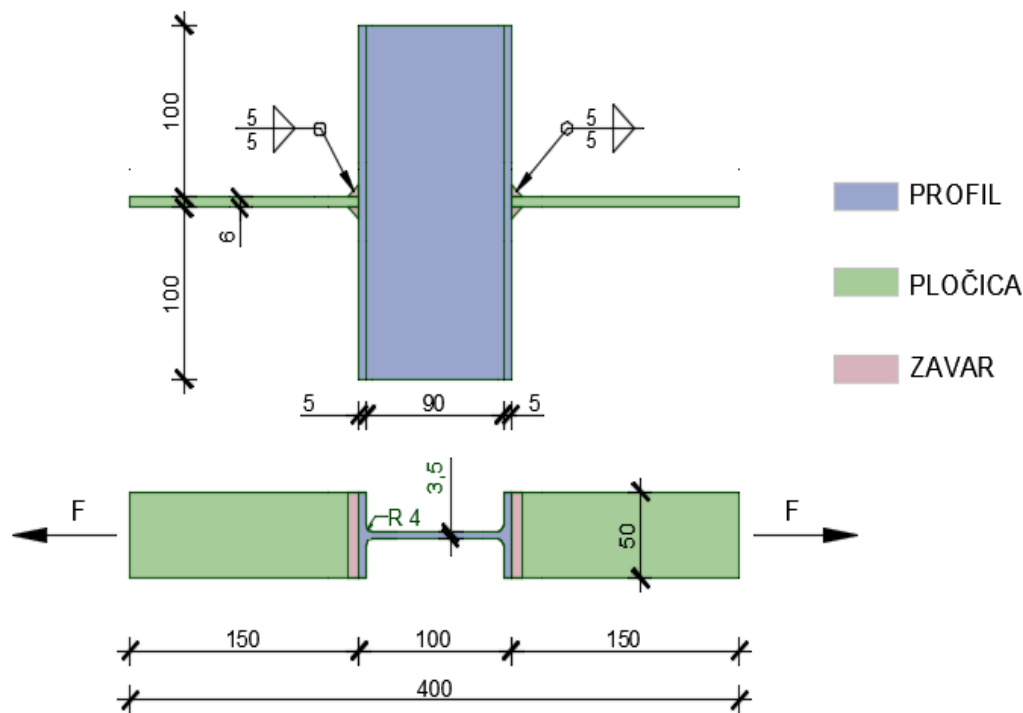
Modeli materijala izvedeni iz eksperimenata provjereni su numeričkim proračunom modela, čiji su rezultati uspoređeni s rezultatima ispitivanja stvarnih uzoraka u laboratoriju. Radi se o testu priključka nosač-stup opterećenog vlačnom silom. Rezultati ispitivanja i sam proces opisani su u radu (Matusiak [27]).



Fotografija 2.1: prikaz uzoraka nakon provedenog testa [27]

2.3.4.1 Geometrija numeričkog modela

Uzorak koji je ispitivan sastoji se od ekstrudiranog profila duljine 206 mm, na koji su zavarene dvije pločice dimenzija 150 mm x 50 mm. Korišteni su kutni zavari debljine 5 mm. Profil je I 100, debljine pojasnica $t_f=5\text{mm}$ i debljine hrpta $t_w=3,5\text{mm}$. Pločice su debljine 6mm.



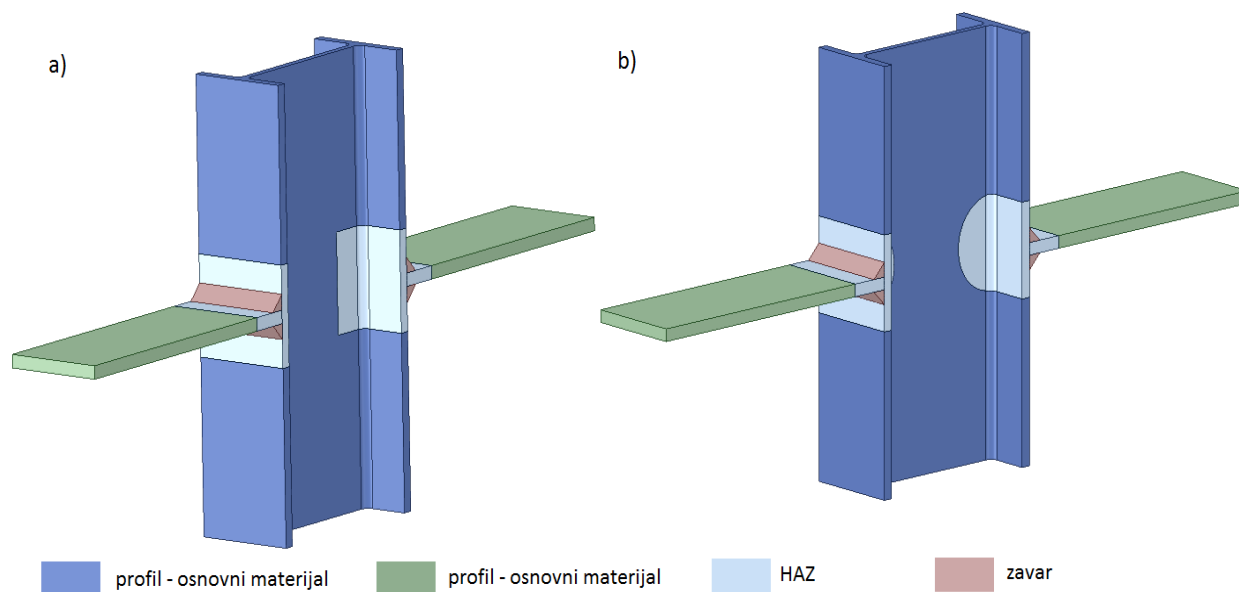
Crtež 2.2: geometrija modela

Dimenzije zone utjecaja topline određene su prema normi HRN EN 1999-1-1 [4], koristeći pravila navedena poglavlju 1.2.2.4, i iznose:

- Profil, pojasnica – $t_f = 5\text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 20\text{ mm}$
- Profil, hrbat – $t_w = 3,5\text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 20\text{ mm}$
- Pločica – $t = 6\text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 20\text{ mm}$

Rasprostiranje zone utjecaja topline u hrptu profila modelirano je na dva načina. Kod prvog načina pretpostavlja se zona utjecaja topline kao što je pretpostavljena u (Wang [26]). Dubina zone utjecaja topline uzeta je kao najveća dubina prema normi HRN EN 1991-1-1 [4] i modelirana je kao pravokutnik - model HAZ_1.

U drugom slučaju zona utjecaja topline na hrptu je polukružnog oblika s radijusom b_{haz} kako to predlaže norma HRN EN 1991-1-1 [4] - model HAZ_2. [28]



Crtež 2.3: rasprostiranje zone utjecaja topline: a) za model HAZ_1 b) za model HAZ_2

2.3.4.2 Dijagrami materijala

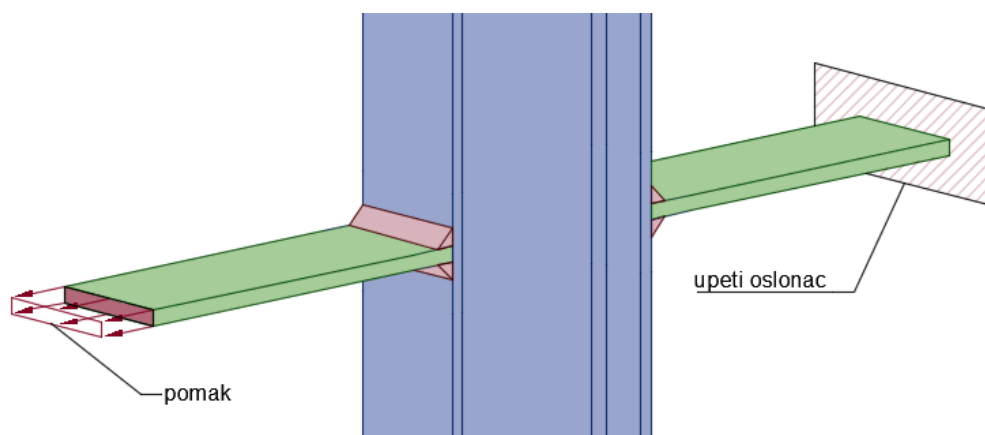
Za osnovni materijal korišten je dijagram materijala definiran u poglavlju 2.3.1. Za zonu utjecaja topline korišten je dijagram definiran u poglavlju 2.3.2, a za zavar je korišten dijagram materijala definiran u poglavlju 2.3.3.

Korišteni su navedeni modeli materijala da se ustanovi opisuju li stvarno ponašanje materijala.

2.3.4.3 Opterećenje

Opterećenje numeričkog modela definirano je kao u ispitivanjima prema (Matusiak [27]).

Pločica na jednoj strani profila ima upeti ležaj dok se preko pločice na drugoj strani profila na sklop djeluje pomakom intenziteta 0,02 mm/s, do sloma. Određeno je da slom nastupa u trenutku kada se u bilo kojoj točki pojavi relativna deformacija veća od 10 %.

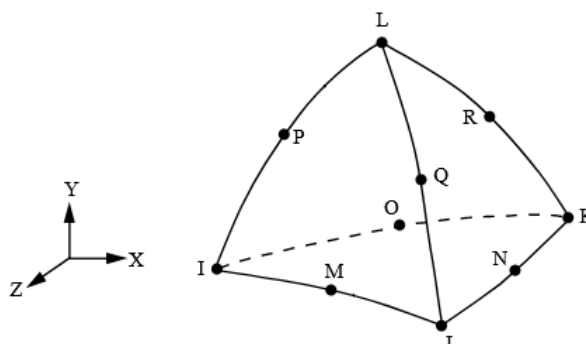


Crtež 2.4: unos opterećenja u model

2.3.4.4 Ovisnost rezultata proračuna o mreži konačnih elemenata i zaključak o odabiru veličine konačnog elemenata

Proračun numeričkog modela izveden je u softveru ANSYS [29][30][31].

Za izradu mreže konačnih elemenata korišteni su elementi "SOLID187".



Crtež 2.5: geometrija konačnog elementa "SOLID187" [32]

Element SOLID187 je 3-D, 10-čvorni tetraedralni element višeg reda. SOLID187 ima kvadratno funkciju pomaka i prikladan je za modeliranje mreža nepravilne geometrije. Element je definiran s 10 čvorova koji imaju tri stupnja slobode u svakom čvoru: pomaci u nodalnim smjerovima x, y i z. Osim čvorova, ulazni podaci elementa uključuju izotropna, ortotropna ili anizotropna svojstva materijala. Pravci ortotropnih i anizotropnih materijala odgovaraju smjeru koordinata elemenata. Element dobro opisuje plastičnost, hiperelastičnost, puzanje, velike progibe i velike deformacije.

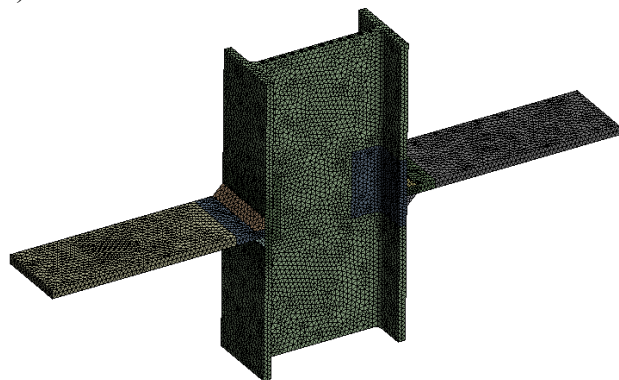
Inicijalnim proračunima utvrđena je ovisnost rezultata o mreži konačnih elemenata odnosno o gustoći iste. Stoga se pristupilo utvrđivanju koja gustoća mreže daje rezultate najbližije rezultatima testa.

Za modele HAZ_1 i HAZ_2 proveden je proračun za različite gustoće mreže konačnih elemenata te su iz dobivenih rezultata konstruirani dijagrami sila-pomak. Sila koja u nekom određenom trenutku djeluje na model određena je integracijom naprezanja u osloncu.

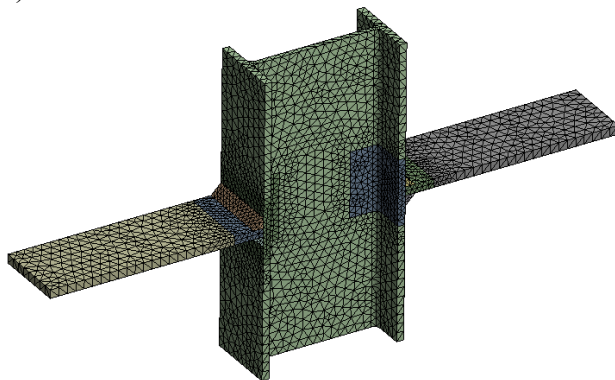
Gustoća mreže varirana je od nazivne veličine elementa 3mm do nazivne veličine elementa 15mm, s jediničnim prirastom veličine u svakom koraku. Nazivna veličina elementa predstavlja najveću dozvoljenu međusobnu udaljenost rubnih čvorova elementa. Na mjestima moguće pojave koncentracije naprezanja mreže su progušćivane elementima čija je veličina određeni postotak od nazivne veličine elemenata.

Prikazane su samo reprezentativne mreže čiji rezultati, dobiveni u programu ANSYS [29][30][31], daju naznake smjera promjene rezultata ovisno o veličini konačnog elementa u mreži.

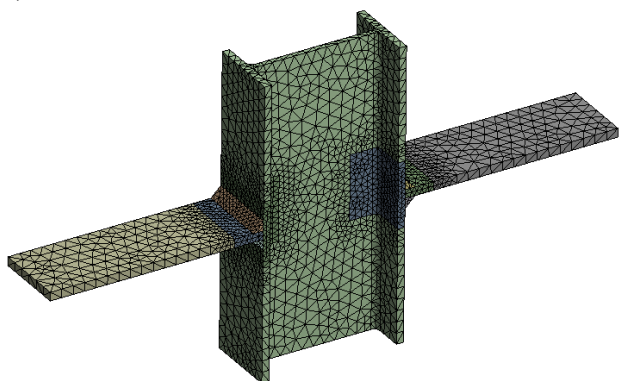
a)



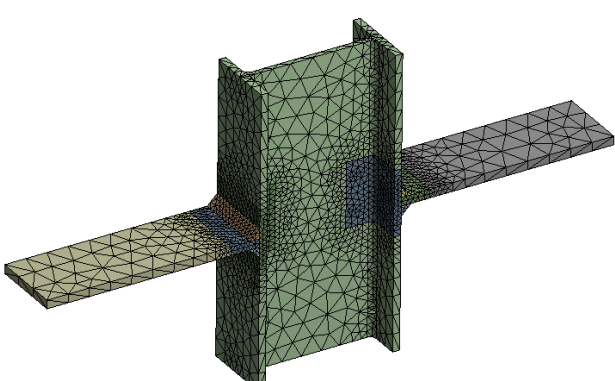
b)



c)

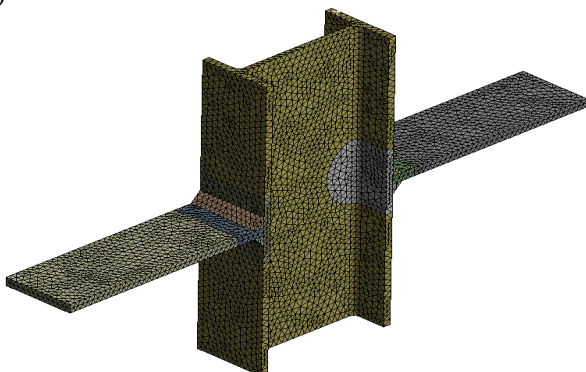


d)

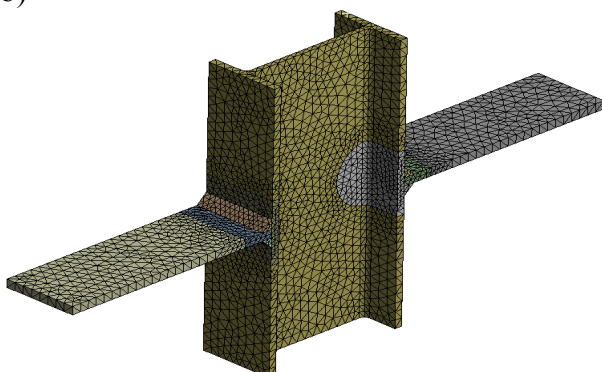


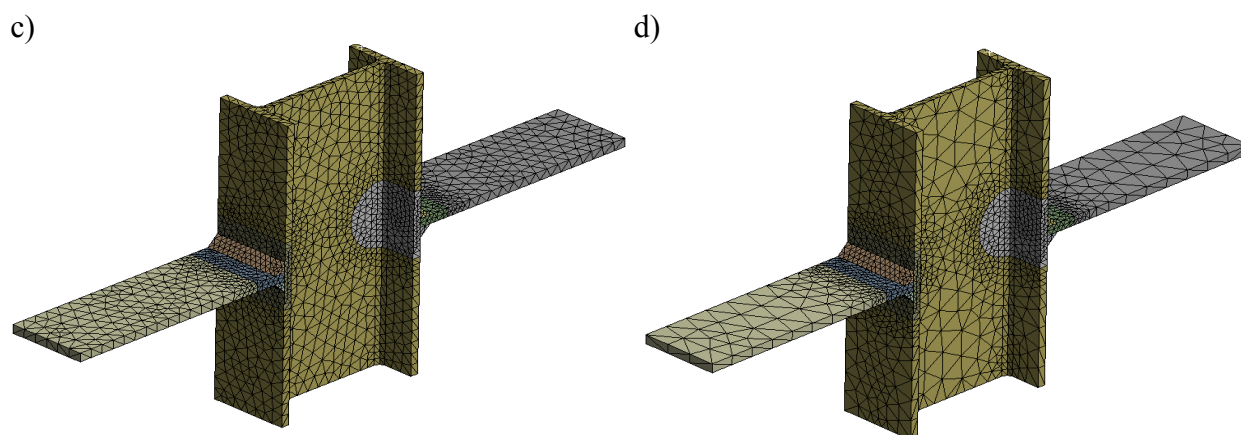
Crtež 2.6: prikaz mreže konačnih elemenata za različite nazivne veličine konačnih elemenata za model HAZ_1: a) 3mm b) 6mm c) 8mm d) 15mm

a)



b)





Crtež 2.7: prikaz mreže konačnih elemenata za različite nazivne veličine konačnih elemenata za model HAZ_2: a) 3mm b) 6mm c) 8mm d) 15mm

Na grafikonima 2.7 i 2.8 prikazani su rezultati proračuna za modele HAZ_1 i HAZ_2 koji su uspoređeni s rezultatom eksperimenta. Vidljivo je da rezultati modela HAZ_2 značajnije odstupaju od mjerenja iz eksperimenta te su isključena iz daljnjeg razmatranja.

Analizirajući krivulje za različite gustoće mreže, za model HAZ_1, konstatirano je da općenito za područje veće sile, kada materijal ulazi u područje nelinearnosti, neovisno o gustoći mreže, krivulja sila-pomak numeričkog proračuna presjeca krivulju dobivenu eksperimentom i ulazi u područje gdje krutost modela prelazi onu iz eksperimenta te za istu silu dobivamo manje pomake.

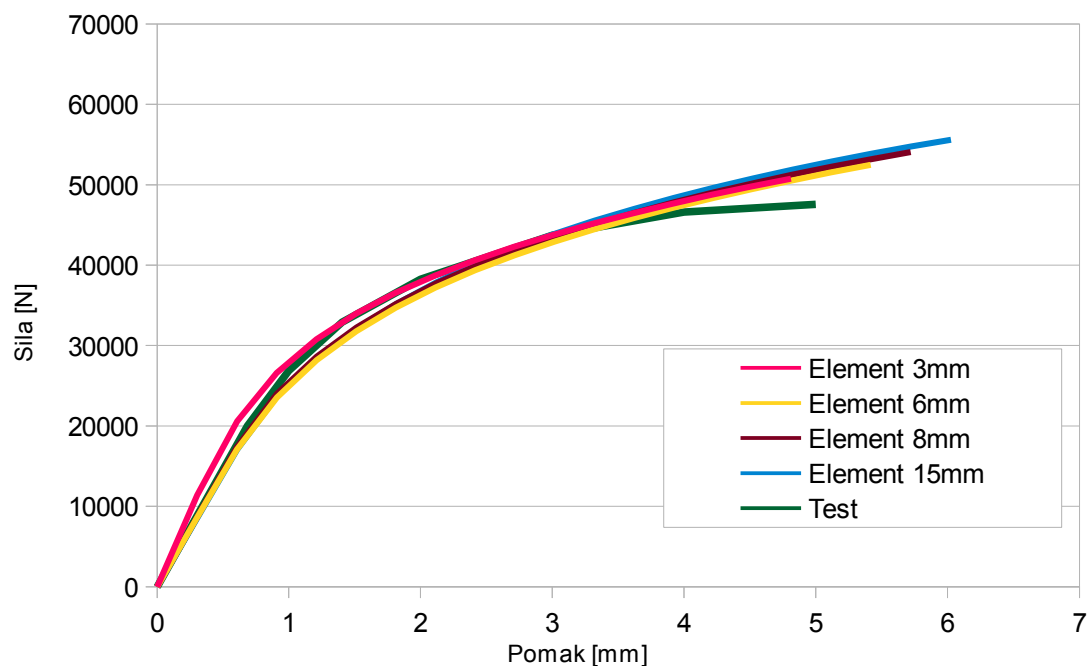
Stoga je glavni kriterij za odabir mjerodavne veličine konačnog elementa ponašanje sustava u linearno elastičnom području. Mreže velike gustoće odnosno male nazivne veličine konačnog elementa u tom području pokazuju precijenjenu krutost modela i ne opisuju realno stanje iz eksperimenta. Općenito grublje mreže u linearno elastičnom području materijala daju pomake veće od pomaka mjerenih u testu. To pokazuje da se sklop ponaša manje kruto nego kod relevantnog eksperimenta.

Definirano je da je granica između ponašanja mreže kao grube ili kao fine, mreža s nazivnom veličinom elementa od 8mm. Ovakva mreža najbolje opisuje materijal u linearno elastičnom području. U ostalim područjima, nelinearno elastično i plastično područje, razlike krivulja su relativno male te su na strani sigurnosti odnosno za istu silu dobivaju se veći pomaci nego u eksperimentu.

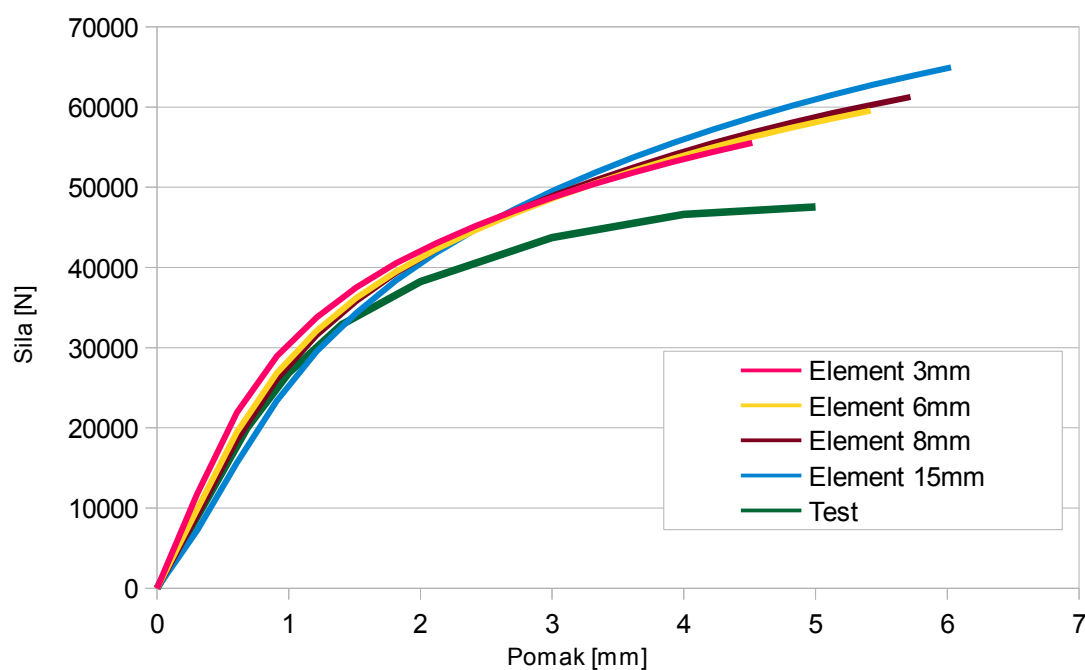
Ova nazivna veličina je stoga odabrana kao reprezentativna s kojom su dalje, u zoni najvećih naprezanja, modelirani numerički modeli iz poglavlja 3.

Model HAZ_1 - zona utjecaja topline kao što je pretpostavljena u (Wang [26]), modelirana kao pravokutnik.

Model HAZ_2 - zona utjecaja topline na hrptu je modelirana kako predlaže norma HRN EN 1991-1-1 [4].



Grafikon 2.7: dijagram sila-pomak za model HAZ_1



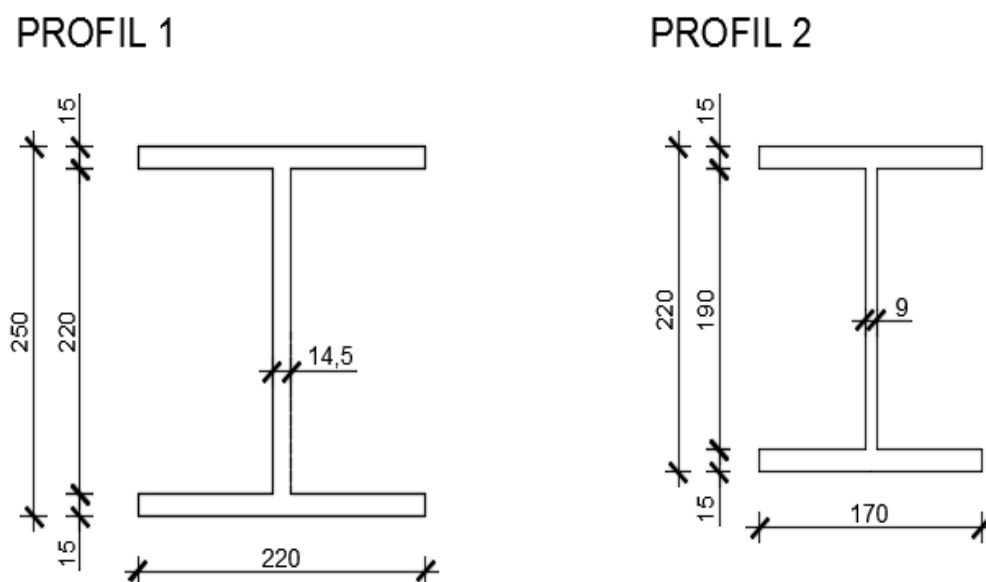
Grafikon 2.8: dijagram sila-pomak za model HAZ_2

3. NUMERIČKI MODELI

3.1 Geometrija

3.1.1 Općenito

U radu su razmatrane varijante zavarenog spoja između dva ekstrudirana profila.

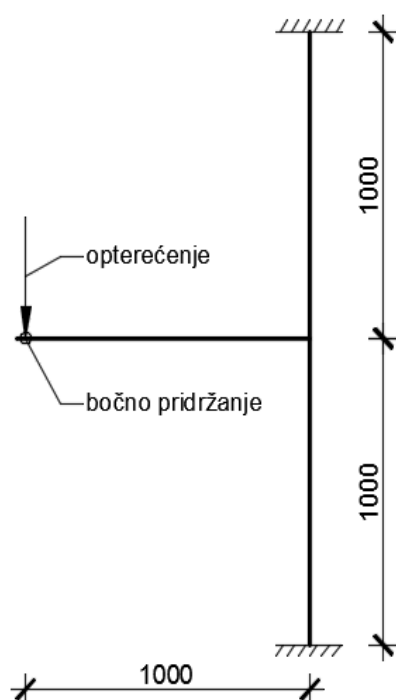


Crtež 3.1: poprečni presjeci profila

Poprečni presjeci profila preuzeti su iz kataloga proizvođača [33] za leguru aluminija EN AW-6082. Zaobljenja na profilima nisu uzeta u obzir radi jednostavnosti modeliranja. Na slici 13 prikazana je geometrija poprečnih presjeka koja je unesena u model.

3.1.2 Statički sustav modela

Statički sustav modela čini stup (profil 1) koji je postavljen vertikalno i na svojim krajevima ima nepomične krute oslonce. Na isti je konzolno spojen nosač (profil 2) na koji se nanosi opterećenje. Na mjestu djelovanja sile profil je bočno pridržan tako da ne dolazi do gubitka stabilnosti elementa i bočnog izvijanja, koje bi utjecalo na raspodjelu naprezanja u samom spoju. Statički sustav prikazan je na crtežu 3.2.

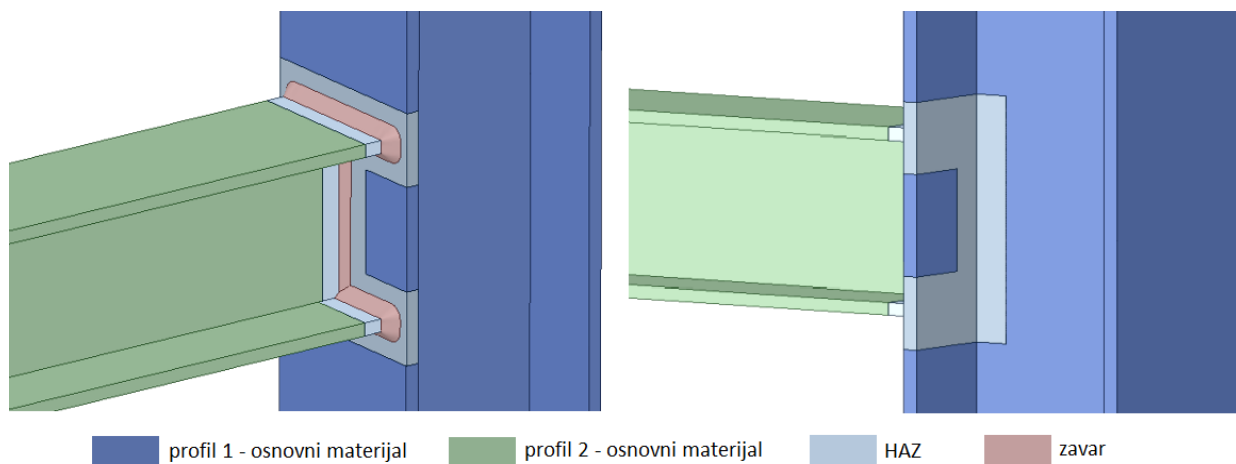


Crtež 3.2: statički sustav modela

3.1.3 Geometrija modela 1 – bez ukruta

Spoj dvaju profila izveden je kutnim zavarima. Debljina zavora određena je po formuli $a=0,7 \cdot t$

Zavari pojasnice debljine su 10 mm, a zavari hrpta su debljine 6mm.



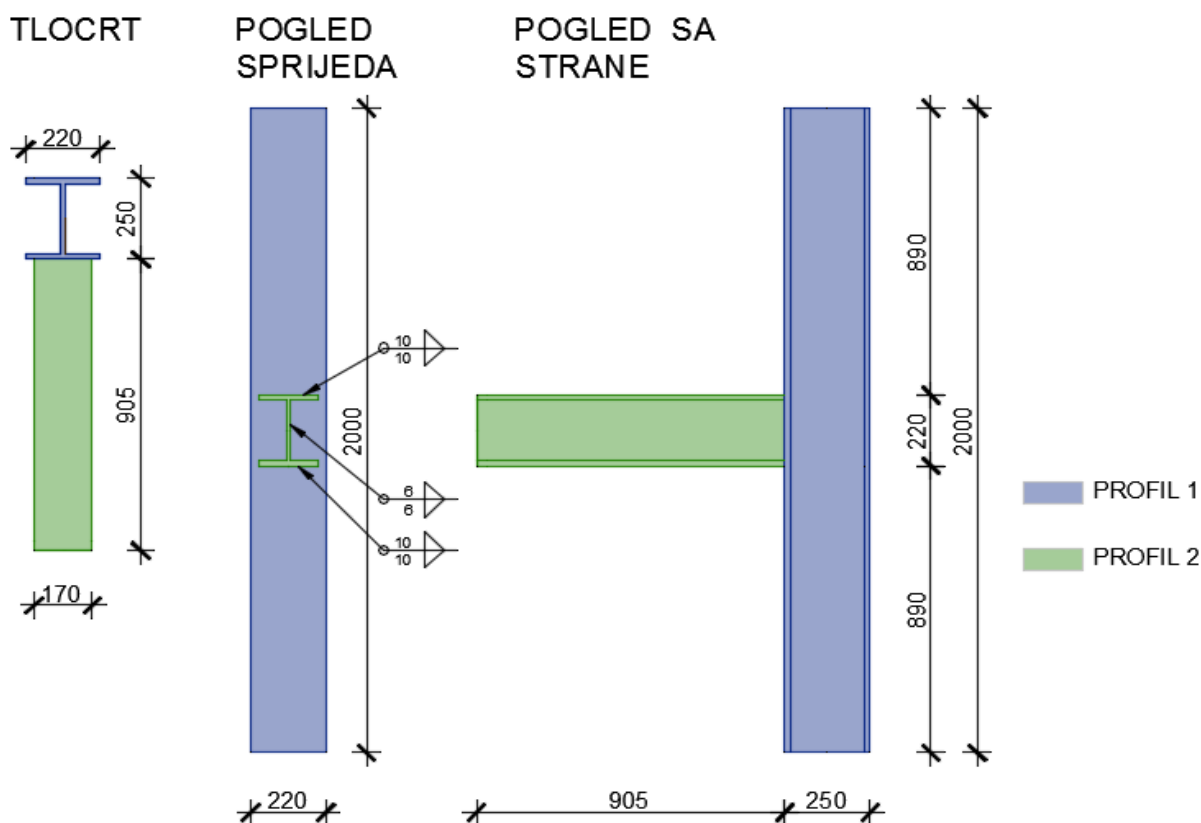
Crtež 3.3: 3-D prikaz detalja spoja [28]

Kontakt između dva profila modeliran je kao spoj s trenjem uz koeficijent trenja od 0.69, određen prema [34].

Dimenzije zone utjecaja topline određene su prema normi HRN EN 1999-1-1 [4], koristeći pravila navedena u poglavlju 1.2.2.4, i iznose:

- Profil 1, pojasnica – $t_f = 15 \text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 35 \text{ mm}$
- Profil 1, hrbat – $t_w = 14,5 \text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 35 \text{ mm}$
- Profil 2, pojasnice – $t_f = 15 \text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 35 \text{ mm}$
- Profil 2, hrbat – $t_w = 9 \text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 30 \text{ mm}$

Svakom elementu pridružen je pripadajući dijagram materijala iz poglavlja 2.

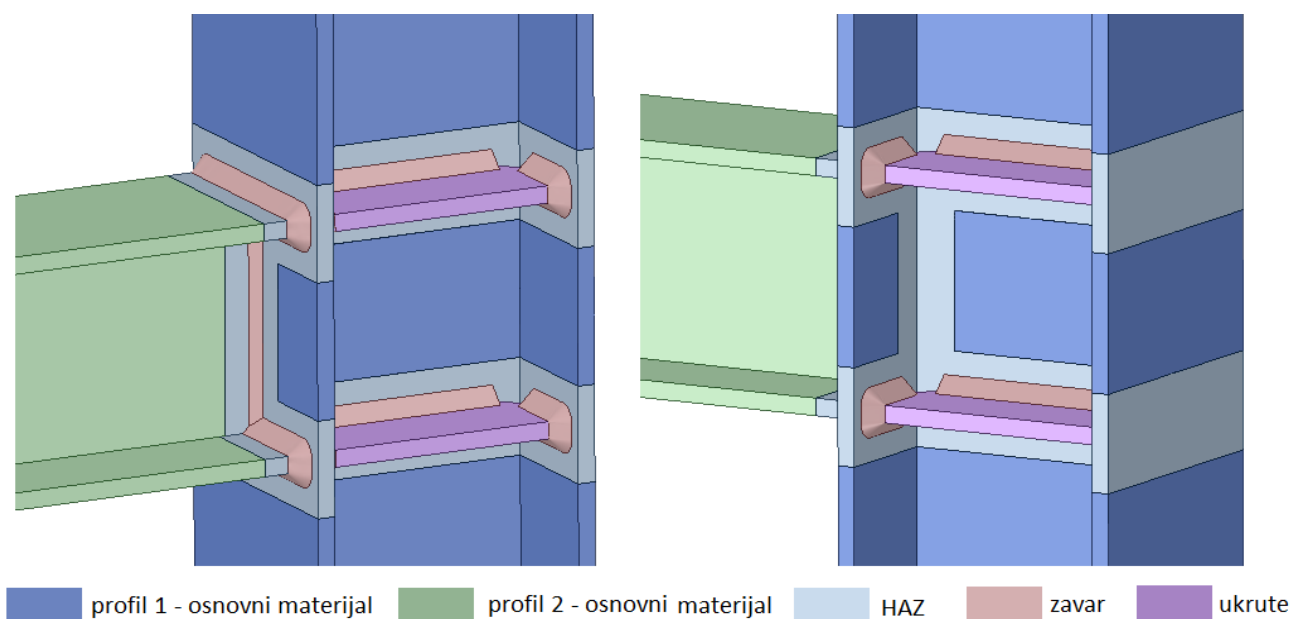


Crtež 3.4: model 1, bez ukruta - geometrija

3.1.4 Geometrija modela 2 – s ukrutama

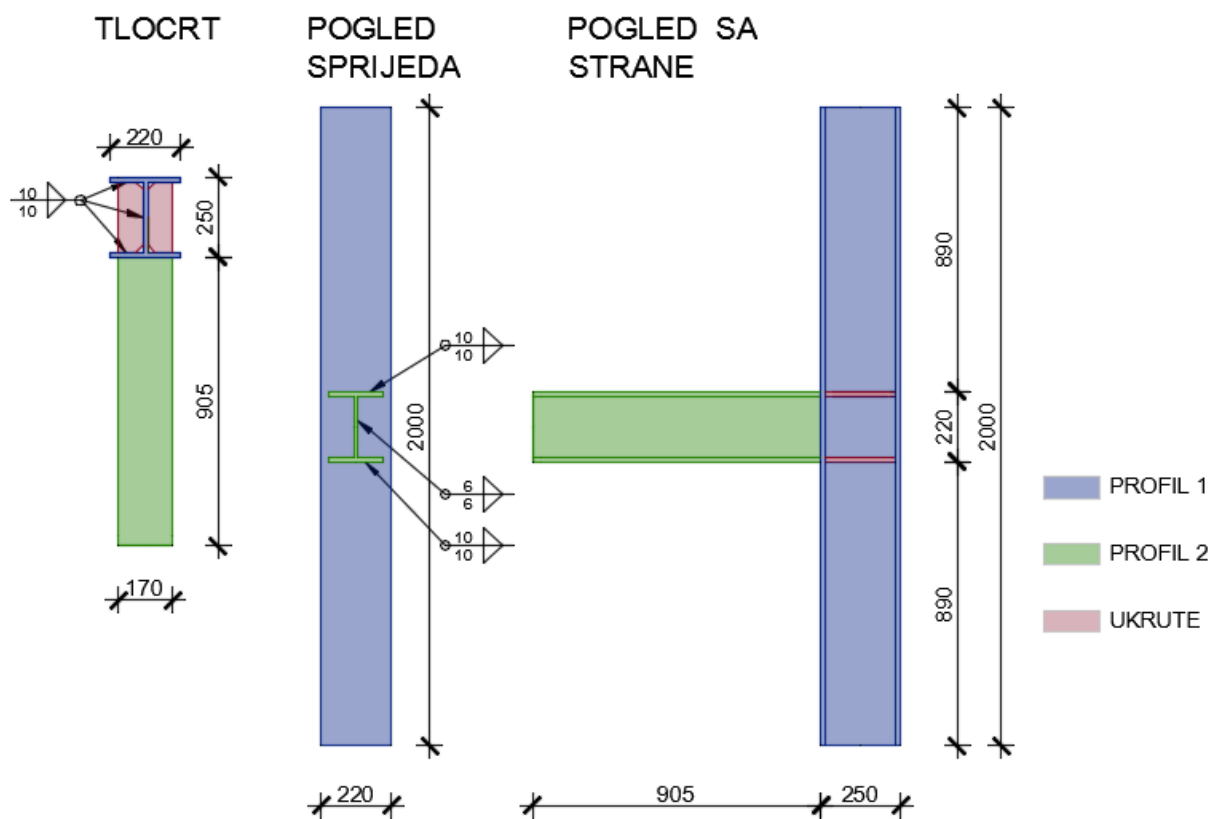
Kao i prvom modelu, spoj dvaju profila izveden je kutnim zavarima. Debljina zavora, za profile i ukrute, određena je po formuli $a = 0,7 \cdot t$

Zavari pojasnice i zavari ukruta debljine su 10 mm, a zvari hrpta su debljine 6 mm. Kontakt između dva profila, te profila i ukruta, modeliran je kao spoj s trenjem uz koeficijent trenja od 0.69, određen prema [34].



Crtež 3.5: 3-D prikaz detalja spoja [28]

Svakom elementu pridružen je pripadajući dijagram materijala iz poglavlja 2. Ukrute su u cijelosti unutar zone utjecaja topline stoga su modelirane istim materijalom kao i HAZ.



Crtež 3.6: model 2, s ukrutama - geometrija

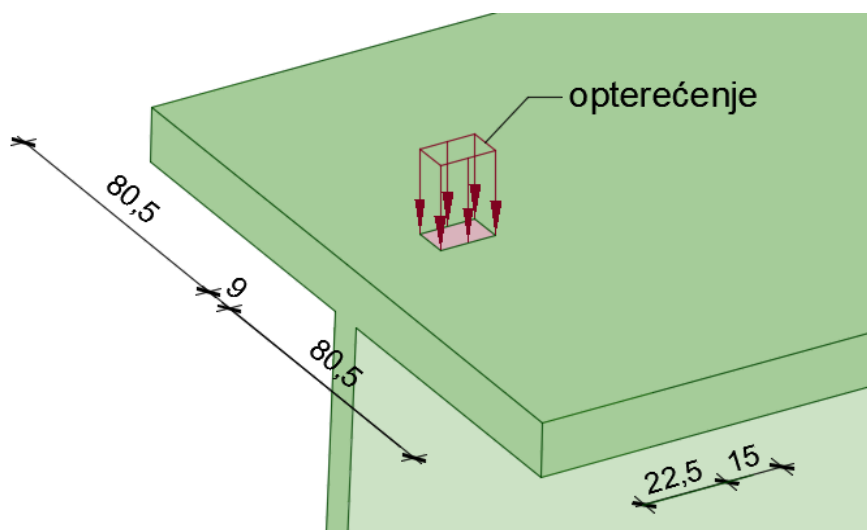
Dimenzije zone utjecaja topline određene su prema normi HRN EN 1999-1-1 [4], koristeći pravila navedena u poglavlju 1.2.2.4, i iznose:

- Profil 1, pojasnica – $t_f = 15 \text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 35 \text{ mm}$
- Profil 1, hrbat – $t_w = 14,5 \text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 35 \text{ mm}$
- Profil 2, pojasnice – $t_f = 15 \text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 35 \text{ mm}$
- Profil 2, hrbat – $t_w = 9 \text{ mm} \rightarrow b_{\text{haz}} = 30 \text{ mm}$

3.2 Opterećenje

Opterećenje na sustav je sila koja djeluje na konzoli. Da se izbjegne koncentracija naprezanja u zoni unosa sile, sila je zadana tako da djeluje na površini $9 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$.

Ovakvim zadavanjem opterećenja naprezanje se direktno prenosi u hrbat elementa te nema lokalnog savijanja pojasnica. Težište površine na kojoj sila djeluje od osi vertikalnog elementa udaljeno je 1000 mm .



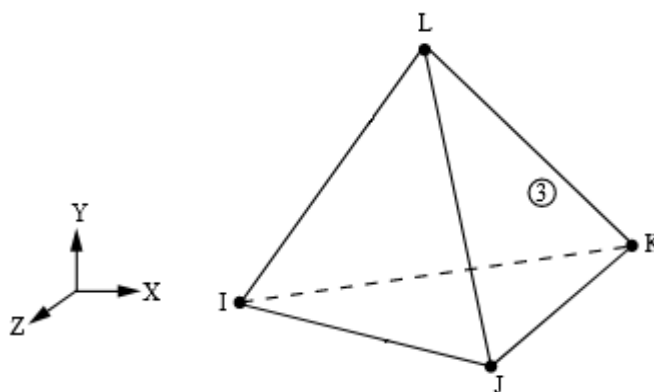
Crtež 3.7: područje djelovanja sile na konzoli

Sila ima prirast od $77,5 \text{ N/s}$ do trenutka sloma. Ovako definirano opterećenje rezultira pojavom momenta na samom spoju dvaju elemenata. Veličina momenta određena je intenzitetom sile u traženom trenutku te krakom sile koji iznosi 875 mm .

3.3 Ovisnost rezultata o mreži konačnih elemenata

Za proračun numeričkih modela 1 – bez ukruta i 2 – s ukrutama korišten je softver ANSYS [29][30][31]. Mreža konačnih elemenata izgrađena je od elemenata "SOLID285". Element SOLID285 je 3-D, 4-čvorni tetrahedralni element nižeg reda. Funkcija pomaka između čvorova je linearna. Element je prikladan za modeliranje nepravilnih mreža i općih materijala (uključujući nestišljive materijale).

Definiran je s četiri čvora od kojih svaki ima četiri stupnja slobode, tri translacije u nodalnim smjerovima x , y i z , i jedan hidrostatski tlak (HDSP) za sve materijale osim gotovo nestišljivih hiperelastičnih materijala. Za gotovo nestišljive materijale, umjesto hidrostatskog tlaka, brzina promjene volumena se koristi na svakom čvoru zajedno s trima stupnjevima slobode translacije. Elementima se dobro opisuje plastičnost, hiperelastičnost, puzanje, očvršćavanje, veliki progibi i velike sposobnosti deformacije.



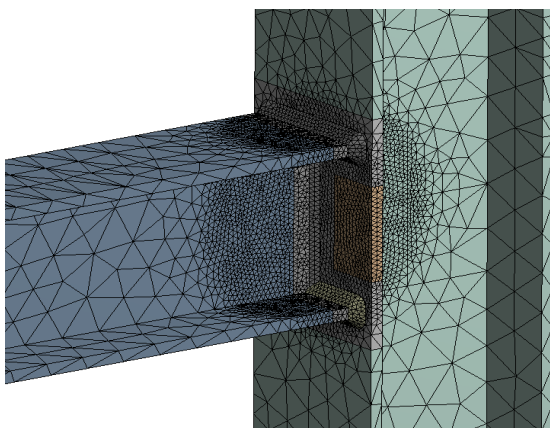
Crtež 3.8: geometrija konačnog elementa "SOLID285" [35]

Izvršeni su inicijalni proračuni iz kojih je zaključeno da rezultati proračuna ovise o gustoći mreže konačnih elemenata. Stoga je za oba modela i za obje varijante modela materijala izvršeno više proračuna s različitim gustoćama mreže konačnih elemenata. Mreže su modelirane na sljedeći način. Čitav model je modeliran relativno grubom mrežom da bi proračun koristio manje resursa računala, te samim time bio brži, nakon čega je tako formirana mreža dodatno progušćivana na mjestima gdje se očekuje koncentracija naprezanja i na mjestima pojave najvećih naprezanja. Progušćivanje je izvedeno korištenjem manjih konačnih elemenata čija je nazivna veličina varirana te su tako dobivene mreže različite gustoće.

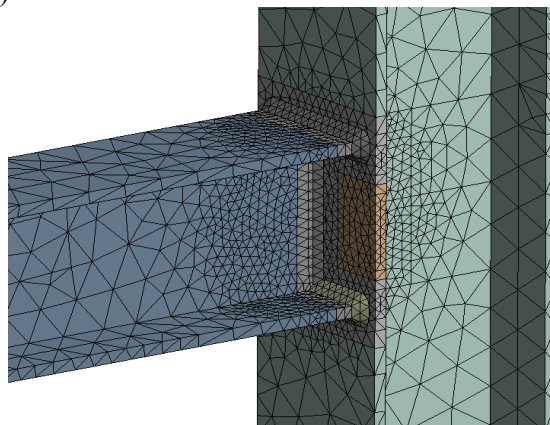
Promatrane su mreže s progušćenjem izvedenim upotrebom elemenata nazivne veličine 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 16mm, 18mm i 20mm.

Radi usporedbe utjecaja gustoće mreže na rezultate, za svaku mrežu konačnih elemenata promatran je pomak ruba konzole s obzirom na silu koja djeluje te prirast najveće relativne deformacije konačnih elemenata također u ovisnosti o sili koja djeluje. Sila koja uzrokuje pojavu najveće relativne deformacije veće od 10% definirana je kao sila koja djeluje u trenutku sloma odnosno to je točka u kojoj se proračun prekida. Na crtežima 3.9 i 3.10 prikazane su slike modela, iz programa ANSYS [29][30][31], za različite gustoće mreže.

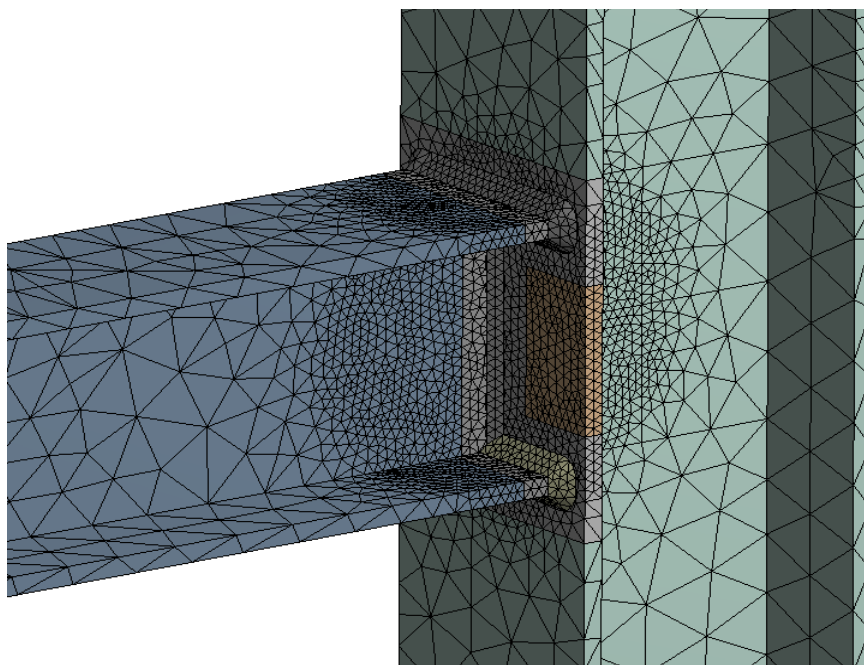
a)



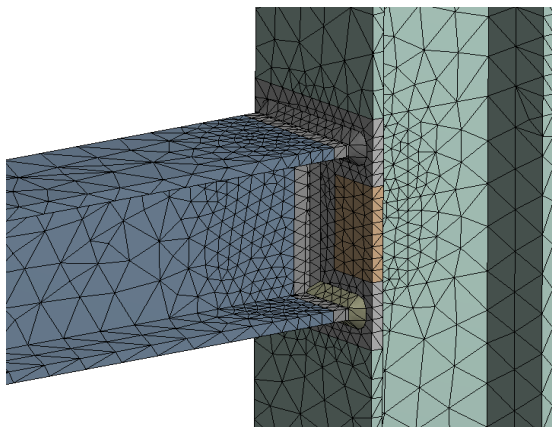
c)



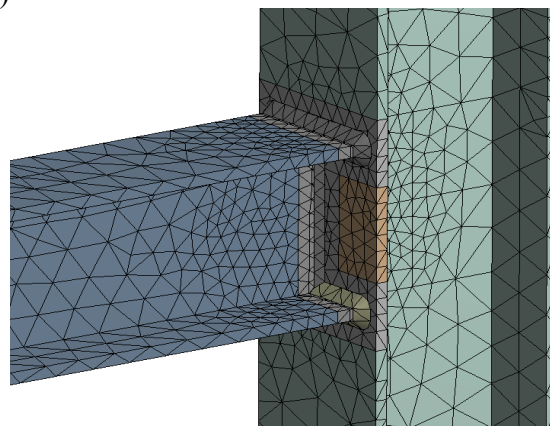
b)



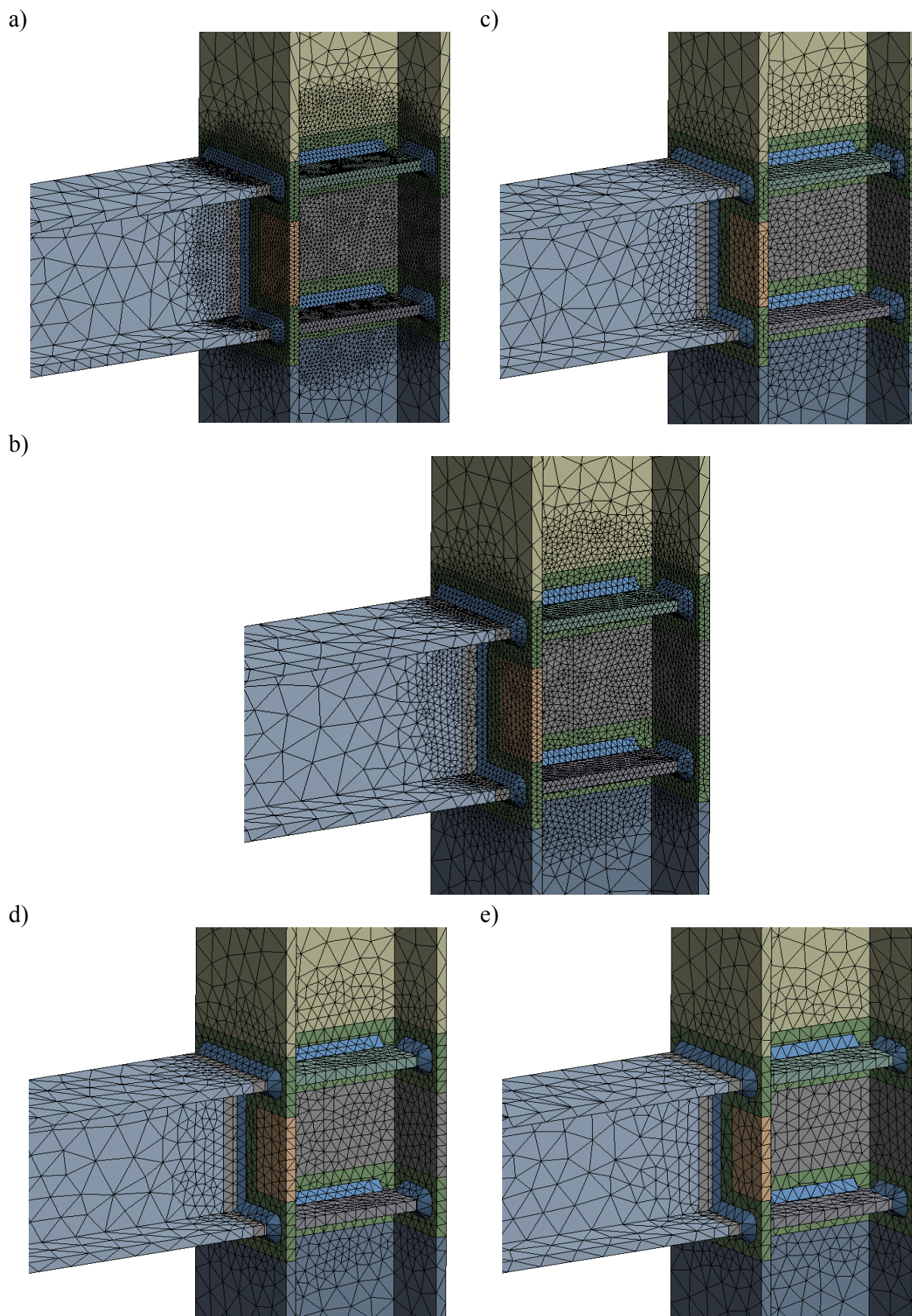
d)



e)



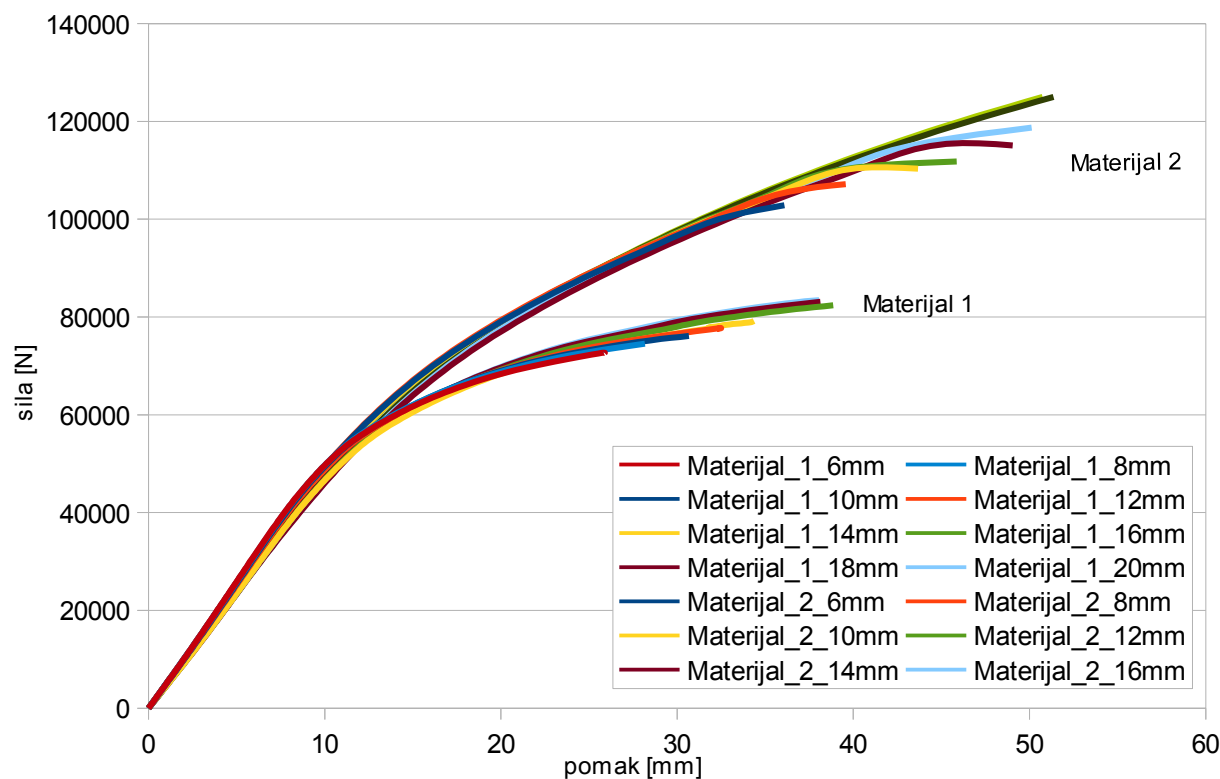
Crtež 3.9: prikaz mreže konačnih elemenata za različite nazivne veličine konačnih elemenata za model 1 – bez ukruta: a) 6mm b) 8mm c) 12mm d) 16mm e) 20mm.



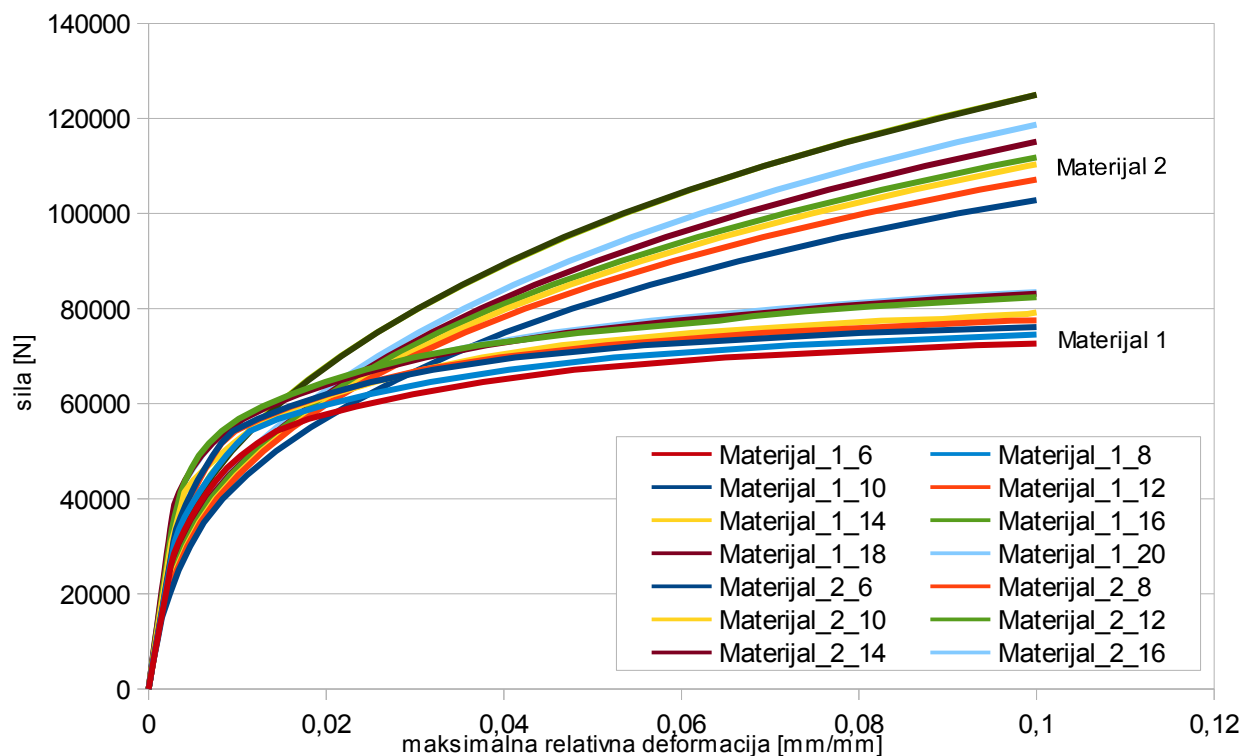
Crtež 3.10: prikaz mreže konačnih elemenata za različite nazivne veličine konačnih elemenata za model 2 – s ukrutama: a) 6mm b) 8mm c) 12mm d) 16mm e) 20mm.

3.3.1 Rezultati numeričkog modela1 – bez ukruta

Model materijala 1 je idealno elastoplastični model opisan u poglavlju 2.. Model materijala 2 je model izveden iz rezultata eksperimenata i prikazan je u poglavlju 2.3.



Grafikon 3.1: pomak kraja konzole u ovisnosti o sili koja djeluje, za modele materijala 1 i 2



Grafikon 3.2: maksimalna relativna deformacija modela u ovisnosti o sili koja djeluje, za modele materijala 1 i 2

Grafikon 3.1 prikazuje proračunom dobiveni pomak ruba konzole u ovisnosti o intenzitetu sile za priključak bez ukruta. Može se primijetiti da su rezultati, ovisno o korištenom modelu materijala, podijeljeni u dvije grupe. Otkazivanje sklopa kada se primjenjuje idealni elastoplastični materijal događa se ranije, odnosno pri manjoj sili nego kada se primjenjuje drugi model materijala (idealizirani model materijala dobiven eksperimentalnim ispitivanjima). Ovakav rezultat je očekivan jer se u drugom modelu materijala događa očvršćavanje u području plastifikacije.

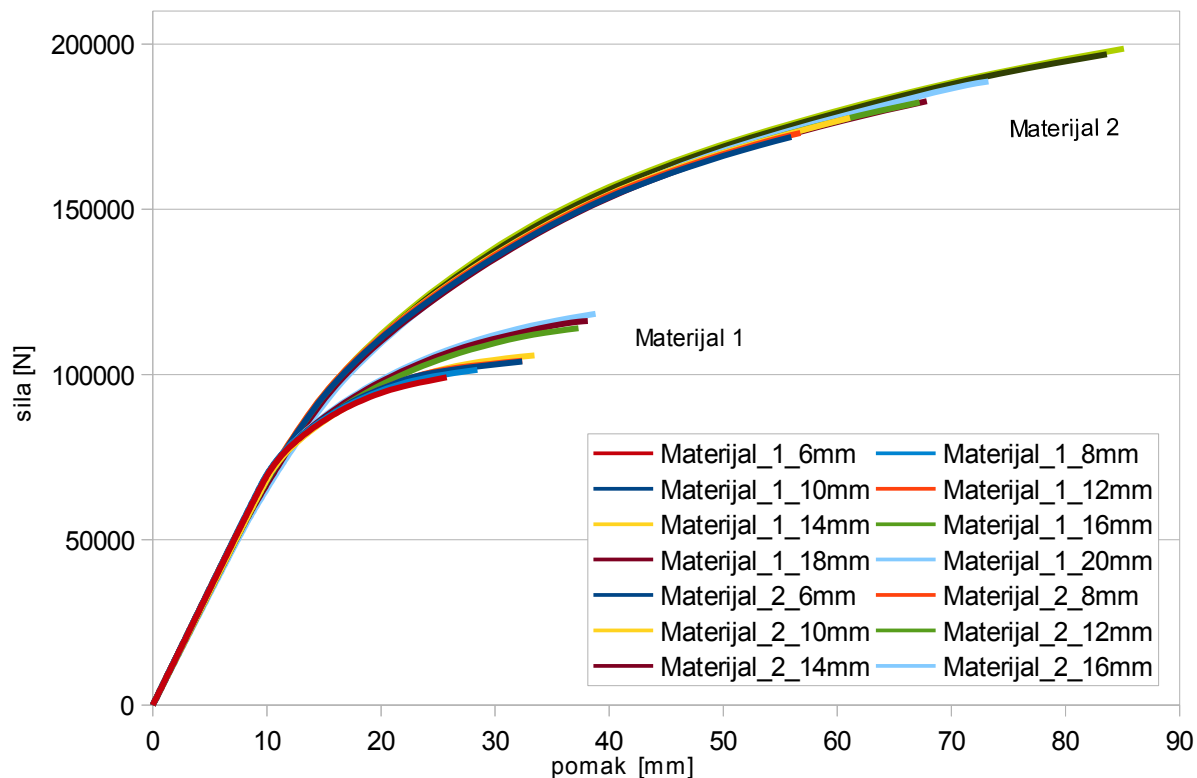
Općenito vrijedi da je veza sile i pomaka za sve gustoće mreže i za oba modela materijala konzistentna i razlika među krivuljama je minimalna sve do trenutka sloma, koji je različit za svaku pojedinu gustoću mreže. Mreže veće gustoće dovode prije do sloma sustava, dok sustav modeliran grubljom mrežom postiže veći pomak pri slomu. Varijacije pomaka pri slomu u ovisnosti o gustoći mreže su velike. Razlika najmanjeg i najvećeg ostvarenog pomaka je 14,83mm za materijal 1 i 15,28mm za materijal 2. Sama veličina sile u trenutku sloma također varira. Za idealni elastoplastični model materijala razlika u veličini sile pri slomu u ovisnosti o gustoći mreže je 12570 N, a za drugi model materijala oko 2210 N. Disperzija krajnjih rezultata u ovisnosti o gustoći mreže i kod modela materijala 1 je manja nego kod materijala 2.

Na grafikonu 3.2 prikazan je odnos sile i relativne deformacije. Vidljivo je da se za model materijala 1 granica loma od 10% dostiže pri manjoj sili nego kod modela materijala 2. Zanimljivo je da je prirast relativne deformacije u početku testa veći kod modela materijala 1 da bi se onda naglo ublažio u trenutku pojave plastifikacije u priključku. Krivulje rezultata za model materijala 2 su glatke krivulje, velikog gradijenta, ali s blagom promjenom istog od početka sve do otkazivanja.

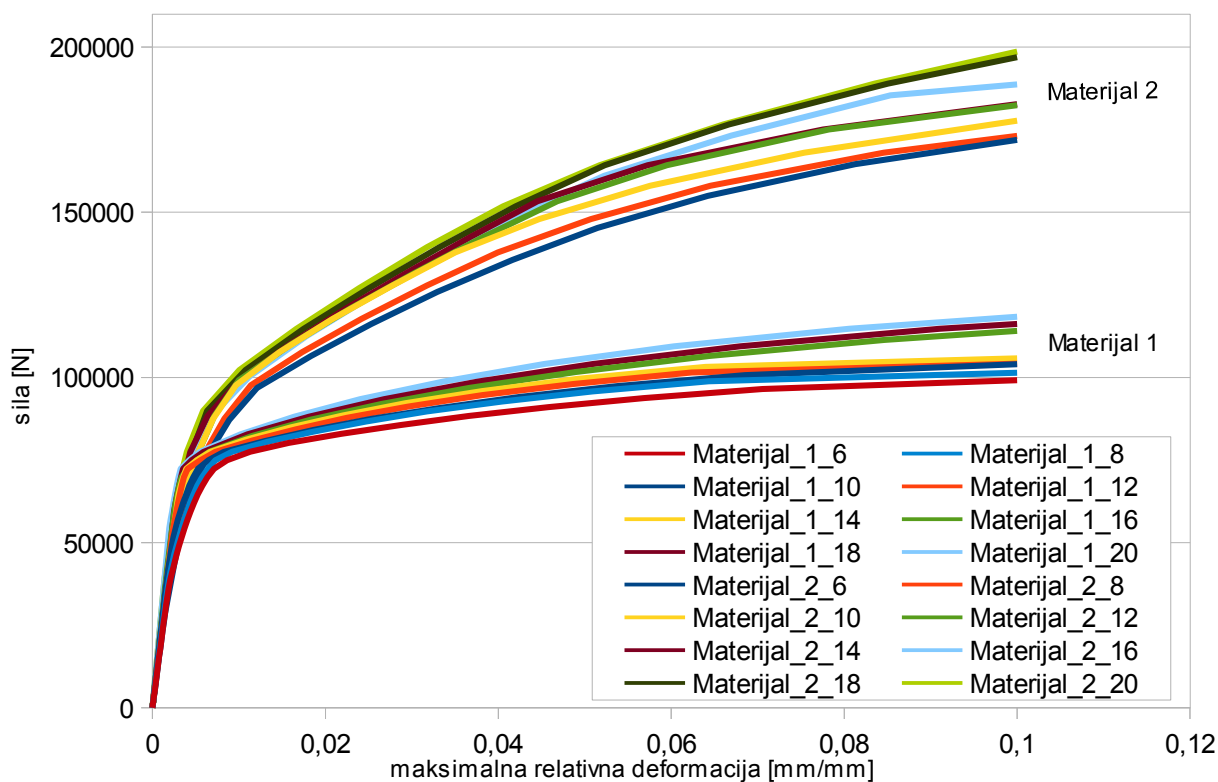
Vidljivo je da se za mreže veće gustoće granica otkazivanja dostiže pri sili manjeg intenziteta. Ova pojava rezultira, uz već prije spomenute razlike u krivuljama sila-pomak, da je pomak pri slomu puno manji za gušće mreže. To se događa jer se smanjenjem veličine konačnog elementa naprezanja i deformacije više lokaliziraju i njihov prirast je veći. Kao rezultat, za istu silu se dobivaju veća naprezanja ali su ona jako lokalizirana odnosno javljaju se na manjoj površini nego kada bi se model opisao mrežom manje gustoće.

3.3.2 Rezultati numeričkog modela2 – s ukрутama

Model materijala 1 je idealno elastoplastični model opisan u poglavlju 2.. Model materijala 2 je model izveden iz rezultata eksperimenata i prikazan je u poglavlju 2.3.



Grafikon 3.3: pomak kraja konzole u ovisnosti o sili koja djeluje, za materijal 1 i 2



Grafikon 3.4: maksimalna relativna deformacija modela u ovisnosti o sili koja djeluje, za materijal 1 i 2

Grafikon 3.3 prikazuje izračunom dobiveni pomak ruba konzole u ovisnosti o intenzitetu sile za slučaj spoja s ukrutama. Kao i za rezultate prethodnog modela, može se primijetiti da su isti podijeljeni u dvije grupe, ovisno o modelu materijala. Sve zakonitosti krivulja pomaka navedene u poglavlju 3.3.1 vrijede i za ove rezultate. Vrijedi teza da sustav modeliran mrežom veće gustoće prije postiže stanje sloma nego sustav modeliran grubljom mrežom.

Iz rezultata je lako uočljivo da ovaj sustav ima veću krutost od prethodno razmatranog, odnosno sila koja djeluje pri slomu je veća za modele materijala 1 i 2. Ostvareni pomaci pri slomu za model materijala 1 su u istim granicama, dok je pomak za materijal 2 veći nego kod prethodno razmatranog modela.

Krivulje za različite gustoće mreže za materijal 2 su gotovo identične, ali kao i u prethodnom poglavlju, pomak i sila pri slomu variraju. Razlika između vrijednosti sile za najveću i najmanju gustoću mreže iznosi 26690 N, a razlika u konačno ostvarenom pomaku je 13,04mm. Za materijal disperzija rezultata je malo veća te ne nisu tijesno grupirani kao krivulje za materijal 2. Razlika u sili je 13210 N a u konačnom pomaku 13,04mm.

Na grafikonu 3.4 prikazan je odnos sile i maksimalne relativne deformacije za model s ukrutama. Kao i u prethodnom razmatranju primjetno je da do sloma, kada se primjenjuje idealni elastoplastični model materijala, dolazi prije nego kod modela kada se primjenjuje model materijala 2. Razlika u odnosu na rezultate iz poglavlja 4.3.2 je da je u početku prirast deformacije za oba materijala jednak do trenutka pojave plastifikacije u materijalu 1, kada sustav rapidno gubi krutost i nastupa slom. Kao i u analizi modela bez ukruta, disperzija krajnjih rezultata u ovisnosti je o gustoći mreže i kod modela materija 1 je manja nego kod materijala 2. Vidljivo je također da se za gušće mreže granica otkazivanja dostiže pri sili manjeg intenziteta što je, kao i ranije, posljedica lokalizacije naprezanja koja djeluju na manjoj površini ako je mreža veće gustoće.

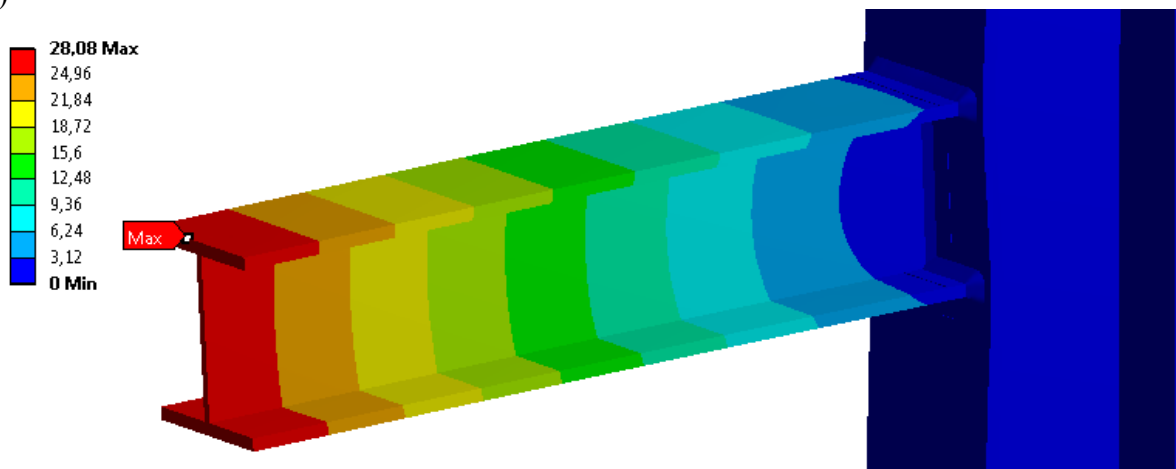
3.4 Mjerodavni rezultati

Sukladno rezultatima dobivenim u poglavlju 2.3.4.4, kao mjerodavna odabrana je mreža s nazivnom veličinom konačnog elementa od 8 mm, za modele sa i bez ukruta, s modelima materijala 1 i 2.

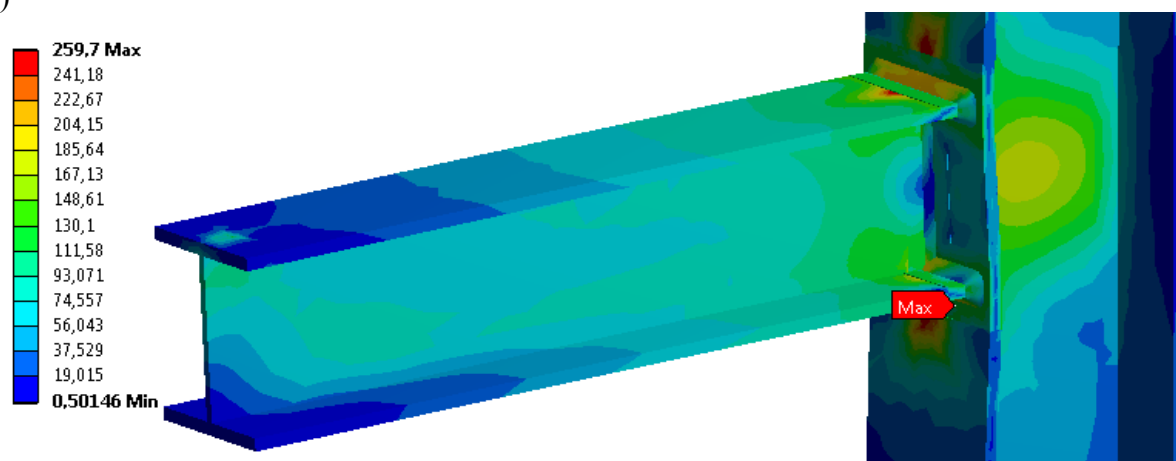
Na sljedećim crtežima 3.11, 3.12, 3.13 i 3.14 prikazani su rezultati proračuna, dobiveni u programu ANSYS [29][30][31], u pogledu deformacije modela, raspodjele naprezanja u elementima te relativne deformacije u trenutku otkazivanja priključka odnosno u trenutku kada se u nekoj točki modela dostiže relativna deformacija od 10%.

3.4.1 Rezultati numeričkog proračuna

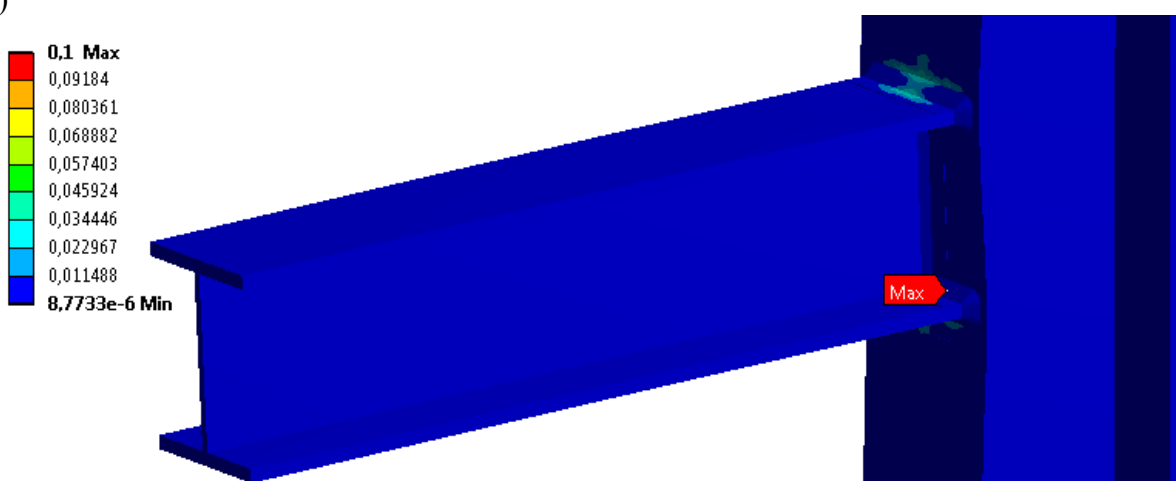
a)



b)

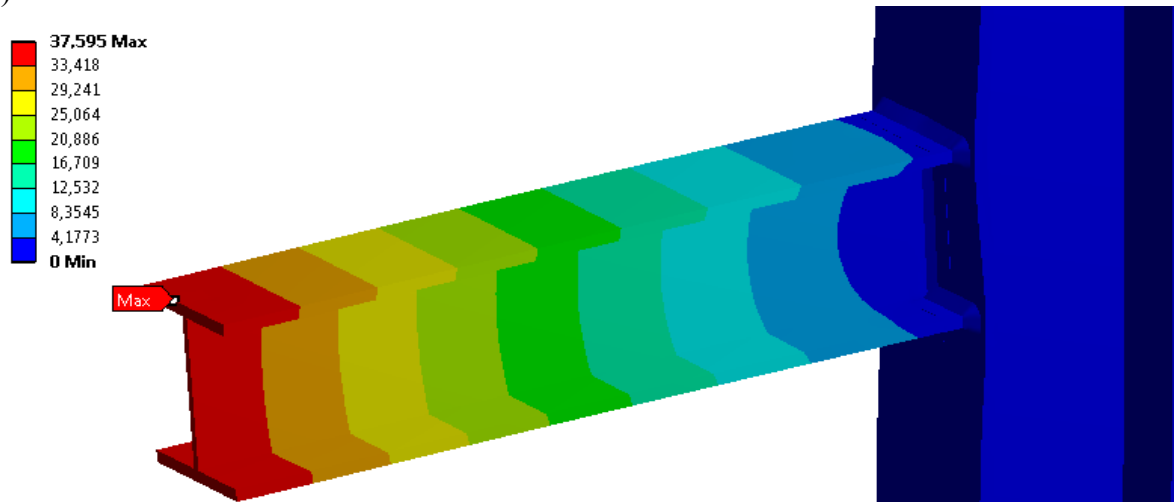


c)

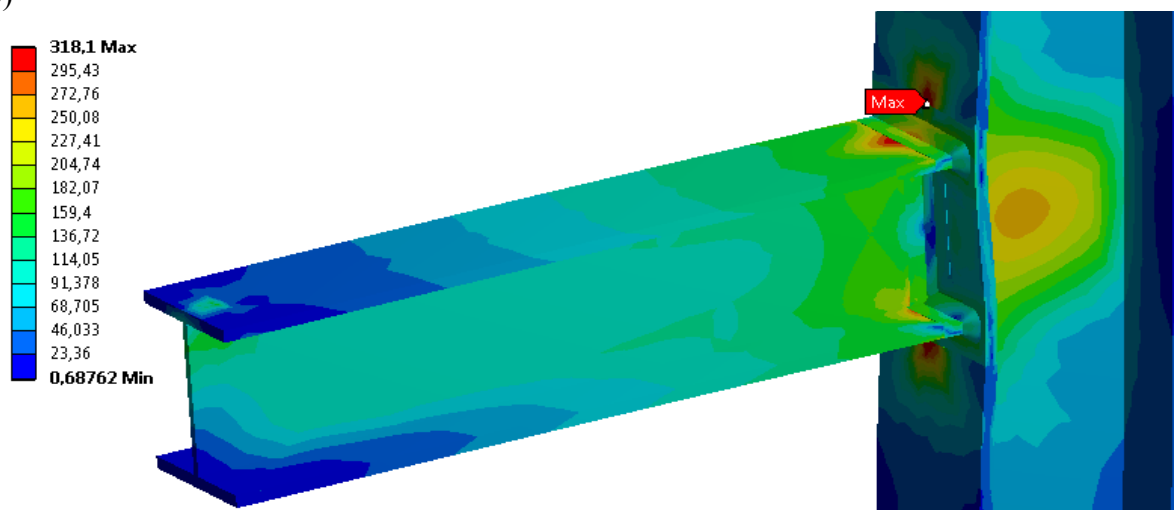


Crtež 3.11: grafički prikaz rezultata numeričkog proračuna u trenutku otkazivanja, za model bez ukruta i korišteni model materijala 1: a) deformacija modela b) naprezanje c) relativna deformacija

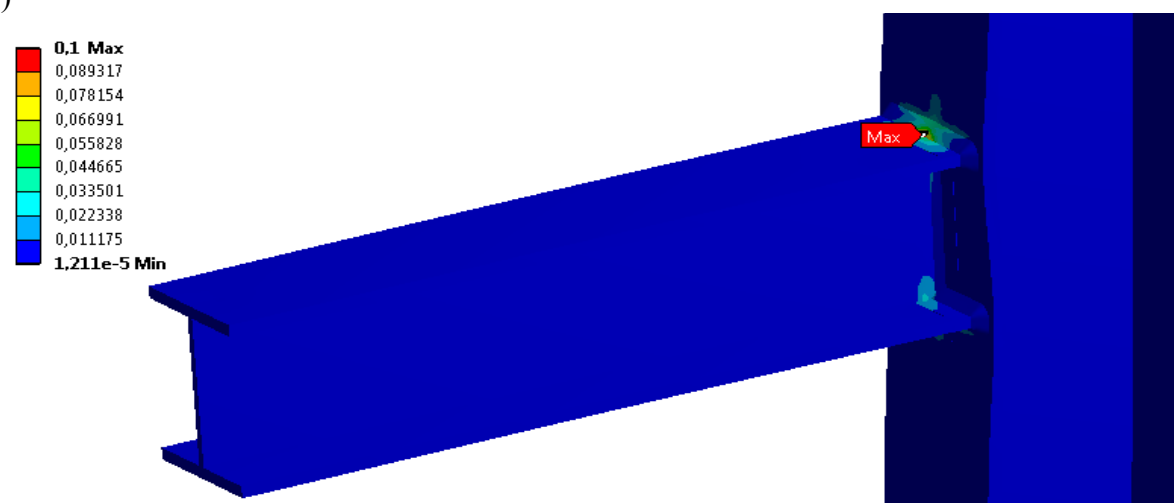
a)



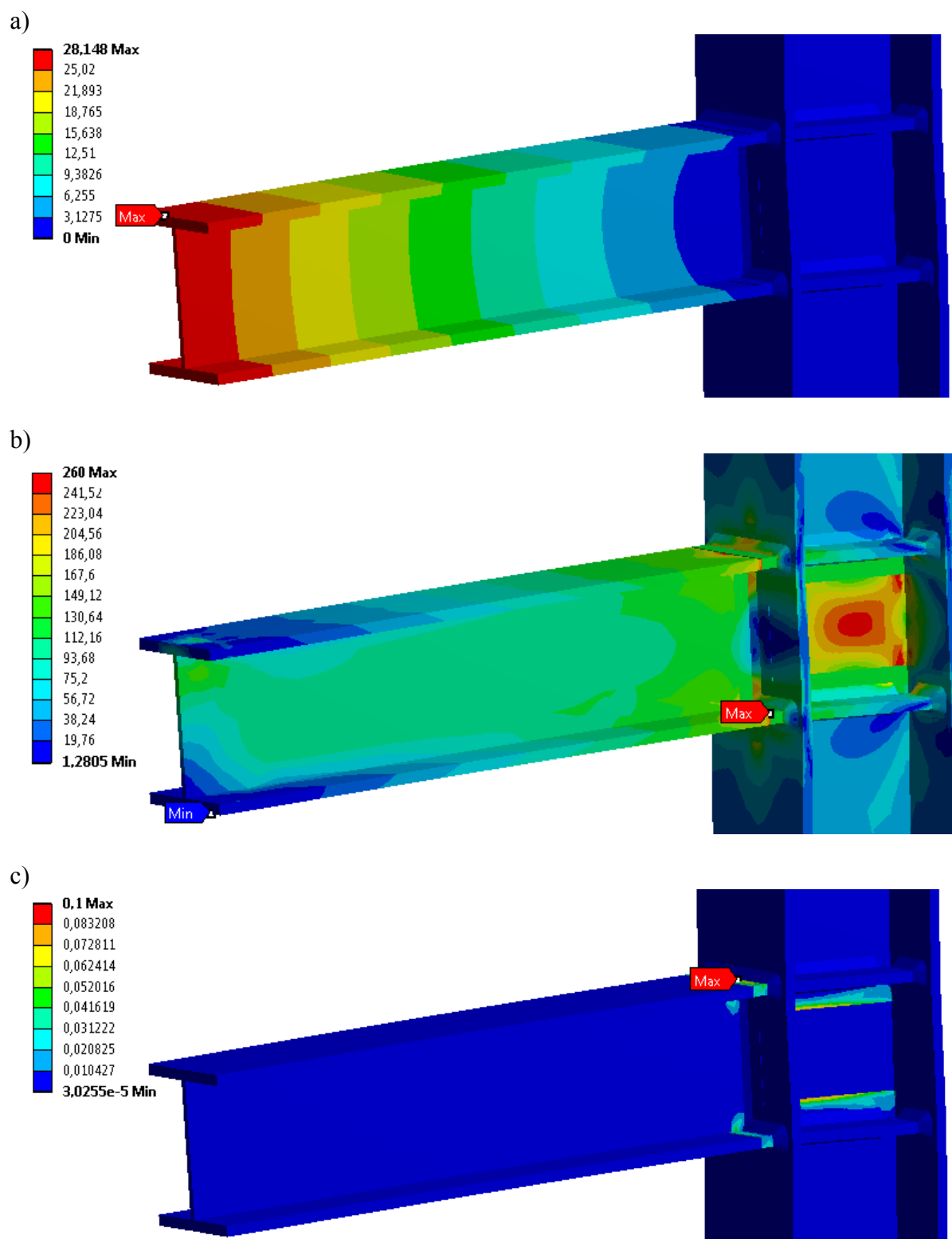
b)



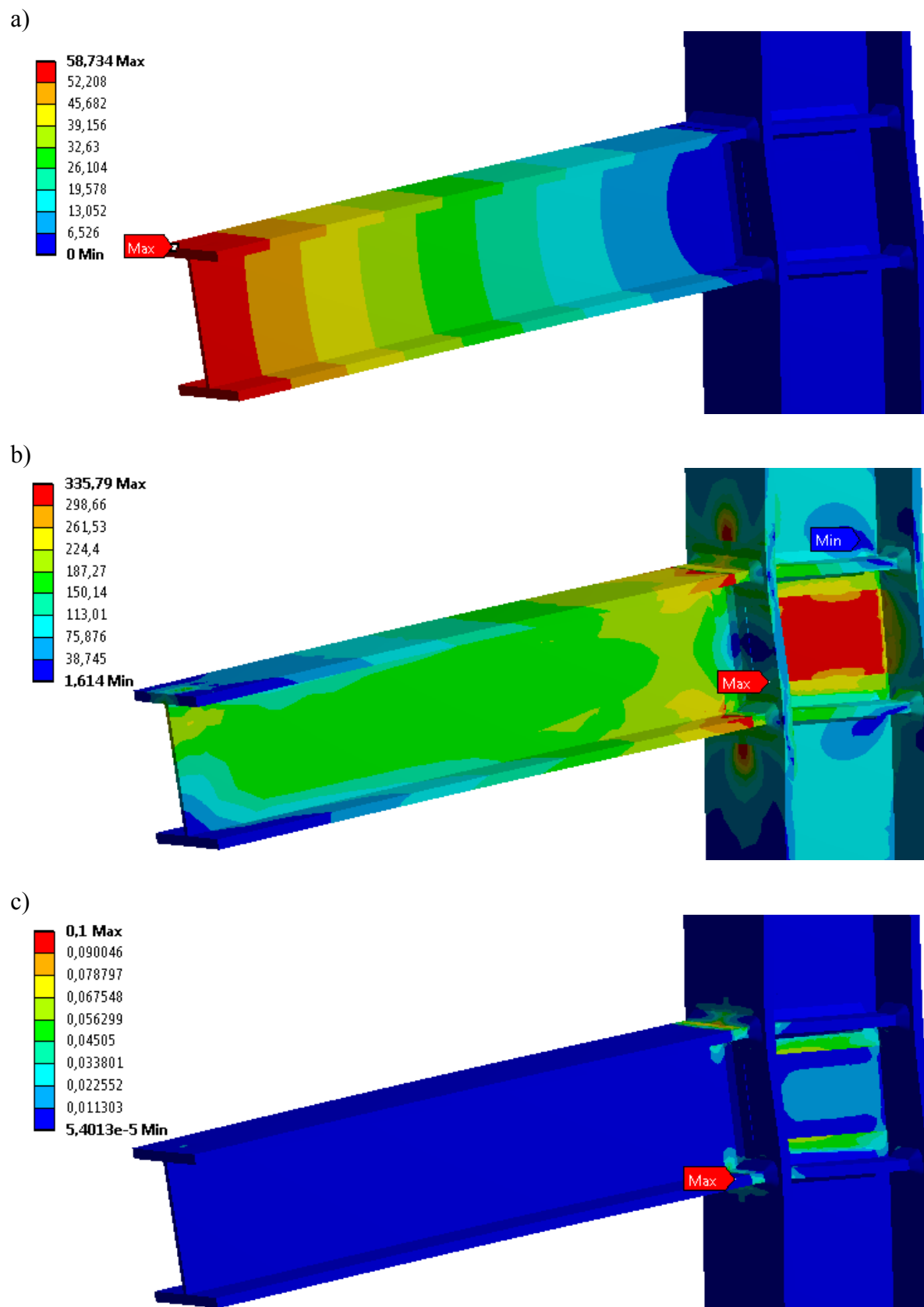
c)



Crtež 3.12: grafički prikaz rezultata numeričkog proračuna u trenutku otkazivanja, za model bez ukruta i korišteni model materijala 2: a) deformacija modela b) naprezanje c) relativna deformacija



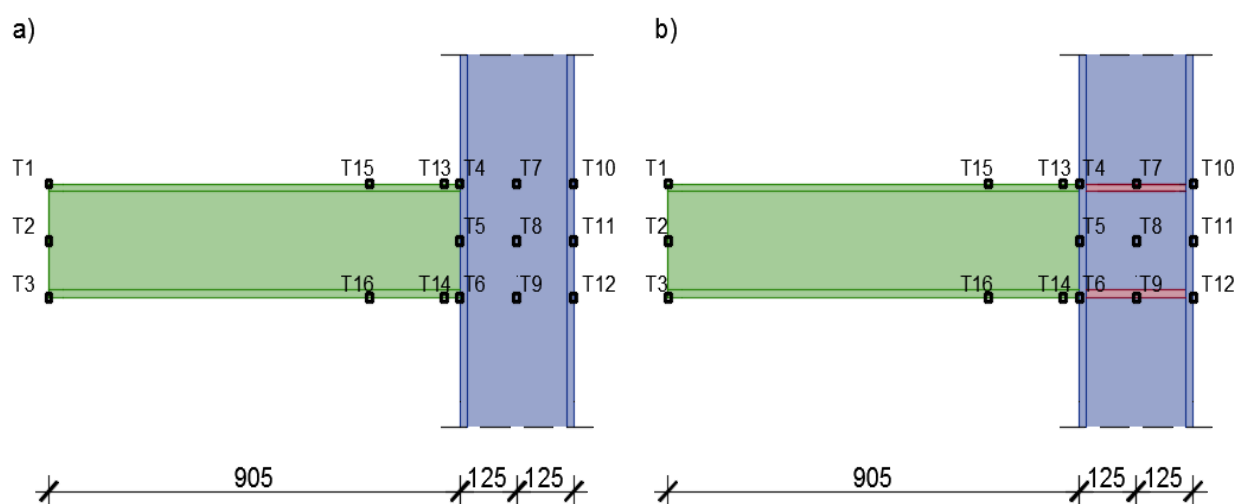
Crtež 3.13: grafički prikaz rezultata numeričkog proračuna u trenutku otkazivanja, za model s ukрутama i korišteni model materijala 1: a) deformacija modela b) naprezanje c) relativna deformacija



Crtež 3.14: grafički prikaz rezultata numeričkog proračuna u trenutku otkazivanja, za model s ukrutama i korišteni model materijala 2: a) deformacija modela b) naprezanje c) relativna deformacija

3.4.2 Dijagrami moment - kut zaokreta

Da bi se konstruirao $M-\phi$ dijagram potrebno je utvrditi način određivanja samog kuta zaokreta spoja ali i momenta koji na spoj djeluje. Za određivanje kuta zaokreta promatran je pomak 16 točaka na modelu da bi se detektirala točka oko koje se sustav rotira te da se utvrdi je li ta točka konstantna tijekom trajanja izračuna. Točke su na modelu sa ukrutama i na modelu bez ukruta postavljene na istim mjestima. Leže u vertikalnoj ravnini koja prolazi kroz os horizontalnog profila. Prve grupe točaka postavljene su na kraju konzole, na spoju konzole i vanjske plohe vertikalnog elementa, u osi vertikalnog elementa i na vanjskoj strani vertikalnog elementa. Svaka grupa se sastoji od tri točke raspoređene visinski tako da je jedna u razini gornjeg ruba horizontalnog profila, druga u osi i treća na donjem rubu istog. Druge grupe točaka sastoje se od para točaka od kojih je jedna na gornjoj plohi horizontalnog elementa a druga na donjoj. Nalaze se na udaljenosti od 35 i 200 mm od vanjskog ruba plohe vertikalnog elementa. Položaj točaka koje se prate prikazan je na crtežu 3.15.

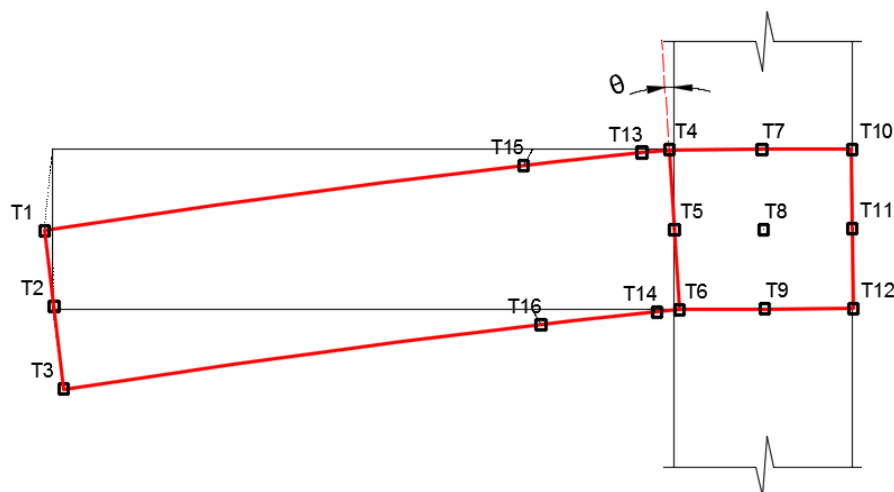


Crtež 3.15: prikaz praćenih točaka: a) na modelu bez ukruta b) na modelu s ukrutama

Da bi se utvrdio mehanizam deformiranja priključka, rezultati pomaka promatranih točaka prikazani su grafički. Utvrđeno je da se relevantni zaokret događa na prednjoj plohi vertikalnog elementa, odnosno definiran je točkama T4 i T6. Sukladno tome utvrđene su relacije za izračunavanje kuta zaokreta te je isti izračunat za svaki vremenski interval proračuna, analitički.

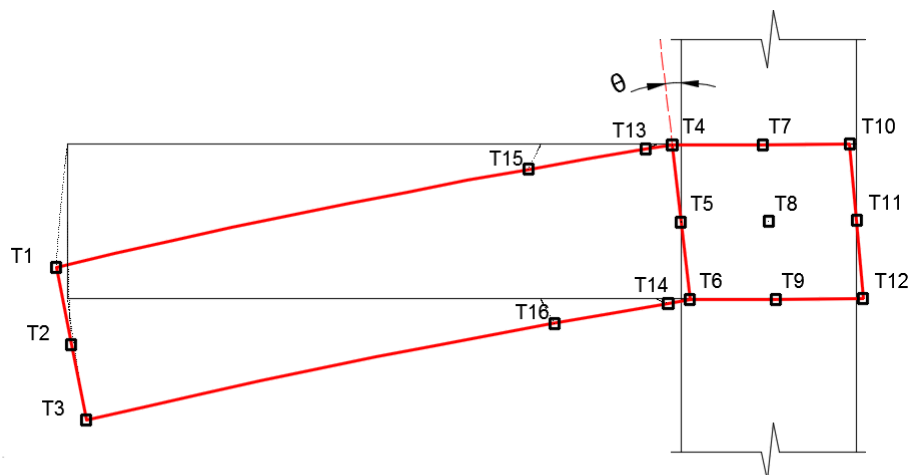
Ovim postupkom dobiveni su relevantne vrijednosti rotacije spoja u ovisnosti o momentu odnosno sili koja djeluje, za varijante spoja:

- bez ukruta - modeli materijala 1 i 2
- s ukrutama – modeli materijala 1 i 2



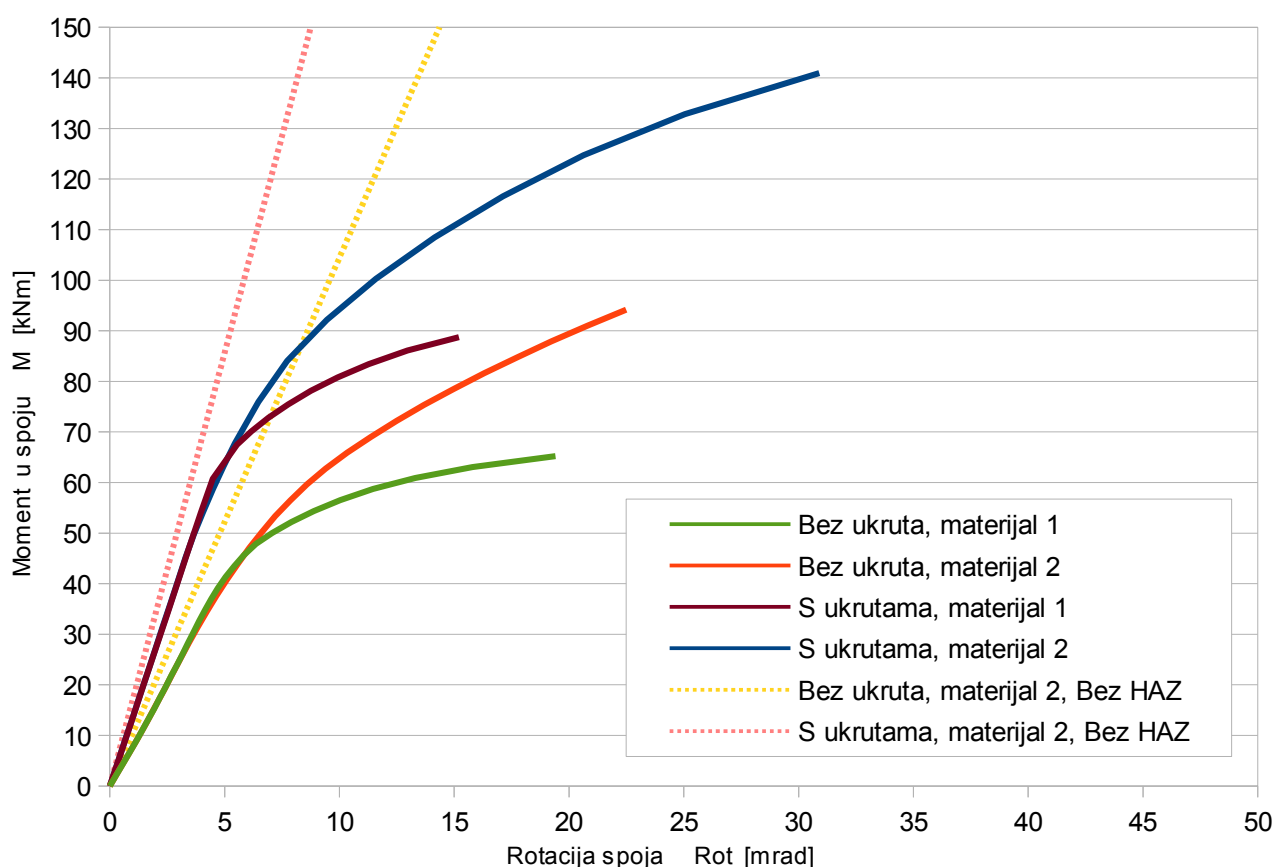
Crtež 3.16: pomaci praćenih točaka za model bez ukruta, za model materijala 2, te kut koji se mjeri (θ); pomaci su uvećani 3 puta radi bolje preglednosti

Da bi se dobio moment koji djeluje na spoj, sila na konzoli je pomnožena s krakom, odnosno s udaljenošću od težišta plohe na kojoj sila djeluje do vanjskog ruba vertikalnog profila. Ta udaljenost iznosi 905 mm.



Crtež 3.17: pomaci praćenih točaka za model s ukrutama, za model materijala 2, te kut koji se mjeri (θ); pomaci su uvećani 3 puta radi bolje preglednosti

Na crtežima 3.16 i 3.17 prikazani su pomaci promatranih točaka za priključak bez ukruta i s ukrutama uz korišteni model materijala 2 te je označen kut koji se mjeri za formiranje M- φ krivulja.



Grafikon 3.5: dijagrami moment-rotacija za različite varijante modeliranja priključka

Na grafikonu 3.5 vidljivo je da se ukrućivanjem spoja postižu bolje karakteristike istog. Inicijalna krutost modela s ukrutama je očekivano veća od neukrućenog. Usporedbom $M-\varphi$ krivulja priključka bez ukruta za materijal 1 i materijal 2, može se zaključiti sljedeće:

- U linearno elastičnom području obje krivulje se preklapaju što je očekivano jer je to područje jednako definirano u oba modela materijala.
- Idealno elastoplastični model daje manju otpornost priključka što se ogleda manjim momentom koji djeluje u trenutku sloma.
- U trenutku prekoračenja naprezanja granice popuštanja u modelu materijala 1, dolazi do značajnog pada krutosti i sustav otkazuje za manji moment.
- Duktilnost samog priključka također je veća pri korištenju modela materijala 2 odnosno modela koji je konstruiran iz rezultata eksperimenata.

Krivulje za model s ukrutama ponašaju se slično kao i krivulje za model bez ukruta. Vidljivo je da krivulje za model materijala 2 imaju veću otpornost i ostvaruje se gotovo dva puta veća nosivost.

Veličina ostvarene rotacije pri slomu za model s ukrutama uz korišteni model materijala 2 puno je veća nego kada je u istom korišten model materijala 1 odnosno priključak modeliran idealnim elastoplastičnim materijalom je manje duktilan. Primjetno je da ovaj model ima manju duktilnost i od modela bez ukruta u obe dvije varijante.

Za obje varijante spoja, s ukrutama i bez istih, izvršen je i numerički proračun za izračunavanje početne krutosti, u linearno elastičnom području, za model u kojem zona HAZ-a nije definirana odnosno čine ga samo osnovni materijal i zavar i rezultati istog su prikazani na dijagramu u pogledu pravaca na dijagramima moment-rotacija. Analizom ovih pravaca može se primijetiti da, kao i u prijašnjim modelima, priključak s ukrutama ima veću krutost od neukrućenog priključka. Kada se isti usporede s prije opisanim krivuljama vidljivo je da je krutost modela koji sadrže zonu HAZ-a manja od krutosti modela bez HAZ-a. Ovakvo ponašanje je očekivano jer zona HAZ-a ima puno manje mehaničke karakteristike od osnovnog materijala i kada dođe do koncentriranja naprezanja u ovoj zoni vrlo brzo dolazi do pojave plastifikacije i na kraju loma.

4. ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata dobivenih u prethodnim poglavljima mogu se izvesti zaključci navedeni u nastavku.

Numerički model za evaluaciju modela materijala 2, odnosno modela materijala izvedenog iz rezultata eksperimenata, daje rezultate koji dobro opisuju stvarno ponašanje priključka.

Na temelju rezultata dobivenih različitim modelima zone utjecaja topline, utvrđeno je da model zone utjecaja topline prema HRN EN 1999-1-1 [4] daje nepovoljnije stanje ponašanja priključka jer je krutost priključka precijenjena.

Iz konstruiranih dijagrama moment-rotacija vidljivo je da unatoč postojanju zone HAZ-a koja ima lošije karakteristike od osnovnog materijala, ukrućivanje priključaka u aluminiju daje poboljšanje svojstava priključka u pogledu veće krutosti, otpornosti i duktilnosti.

Usporedbom dobivenih rezultata može se zaključiti da se primjenom modela materijala izvedenog iz rezultata eksperimenata dobiva veća duktilnost priključka i veća otpornost u odnosu na idealni elastoplastični model. Primjenom idealnog elastoplastičnog modela, koji je definiran u normi HRN EN 1999-1-1 [4], dobivanju rezultati koji su na strani sigurnosti.

5. Literatura

- [1] Boko, I.; Skejić, D.; Torić, N.: Aluminijske konstrukcije, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2017.
- [2] Fotografija aluminijska kupola, http://plasmapheresis-me.com/TANK_EQUIPMENT_Domes.html
- [3] Dokšanović, T.; Džeba, I.; Markulak, D.: Applications of aluminium alloys in civil engineering, Technical Gazette 24, Vol 5, 2017.
- [4] HRN EN 1999-1-1: 2015, Eurokod 9, Projektiranje aluminijskih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila (EN 199-1-1: 2007+A1:2009+A2:2013), HZN, 2015.
- [5] Fotografija aluminijski most, <http://www.archiexpo.es/prod/maadi-group/product-56692-1102749.html>
- [6] Skejić, D., Boko, I., Torić, N.: Aluminium as a material for modern structures, Građevinar, 67 (2015) 11, pp. 1075-1085, doi: 10.14256/JCE.1395.2015
- [7] Dolić, N.: Metalurgija aluminija, Sisak, ožujak 2015.
- [8] Crtež Bayerov proces, <http://www.keywordbasket.com/YmF5ZXIgcHJvY2VzcyBhbHVtaW5h/>
- [9] HRN EN 573-1: 2008, Aluminij i aluminijske legure – Kemijski sastav i oblik gnječenih proizvoda – 1. dio: Sustav brojanog označavanja (EN 573-1:2004), HZN, 2008.
- [10] HRN EN 573-2: 2008, Aluminij i aluminijske legure – Kemijski sastav i oblik gnječenih proizvoda – 2. dio: Sustav označavanja na temelju kemijskih simbola (EN 573-2:1994), HZN, 2008.
- [11] HRN EN 1780-1: 2008, Aluminij i aluminijske legure – Označavanje legiranih aluminijskih ingota za pretaljivanje, predlegure i odljevke – 1. dio: Sustav brojanog označavanja (EN 1780-1:2008), HZN, 2008.
- [12] HRN EN 1780-2: 2008, Aluminij i aluminijske legure – Označavanje legiranih aluminijskih ingota za pretaljivanje, predlegure i odljevke – 2. dio: Sustav označavanja kemijskim simbolima (EN 1780-2:2002), HZN, 2008.
- [13] HRN EN 1780-3: 2008, Aluminij i aluminijske legure – Označavanje legiranih aluminijskih ingota za pretaljivanje, predlegure i odljevke – 3. dio: Pravila pisanja kemijskog sastava (EN 1780-3:2002), HZN, 2008.
- [14] Torca, I. I dr.: Tensile behaviour of 6082 aluminium alloy sheet under different conditions of heat treatment, temperature and strain rate, Key Engineering Materials, Vol. 423, 2010
- [15] HRN EN 515: 2008, Aluminij i njegove legure -Gnječeni proizvodi- Označavanje stanja (EN 515:1993), HZN, 2008.
- [16] HRN EN 573-3:2014, Aluminij i aluminijske legure -- Kemijski sastav i oblik gnječenih proizvoda - 3. dio: Kemijski sastav i oblik gnječenih proizvoda, HZN, 2014
- [17] Fotografija zavarivanja, <http://alluae.ae/aluminium-welding-dubai/>
- [18] Crtež postupci zavarivanja, <https://i1.wp.com/www.weldinghandbook.com/wp-content/uploads/2017/08/tig-welding.jpg?w=382&ssl=1>
- [19] HRN EN 1011-4:2001, Zavarivanje -- Preporuke za zavarivanje metalnih materijala -- 4. dio: Elektrolučno zavarivanje aluminija i aluminijskih legura (EN 1011-4:2000), HZN, 2001.
- [20] Dwight, J.: Aluminium Design and Construction, E & FN Spon, 1999.
- [21] Dokšanović, T.; Markulak, D.; Džeba, I.: Stanje područja stabilnosti i zavarivanja elemenata od aluminijskih legura, Građevinar, Vol 66, 2014.
- [22] Anderson, T: Welding Aluminum-Questions and Answers, American welding society, 2010.

- [23] Crtež pop zakovica, http://www.marshallsales.com/pr_rivets.php
≤24≥ Crtež huck vijak
https://www.afshuck.net/us/en/Products/Fasteners/HuckBolts/C6L.html?no_redirect=true
- [25] Wang, T. I dr.: Finite element analysis of beam-to-column joints in aluminium alloy EN AW 6082 T6, Finite Elements in Analysis and Design, Vol 44, 2007.
- [26] Wang, T.: Modelling of Welded Thin-Walled Aluminium Structures, doktorska disertacija, NTNU, Trondheim, 2006.
- [27] Matusiak, M.: Strength and ductility of welded structures in aluminium alloys, doktorska disertacija, NTNU, Trondheim, 1999.
- [28] SpaceClaim Corporation, SpaceClaim User's Guide, 2007.
- [29] ANSYS, Inc.: ANSYS Meshing User's Guide, 2013.
- [30] Kohnke, P.: ANSYS Theory reference, SAS IP, inc., 1999.
- [31] Madenci, E.;Güven, I.: The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®, Springer, 2015.
- [32] Crtež ANSYS element 187, https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID187.html
- [33] Katalog aluminijskih profila proizvođača "Blecha", <https://www.aluprofil.at/hr/standardni-profil/trazilica-profila/>
- [34] Koeficijent trenja za aluminijske legure,
https://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm
- [35] Crtež ANSYS element 285, https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID285.html