

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

Tilen ŠTEFANE

**SANACIJA OGRODJA PRIJEMALA
MANIPULATORJA ALUMINIJASTIH BRAM**

Diplomsko delo
univerzitetnega študijskega programa 1. stopnje
Strojništvo

Maribor, september 2013



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

SANACIJA OGRODJA PRIJEMALA MANIPULATORJA ALUMINIJASTIH BRAM

Diplomsko delo

Študent: Tilen ŠTEFANE
Študijski program: Univerzitetni študijski program 1. stopnje Strojništvo
Smer: Konstrukterstvo

Mentor: red. prof. dr. Zoran REN
Somentor: asist. dr. Matej BOROVIŠEK

Maribor, september 2013



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Številka: S-B0145

Datum in kraj: 10.10.2012, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 6/2012)
izdajam

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

TILNU ŠTEFANETU, študentu univerzitetnega študijskega programa 1. stopnje **STROJNIŠTVO**, smer **KONSTRUKTERSTVO**, se dovoljuje izdelati diplomsko delo pri predmetu **Inženirske računalniške simulacije**.

Mentor: red. prof. dr. Zoran Ren
Somentor: asist. dr. Matej Borovinšek

Naslov diplomskega dela: **Sanacija ogrodja prijemala manipulatorja aluminijastih bram**

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku: **Reconstruction of handling arm housing of aluminum ashlar manipulator**

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za izdelavo diplomskega dela« in ga oddati v treh izvodih do **30.09.2013** v referatu za študentske zadeve članice.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.

Dekan:

red. prof. dr. Niko Samec

Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv



IZJAV A

Podpisani Tilen Štefane izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom red. prof. dr. Zorana Rena in somentorstvom asist. dr. Mateja Borovinška;
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v Knjižnici tehniških fakultet Univerze v Mariboru.

Maribor, 29.08.2013

Podpis: _____

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju red. prof. dr. Zoranu Renu in somentorju asist. dr. Mateju Borovinšku za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomskega dela. Zahvaljujem se tudi g. Andreju Rebernaku za mentorstvo in usmerjanje v podjetju Impol, ter celotnemu kolektivu vzdrževanja poslovnega obrata Valjarna, saj sem se zaradi njihovega znanja in izkušen ogromno naučil.

Posebna zahvala velja staršem, ki so mi omogočili študij.

SANACIJA OGRODJA PRIJEMALA MANIPULATORJA ALUMINIJASTIH BRAM

Ključne besede: manipulator, numerične simulacije, metoda končnih elementov, Abaqus CAE

UDK: 621.8-236.58(043.2)

POVZETEK

V diplomskem delu smo s pomočjo računalniških simulacij analizirali nosilec prijemala manipulatorja aluminijastih bram, kjer je na mestu tik pod zvarom med stransko ploščo in zgornjo (pritrditveno) ploščo prišlo do razpoke. S pomočjo rezultatov numerične analize obstoječega nosilca prijemala smo ugotovili vzrok, zaradi katerega je prišlo do razpoke, ter na podlagi rezultatov numeričnih simulacij predlagali boljšo konstrukcijsko rešitev nosilca prijemala. Računalniške simulacije smo izvajali s pomočjo programskega paketa Abaqus CAE, ki temelji na metodi končnih elementov.

RECONSTRUCTION OF HANDLING ARM HOUSING OF ALUMINIUM ASHLAR MANIPULATOR

Key words: manipulator, numerical simulations, finite element method, Abaqus CAE

UDK: 621.8-236.58(043.2)

ABSTRACT

In the paper, we have analyzed the grip holder of aluminum slab manipulator with use of computer simulations, where cracks appeared just below the weld between the side panel and the upper (mounting) plate. Using the results of the numerical analysis of the existing grip holder, we found the cause for cracks and were also able to suggest a better grip holder design solution. Computer simulations were carried out using Abaqus CAE, a software package based on the finite elements method.

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	OPIS SPLOŠNEGA PODROČJA DIPLOMSKEGA DELA.....	1
1.2	OPREDELITEV DIPLOMSKEGA DELA	1
1.3	STRUKTURA DIPLOMSKEGA DELA	1
1.4	PREDSTAVITEV PODJETJA	2
2	MANIPULATOR ALUMINIJASTIH BRAM.....	4
2.1	VLOGA MANIPULATORJA V PROIZVODNJI.....	4
2.2	OPIS DELOVANJA MANIPULATORJA	5
2.3	VPETJE ALUMINIJASTE BRAME.....	5
2.4	OPIS PROBLEMA IN OMEJITVE	7
2.4.1	<i>Opis problema</i>	<i>7</i>
2.4.2	<i>Geometrijske omejitve</i>	<i>8</i>
2.4.3	<i>Meja plastičnosti in dopustna napetost</i>	<i>9</i>
2.4.4	<i>Upogib nosilca prijemala</i>	<i>11</i>
2.4.5	<i>Predstavitev konstrukcijskih rešitev</i>	<i>12</i>
3	PRIPRAVA NUMERIČNEGA MODELA	18
3.1	PRIPRAVA GEOMETRIJE V PROGRAMSKEM PAKETU CATIA V5R20.....	18
3.2	MATERIALNE LASTNOSTI NOSILCA PRIJEMALA	19
3.3	DOLOČITEV ROBNIH POGOJEV	19
3.3.1	<i>Referenčna točka za vnos obremenitev.....</i>	<i>19</i>
3.3.2	<i>Sila tlaka F_t.....</i>	<i>20</i>
3.3.3	<i>Sila teže aluminijaste brame F_{Al}.....</i>	<i>22</i>
3.3.4	<i>Sila teže ohišja prijemala F_0, sila teže hidravličnega motorja s prijemalom F_h in sila teže komponent F_k.....</i>	<i>23</i>
3.3.5	<i>Lastna teža nosilca prijemala.....</i>	<i>25</i>
3.3.6	<i>Robni pogoj simetrije</i>	<i>25</i>
3.3.7	<i>Vpetje.....</i>	<i>26</i>
3.4	MREŽA KONČNIH ELEMENTOV	27
4	REZULTATI NUMERIČNIH SIMULACIJ	28
4.1	ORIGINALNA VARIANTA	28

4.2	VARIANTA 1	29
4.3	VARIANTA 2	32
4.4	VARIANTA 3	33
5	INTERPRETACIJA REZULTATOV.....	36
6	SKLEP	38
7	SEZNAM UPORABLJENIH VIROV.....	39

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

MKE	–	Metoda končnih elementov
SIST	–	Slovenski inštitut za standardizacijo
ISO	–	International Organisation for Standardization
RP	–	Reference point
2D	–	dvodimenzionalo
3D	–	trodimenzionalno

1 UVOD

1.1 Opis splošnega področja diplomskega dela

Sodoben čas, v katerem živimo, za podjetja predstavlja vedno večji izziv, saj obstaja veliko podjetij, ki se ukvarjajo z isto oz. podobno dejavnostjo. To pomeni, da če podjetje želi ostati konkurenčno na trgu, mora dobavljati kakovostne, zanesljive in karseda cenovno ugodne proizvode. Iz teh razlogov morajo podjetja vlagati v razvoj, organizacijo, optimizacijo, modernizacijo in avtomatizacijo delovnih procesov.

V podjetju Impol v poslovni coni Valjarna, so leta 2009 zaradi odprtja novega proizvodnega obrata imenovanega Alumobil, morali prestaviti stroj Rezkalnik aluminijastih surovcev (bram) v drugo halo. Pojavila se je potreba po stroju, ki bi aluminijaste surovce (brame) povsem avtomatizirano transportiral iz ene hale v drugo. Sledila je investicija v manipulator aluminijastih bram, katerega naloga je transportirati aluminijaste surovce iz ene hale v drugo in jih odložiti v ustrezno skladišče.

1.2 Opredelitev diplomskega dela

Predmet obravnave je statična analiza enega izmed nosilcev prijemala manipulatorja aluminijastih surovcev (bram), kjer je na območju nosilca prijemala tik pod zvarom prišlo do razpoke.

S pomočjo računalniških simulacij, želimo ugotoviti vzrok za nastanek razpoke ter predlagati boljšo konstrukcijo rešitev nosilca prijemala. Pri iskanju konstrukcijskih sprememb moramo biti pozorni na omejitve, saj manipulator aluminijastih bram že obratuje.

1.3 Struktura diplomskega dela

V uvodnem poglavju smo na kratko predstavili splošni problem, ki je predmet obravnave, ter na kratko predstavili podjetje.

Sledilo je poglavje, kjer smo natančno opisali vlogo manipulatorja v proizvodnji, cikle delovanja, potek vpenjanja in izpenjanja brame, opisali problem, predstavili geometrijske omejitve in spreminjanje meje plastičnosti v odvisnosti od debeline materiala, definirali, kako zmanjšati upogibno napetost pri spreminjanju opazovanega prereza ter predstavili konstrukcijske rešitve.

V poglavju priprava numeričnega modela smo predstavili geometrijo nosilca prijemala aluminijastih bram, podali materialne lastnosti, potrebne za numeričen preračunu, določili robne pogoje in predstavili mrežo končnih elementov.

V naslednjem poglavju smo prikazali rezultate numeričnih simulacij različnih variant nosilca prijemala.

Sledilo je poglavje, kjer smo ovrednotili in primerjali rezultate posameznih variant numeričnih simulacij in podali objektivno oceno.

Na koncu smo dodali sklep, kjer smo strnili celotno diplomsko delo.

1.4 Predstavitev podjetja

Gospodarsko podjetje Impol d.o.o. se nahaja v Slovenski Bistrici, kjer je tako uprava podjetja, kot tudi proizvodnja. Osnovni kapital družbe znaša 16.954.599 EUR, ter s povezanimi in pridruženimi družbami tvori skupino Impol. Ta deluje v okviru krovne družbe Impol 2000 d.d., ki ima neposredno odvisne družbe Impol Servis d.o.o., Impol d.o.o. ter Rondal d.o.o.[4].

Družba Impol d.o.o. deluje s trinajstimi odvisnimi družbami:

- Impol FT, d.o.o. (Impol Folije in trakovi, d.o.o.),
- Impol PCP, d.o.o. (Impol Palice, cevi in profili, d.o.o.),
- Impol LLT, d.o.o. (Impol Livarna in liti trakovi, d.o.o.),
- Impol R in R, d.o.o. (Impol Raziskave in razvoj, d.o.o.),
- Impol Infrastruktura, d.o.o.,
- Stampal SB, d.o.o.,
- IAC, Impol Aluminum Corporation, New York, ZDA,
- Kadring, d.o.o.,
- Unidel, d.o.o.,
- Impol-Montal, d.o.o.,
- Impol Stanovanje, d.o.o.,
- TGP Štatenberg, d.o.o.,
- Impol Seval, a.d., Sevojno, R Srbija z odvisnimi družbami: Impol Seval PKC, d.o.o., Impol Seval Tehnika, d.o.o., Impol Seval Final, d.o.o., Impol Seval President, d.o.o..

Pridružene družbe:

- Alcad, d.o.o.
- Sim Fin, d.o.o.

Osnovna dejavnost družbe je predelovanje aluminija in njegovih zlitin v izdelke in polizdelke. Uporabljajo postopke litja, stiskanja, kovanja, prašne metalurgije, vtiskovanja in valjanja, kar je razvrščeno pod šifro dejavnosti 25.500.

Pomembnejše skupine izdelkov, ki jih proizvaja družba Impol so:

- pločevine in trakovi,
- izsekovane rondelje,
- folija,
- izstiskani profili,
- izstiskane ter vlečene palice in cevi,
- kovane in dodatno površinsko dodelane ter barvne pločevine.

Kupci Impolovih izdelkov oz. polizdelkov so:

- avtomobilska industrija,
- elektroindustrija,
- gradbena industrija,
- industrija toplotnih izmenjevalnikov,
- industrija gospodinjskih aparatov in pripomočkov [4].

2 MANIPULATOR ALUMINIJASTIH BRAM

2.1 Vloga manipulatorja v proizvodnji

Manipulator aluminijastih bram obratuje v proizvodnem procesu Valjarne, ki spada pod družbo Impol FT d.o.o.. Teža najtežjih aluminijastih bram je 4200 kg, ter so kvadratne oblike, povprečne dolžine 3000 mm, širine 1300 mm in višine 380 mm. manipulator je lociran pred globinskimi pečmi ter za strojem Rezkalnik bram, katerega naloga je, da aluminijaste brame, ki jih pripeljejo v podjetje, z zgornje in spodnje strani porezka, saj imajo zaradi litja v kalupe hrapave površine. Po končanem rezkanju upravljavec Rezkalnika aluminijasto bramo pošlje v območje manipulatorja, kjer se odloči, ali je potrebno, da aluminijasta brama gre na ponovno rezkanje (v tem primeru se brama odpelje na levo stran s pomočjo hidravličnega vozička na območje prevzema z mostnim žerjavom), ali pa v skladišče kamor jo prestavi manipulator bram povsem avtomatizirano (stopnje delovanja so opisane v poglavju 2.2). Ko manipulator odloži aluminijasto bramo v skladišče, se odpelje v izhodiščno lego, aluminijasto bramo pa nato dvigne drugi kleščni mostni žerjav in jo odloži v peč, ker se segreje na zahtevano temperaturo in nato toplo valja. Na sliki 2.1 je prikazan manipulator aluminijastih bram.



Slika 2.1: Manipulator aluminijastih bram

2.2 Opis delovanja manipulatorja

Manipulator aluminijastih bram je avtomatiziran numerično voden stroj, opremljen s Siemensovim krmilnikom CPU 3152dp. Stopnje delovanja si sledijo po naslednjem vrstnem redu:

1. Opravljanje meritev višine in širine aluminijaste brame
2. Premik na sredino brame
3. Spust prijemal navzdol
4. Približevanje prijemal s pomočjo vretena – končno stikalo poskrbi, da se prijemala zgolj dotakneta aluminijaste brame
5. Vpenjanje aluminijaste brame s pomočjo hidravličnega motorja – tlak 200bar
6. Dvig aluminijaste brame do izhodiščne lege
7. Vožnja do praznega mesta v skladišču
8. Rotacija aluminijaste brame za 90° v navpični položaj
9. Spust v odlagališče
10. Izpenjanje aluminijaste brame
11. Dvig iz odlagališča
12. Rotacija roke v izhodiščno lego
13. Vožnja v izhodiščno lego

2.3 Vpetje aluminijaste brame

Aluminijasto bramo manipulator vpenja s pomočjo dveh prijemalnih rok. Ti se najprej aluminijasti brami približata s pomočjo vretena in dotakneta s prijemali (končno stikalo da informacijo, kdaj se prijemala dotakneta aluminijaste brame), nato jo vpneto s pomočjo hidravličnega motorja.

Za lažje razumevanje, bomo poimenovali obe prijemali. Levo prijemalo (glede na sliko 2.1) bomo imenovali Prijemalo 1, desno prijemalo (glede na sliko 2.1) pa Prijemalo 2.

Prijemalo 1 (slika 2.2), je sestavljeno iz nosilca prijemala, ohišja prijemala ter prijemala, ki ima dva jeklena prijemala, v obliki valja, ki sta na eni strani vpeta, na drugi kjer prijemljeta pa vbočena – konkavna. Prijemalo 1 poskrbi za rotacijo aluminijaste brame za 90°, preden jo manipulator odloži v skladišče. Rotacijo izvede s pomočjo hidravličnega motorja, ki je montirano na prijemalo ter na nosilec prijemala, kjer je hidravlični motor vpet na konzolni nosilec. Manipulator aluminijastih bram nato odloži aluminijasto bramo v zahtevano

odložišče, jo izpne ter se dvigne v lego pred spustom. Sledi ponovna rotacija za 90° in vožnja v izhodiščno lego, kjer počaka, da dobi informacijo za ponoven cikel.



Slika 2.2: Prijemalo 1 z dvema vpenjalnima valjema

Prijemalo 2 (slika 2.3) je podobno kot Prijemalo 1 sestavljeno iz nosilca prijemala, ohišja prijemala, jeklenega prijemala (v obliki valja – na eni strani vbočeno) ter hidravličnega motorja, ki je montiran v ohišje prijemala. Prijemalo 2 poskrbi za vpenjanje in izpenjanje aluminijaste brame s pomočjo hidravličnega motorja, kjer je tlak vpenjanja nastavljen na 200 barov.



Slika 2.3: Prijemalo 2 s hidravličnim motorjem

2.4 Opis problema in omejitve

2.4.1 Opis problema

Manipulator aluminijastih bram je bil instaliran v proizvodnji proces leta 2009, ko so zaradi novega proizvodnega procesa Alumobil, prestavili Rezkalnik aluminijastih bram iz ene hale v drugo in tako morali priskrbeti stroj, ki bo prestavljal aluminijaste brame iz ene hale v drugo. Prej je namreč Rezkalnik aluminijastih bram obratoval v isti hali, kot so peči in kleščni mostni žerjav, torej ni bilo potrebe po stroju, ki bi prestavljal aluminijaste brame, saj je to storil mostni kleščni žerjav.

Manipulator aluminijastih bram je v osnovi sestavljen iz osnovnega prečnega nosilca (voznja po tirnicah), ki daje oporo premičnima vertikalnima nosilcema (spust in vpenjanje aluminijaste brame), na katerih sta privijačeni prijemali.

Nosilec prijemala (Prijemalo 2) je z desetimi vijaki privijačen na drsno ploščo, ki se premika s pomočjo vretena. Na nosilec prijemala je prav tako z desetimi vijaki privijačeno ohišje prijemala v katerem je hidravlični motor, prijemalo in končno stikalo. Napaka se je pojavila na nosilcu prijemala, kjer je na zgornjem delu tik pod zvarom med stransko pločevino in pritrditveno ploščo prišlo do razpoke (slika 2.4).

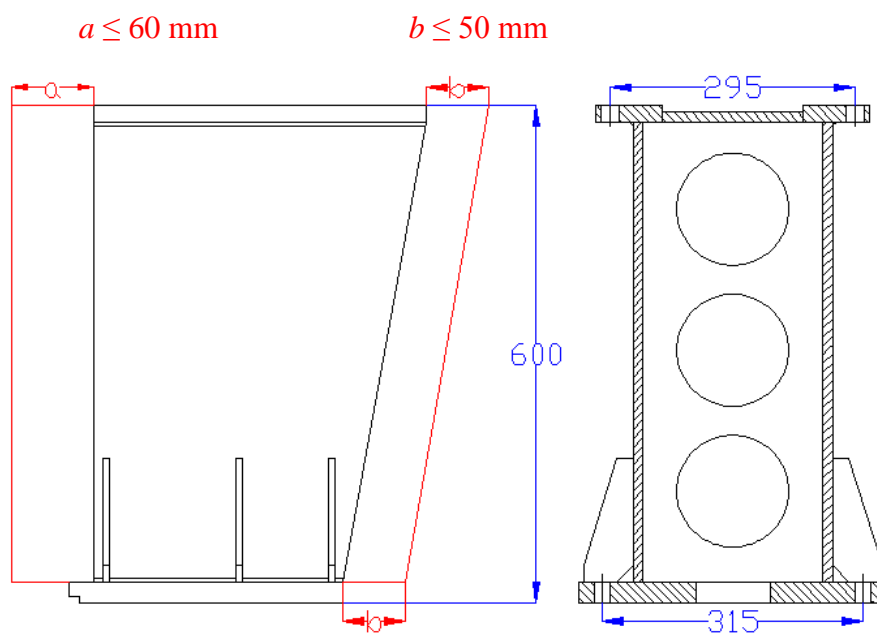


Slika 2.4: Razpoka na nosilcu Prijemala 2

2.4.2 Geometrijske omejitve

Pri konstruiranju novih strojev in naprav smo običajno omejeni s predpisanimi zahtevami, ki jih mora stroj ali naprava izpolnjevati, ter z osnovnimi geometrijskimi omejitvami – velikost stroja in prostora v katerem bo obratoval. Ko je govora o novogradnji strojev, lahko konstruktor sam določi (preračuna) velikost in obliko strojnih delov, ki sestavljajo stroj. To pomeni, da sam (glede na zahteve) dimenzionira stroj. Kadar stroj že obratuje, pa smo pri spreminjanju strojnih delov omejeni s prostorom, ki nam je na voljo. V primeru, da želimo pri strojnem delu spremeniti obliko, moramo najprej določiti koliko prostora nam je v dani situaciji na voljo.

Manipulator aluminijastih bram že obratuje, zato smo preden smo začeli iskati konstrukcijske rešitve nosilca prijemala, raziskali kakšne so naše geometrijske omejitve – se pravi koliko prostora imamo na razpolago. Na sliki 2.5 je prikazan nosilec prijemala iz narisa in stranskega risa (v prerezu). Območja, ki so kotirana z rdečo barvo, so območja kamor lahko širimo nosilec prijemala, območja, kotirana z modro barvo, pa predstavljajo mere, ki jih ne smemo spreminjati. Se pravi, na sprednji strani ga lahko razširimo za $a \leq 60$ mm, na zadnji strani pa za $b \leq 50$ mm. Z modro barvo so kotirane mere, katerih dimenzij ne smemo spreminjati, zaradi prilagajanja glede na celotno konstrukcijo stroja. Višina nosilca znaša 600 mm in je ne smemo spreminjati zaradi mesta vpetja, ki je že na predpisanem mestu. Mera 295 mm predstavlja širino med središči lukenj, kamor pride nosilec prijemala vpet na prečni nosilec manipulatorja aluminijastih bram, mera 315 mm, pa predstavlja širino med središči lukenj, kamor pride privijačeno ohišje prijemala.



Slika 2.5 Geometrijske omejitve nosilca prijemala

2.4.3 Meja plastičnosti in dopustna napetost

Celoten nosilec prijemala je sestavljen iz standardnega konstrukcijskega jekla z oznako S235JR. Njegove lastnosti so prikazane v tabeli 2.1 [1].

Tabela 2.1: Materialne lastnosti konstrukcijskega jekla S235JR

Številka SIST EN 10027 – 2	Številka SIST EN 10027 – 1	Oznaka ISO	Meja plastičnosti R_e (N/mm ²)	Natezna trdnost R_m (N/mm ²)	Razteznost A(%)
1.0037	S235JR	Fe 360 B	235	340 – 470	26

Meja plastičnosti se glede na debelino materiala manjša. Torej večja kot je debelina materiala, nižja je meja plastičnosti. V tabeli 2.1 omenjena vrednosti velja le v primeru, ko je debelina materiala manjša od 16 mm.

Dopustna napetost mora biti vedno večja, ali kvečjemu enaka dejanski napetosti, ki se pojavi v materialu (enačba 2.1).

$$\sigma \leq \sigma_{dop} \quad (2.1)$$

σ [N/mm²] - dejanska napetost

σ_{dop} [N/mm²] - dopustna napetost v materialu

Običajno določamo dopustne vrednosti materialov s pomočjo ustreznih varnostnih koeficientov. V enačbi (2.2) dopustno primerjalno napetost dobimo tako, da mejo plastičnosti podelimo z ustreznim varnostnim koeficientom ν iz tabele 2.2 [2].

$$\sigma_{dop} = \frac{R_e}{\nu} \quad (2.2)$$

σ_{dop} [N/mm²] - dopustna napetost

R_e [N/mm²] - meja plastičnosti

ν - varnostni koeficient (tabela 2.2)

Tabela 2.2: Vrednosti varnostnega koeficienta ν [2]

Vrsta obremenitve	Žilava gradiva		
	Statična trdnost	Meja plastičnosti	Dinamična trdnost
Mirna	3 – 4	1,5 – 3	/
Enosmerna spremenljiva	5 – 6	3 – 4	2,5 – 4
Izmenična spremenljiva	10 – 12	3 – 7	3 – 6
Udarne	12 – 15	6 – 8	/

Manipulator aluminijastih bram bramo vpne, dvigne, jo rotira za 90° , odloži v skladišče in nato izpne. Iz cikla delovanja lahko razberemo, da gre za enosmerno spremenljivo – utripno obremenitev. Zanj je značilno, da obremenitev amplitudno niha od vrednosti 0 do maksimalne vrednosti in nato spet do 0. Iz tabele 2.2 je razvidno, da se pri enosmerni spremenljivi obremenitvi meja plastičnosti zmanjša za vrednost varnostnega koeficienta ν , ki je med 3 in 4. V inženirski praksi v takih primerih običajno vzamemo srednjo vrednost, torej v našem primeru 3,5. Višjo vrednost bi recimo vzeli, če bi želeli imeti večjo varnost (v primeru, da bi se pod manipulatorjem gibali ljudje). S pomočjo enačbe (2.2) tako izračunamo dopustno napetost, ki se lahko pojavi v obstoječem nosilcu prijemala - pločevina ima debelino sten 12 mm, tako da lahko uporabimo podatke iz tabele 2.1.

$$\sigma_{dop} = \frac{R_e}{\nu}$$

$$\sigma_{dop} = \frac{235 \text{ N/mm}^2}{3,5} = 67 \text{ MPa}$$

Dopustna napetost, ki se lahko pojavi pri analizi obstoječega nosilca prijemala v materialu, znaša 67 MPa.

Z numeričnimi simulacijami preračuna nosilca prijemala se je izkazalo, da bomo primorani pri nosilcu prijemala uporabiti tudi večje debeline materiala od 16 mm. Spreminjanje meje plastičnosti v odvisnosti od debeline materiala je prikazano v tabeli 2.3 [1].

Tabela 2.3: Meja plastičnosti v odvisnosti od debeline materiala [1]

Vrsta jekla	Meja plastičnosti [N/mm ²] v odvisnosti od debeline materiala [mm]							
		> 16	> 40	> 63	> 80	> 100	> 150	> 200
	≤ 16	≤ 40	≤ 63	≤ 80	≤ 100	≤ 150	≤ 200	≤ 250
S235JR	235	225	215	215	215	195	185	175

Debelina materiala pri konstrukcijskih variantah nikjer ne presega 40 mm, tako da se meja plastičnosti spremeni iz 235 N/mm² na 225 N/mm². Ker se nam spremeni meja plastičnosti materiala, se nam zniža tudi dopustna napetostna napetost. Ponovno izhajamo iz enačbe (2.2) in dobimo novo dopustno napetost, v primeru ko je meja plastičnosti enaka 225 N/mm².

$$\sigma_{dop} = \frac{R_e}{\nu}$$

$$\sigma_{dop} = \frac{225 \text{ N/mm}^2}{3,5} = 64 \text{ MPa}$$

2.4.4 Upogib nosilca prijemala

Največjo obremenitev na nosilec prijemala manipulatorja aluminijastih bram predstavljata sila teže aluminijaste brame in pa sila tlaka hidravličnega motorja, ki vpenja aluminijasto bramo. Nosilec prijemala je tako najbolj obremenjen na upogib. Iz enačbe (2.3) lahko vidimo, da je upogibna napetost odvisna od upogibnega momenta in od upogibnega odpornostnega momenta prereza.

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W} \tag{2.3}$$

σ_u [N/mm²] - upogibna napetost

M_u [Nmm] - upogibni moment

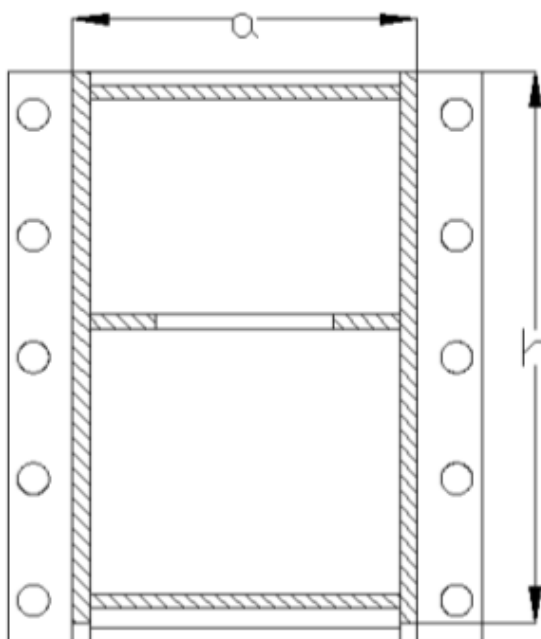
W [mm³] - upogibni odpornostni moment prereza

Upogibni odpornostni moment je lastnost prereza opazovanega strojnega dela. Da zmanjšamo upogibno napetost moramo povečati upogibni odpornostni moment prereza. Iz enačbe (2.4) vidimo, da je odvisen od višine in širine prereza, pri čemer je širina prereza brez potence, višina pa ima kvadratno potenco. Iz tega sklepamo, da je bolj smotno povečanje višine prereza - povečanje odpornostnega momenta in posledično nižja upogibna napetost. Na sliki

2.6 je prikazan prerez obravnavanega nosilca prijemala manipulatorja aluminijastih bram (Prijemalo 2).

$$W = \frac{a \cdot h^2}{6} \quad (2.4)$$

W	[mm ³]	- upogibni odpornostni moment prereza
a	[mm]	- širina prereza
h	[mm]	- višina prereza



Slika 2.6: Prerez nosilca prijemala 2

2.4.5 Predstavitev konstrukcijskih rešitev

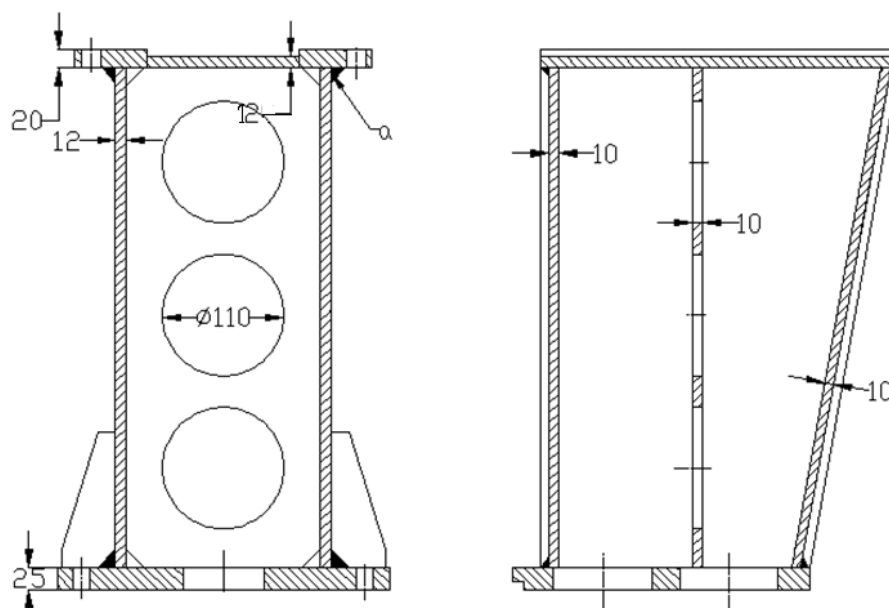
2.4.5.1 Originalna varianta

Najprej smo izvedli numerični preračun obstoječega nosilca prijemala, kjer smo ugotovili vzrok nastanka razpoke. Izkazalo se je, da je do razpoke prišlo zaradi prevelike napetosti na območju zvara (več v poglavju 4 in 5). Originalna varianta je varjena s kotnimi zvari debeline 6 mm (na sliki 2.7 označeni z a).

Načrt osnovnih mer obstoječe variante je prikazan na sliki 2.7, kjer vidimo, da je obstoječa varianta sestavljena iz:

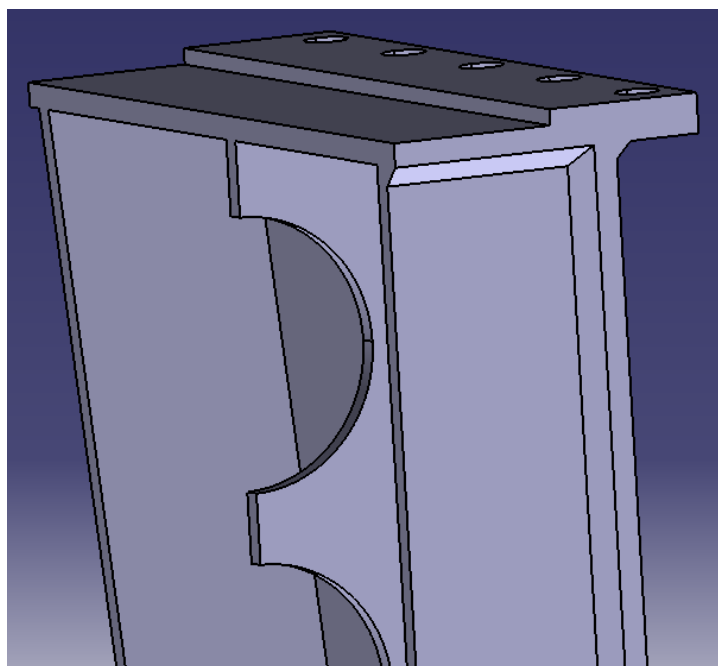
- 20 mm debele zgornje plošče z desetimi luknjami (na sredini v pasu 170 mm debelina zmanjšana na 12 mm),
- dveh stranskih pločevin debeline 12 mm,

- čelne in zadnje pločevine debeline 10 mm,
- notranjega ojačitvenega rebra s tremi luknjami premera 135 mm ter debeline 10 mm,
- šestih stranskih ojačitev in
- spodnje plošče debeline 25 mm - dve luknji premera 110 mm ter deset pritrditvenih lukenj za ohišje prijemala M20, ter spredaj narejen utor za lažje montiranje ohišja prijemala.



Slika 2.7: Originalna varianta

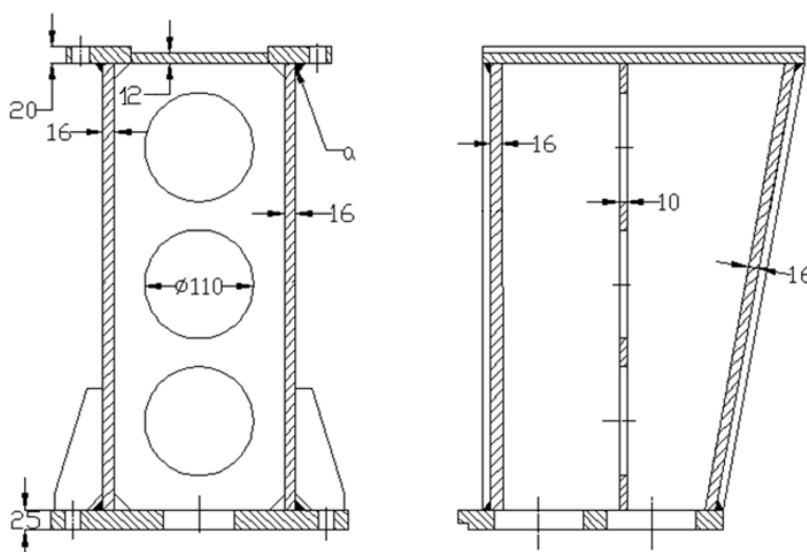
Na sliki 2.8 je prikazan polovični 3D model originalnega nosilca prijemala z modeliranimi kotnimi zvari.



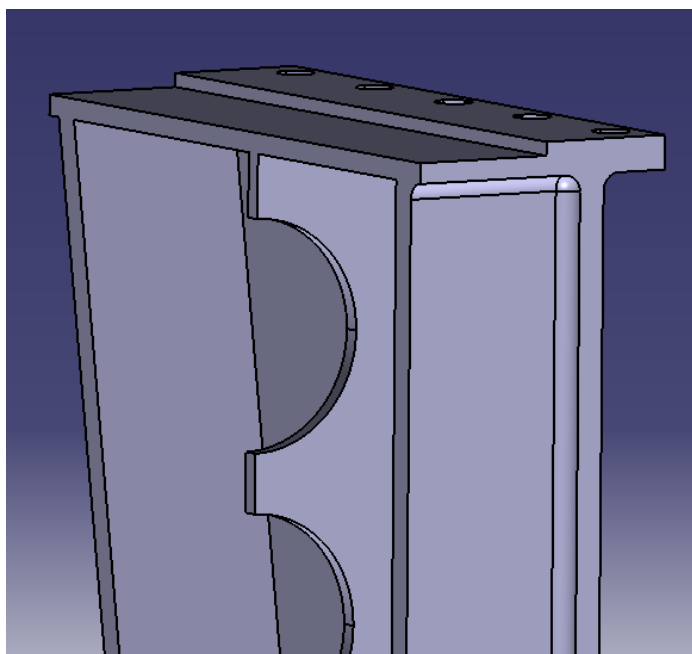
Slika 2.8: 3D model polovične geometrije originalne variante

2.4.5.2 Konstrukcijska sprememba 1 (varianta 1)

Glede na rezultate numerične analize (poglavje 4 in 5) originalnega nosilca prijemala manipulatorja aluminijastih bram, smo začeli iskati ustrezne konstrukcijske rešitve, da zmanjšamo napetosti. Zaradi geometrijskih omejitev (podpoglavje 2.4.2) nismo smeli spreminjati višine nosilca prijemala. Pri prvi konstrukcijski rešitvi smo spremenili debelino čelne, zadnje in stranske ploščevine vse na 16 mm. Prav tako smo zaradi koncentracije napetosti tik pod mestom zvara, zvale naredili zaokrožene in sicer z radijem 10 mm, debeline 4 mm. Vse ostalo je ostalo nespremenjeno. Na sliki 2.9 je prikazan 2D načrt spremembe debeline, na sliki 2.10 pa 3D model konstrukcijske spremembe 1.



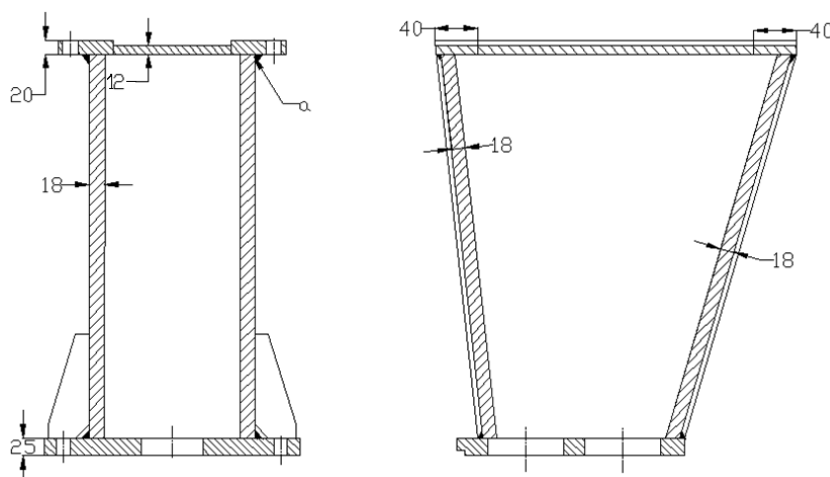
Slika 2.9: Konstrukcijska rešitev 1



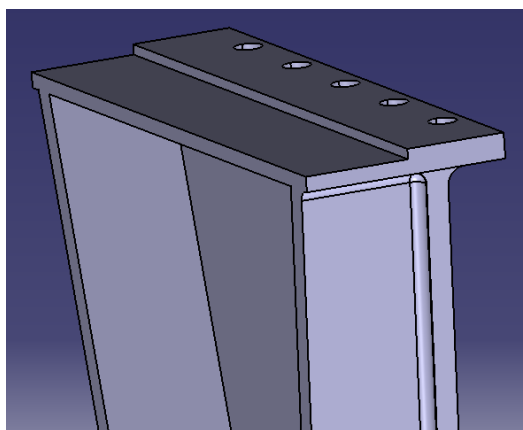
Slika 2.10: 3D model – konstrukcijske spremembe 1

2.4.5.3 Konstrukcijska sprememba 2 (varianta 2)

Po numerični analizi konstrukcijske rešitve 1, smo znižali napetosti v območju, kjer je prišlo do razpoke, vendar so vrednosti napetosti še vedno bile večje od dopustne napetosti. V poglavju 2.4.4, smo razložili kako zmanjšamo upogibno napetost s pomočjo spreminjanja upogibnega odpornostnega momenta prereza. Pri konstrukcijski spremembi 1 smo poleg tega, da smo zaokrožili vse vare, spremenili debelino sten, pri čemer smo po enačbi (2.4) povečali širino prereza. Kot smo že omenili, je bolj primerno, da povečamo višino prereza (širina prereza na prvo potenco, višina na kvadratno potenco), zato smo pri konstrukcijski spremembi 2 na zgornji strani spredaj in zadaj raztegnili zgornjo ploščo za 40 mm. Prav tako smo prilagodili in spremenili debelino čelne, zadnje in stranske pločevine (iz 16 mm na 18 mm), da se ta lepo prilega zgornji plošči (slika 2.11). Pri numeričnih simulacijah originalnega nosilca prijemala in nosilca prijemala s konstrukcijsko spremembo 1, se je izkazalo, da je notranje rebro s tremi luknjami pozicionirano točno na nevtralni osi, kjer so napetosti skoraj nič. Zaradi tega smo se odločili, da ojačitveno rebro odstranimo.



Slika 2.11: Konstrukcijska sprememba 2

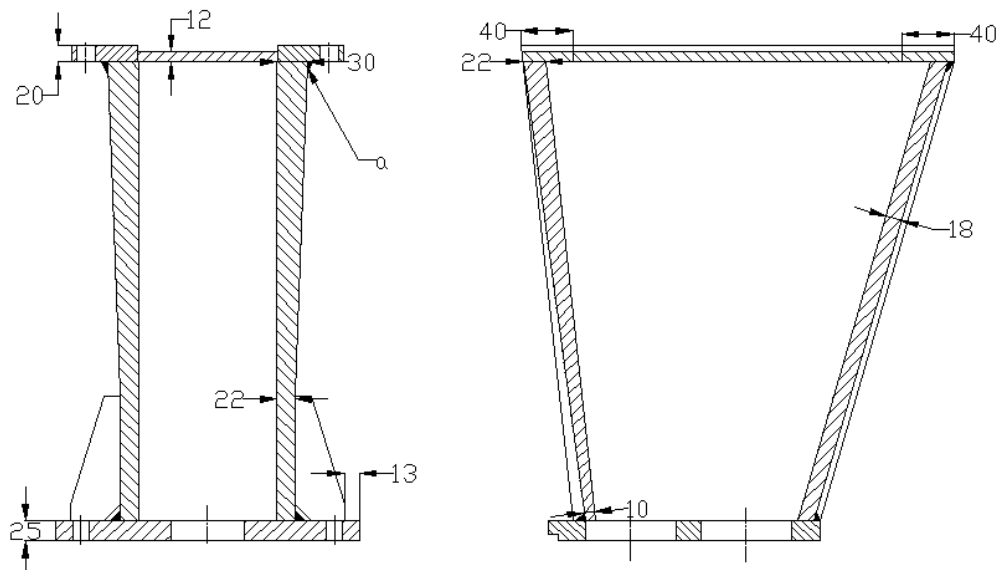


Slika 2.12: 3D model - konstrukcijske spremembe 2

2.4.5.4 Konstruktivna sprememba 3 (varianta 3)

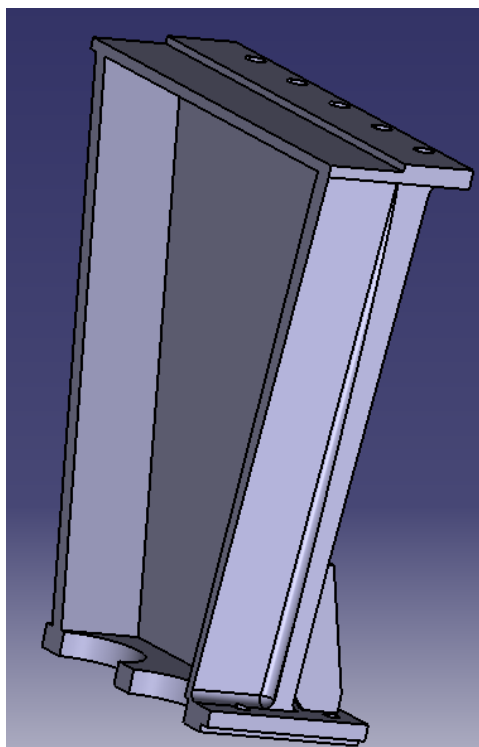
Po numerični analizi nosilca prijemala s konstrukcijskimi spremembami 2 so bile vrednosti napetosti že blizu vrednosti dopustnih napetosti, vendar še vedno previsoke. Pri analiziranju rezultatov moramo biti pozorni, saj se z večanjem debeline materiala niža meja plastičnosti, ter posledično dopustna napetost.

Pri konstrukcijski spremembi 3 smo spremenili pozicijo čelne pločevine in stranske pločevine (zaradi spremembe pozicije stranske pločevine, tudi sprememba pozicije stranskih ojačitvenih reber pomaknjeni poti sredini za 8 mm – skupno od roba za 13 mm). Čelni pločevini smo spremenili debelino in jo zgoraj premaknili do zgornjega roba (pri izdelavi potrebno narediti varni žleb). Zaradi tega, ker je upogibna napetost pri konzolno vpetem nosilcu (v našem primeru nosilec prijemala) največja pri vpetju, smo pri konstrukcijski spremembi 3 naredili spreminjajočo se debelino čelne in stranske pločevine. Tako smo v zgornjem delu nosilca prijemala naredili debelejšo čelno in stransko pločevino kot v spodnjem delu. Debelina čelne pločevine na vrhu znaša 22 mm, spodaj 10 mm, debelina stranske ploče pa na vrhu 30 mm, spodaj pa 22 mm. Kot je razvidno iz slike (2.13) smo debelino stranske pločevine ožili do začetka stranskega ojačitvenega rebra – debelina nato do spodnje plošče kamor pritrdimo ohišje prijemala ostaja nespremenjena.



Slika 2.13: Konstruktivna sprememba 3

Na sliki 2.14 je prikazan 3D model nosilca prijemala, kateremu smo spremenili poziciji in dimenziji čelne ter stranske pločevine. V tabeli 2.4 so zajete variante in vse konstrukcijske spremembe, ki smo jih na njih naredili.



Slika 2.14: 3D model – konstrukcijske spremembe 3

Tabela 2.4: Konstrukcijske spremembe na posameznih variantah

	Debelina čelne pločevine [mm]	Debelina stranske pločevine [mm]	Debelina zadnje pločevine [mm]	Oblika in debelina varov a [mm]	Notranje ojačitveno rebri
Original	10	12	10	Kotni - 6	Da
Varianta 1	16	16	16	Vbočen – 4 (R10)	Da
Varianta 2	18	18	18	Vbočen – 4 (R10)	Ne
Varianta 3	22 – 10	30 – 22	18	Vbočen – 4 (R10)	Ne

3 PRIPRAVA NUMERIČNEGA MODELA

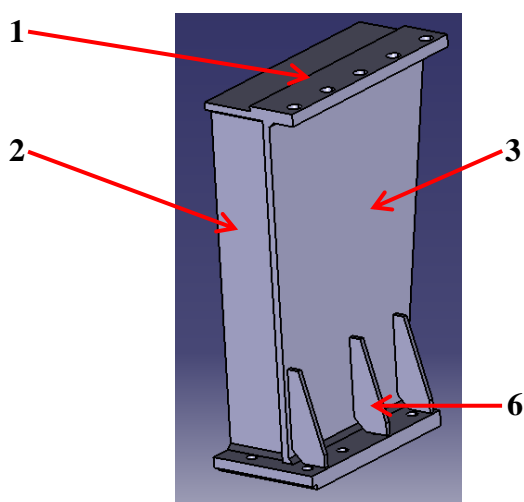
Za modeliranje 3D modela smo uporabili programski paket Catia V5R20. Nosilec prijemala je simetričen na ravnino zx , zato smo modelirali le polovico nosilca prijemala. S tem dosežemo tudi, da imamo dvakrat manj končnih elementov v mreži modela, kar pomeni krajši računski čas. Za numerični preračun originalne konstrukcije in njenih variant pa smo uporabili programski paket Abaqus CAE. Geometrijo smo v programskem paketu Catia V5R20 shranili v formatu *stp* in jo nato uvozili v programski paket Abaqus CAE.

3.1 Priprava geometrije v programskem paketu Catia V5R20

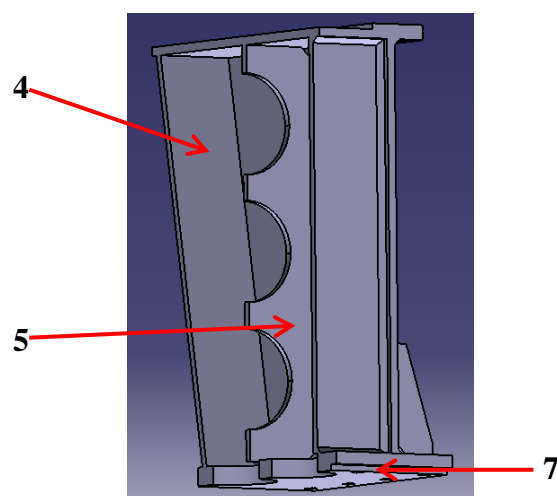
Za numerični preračun nosilca prijemala v programskem paketu Abaqus CAE, smo morali najprej narediti 3D model v programskem paketu Catia V5R20. Model smo zmodelirali po načrtu, ki smo ga dobili v podjetju.

Nosilec prijemala sestavljajo (slika 3.1 in slika 3.2):

1. Zgornja pritrditvena plošča
2. Čelna pločevina
3. Stranska pločevina
4. Zadnja pločevina
5. Ojačitveno rebro s 3 luknjami
6. Šest stranskih ojačitvenih reber (na vsaki strani nosilca prijemala 3)
7. Spodnja plošča z dvema luknjama



Slika 3.1: 3D model polovične geometrije - s strani



Slika 3.2: 3D model polovične geometrije - prerezana ravnina zx

3.2 Materialne lastnosti nosilca prijemala

Geometrijskemu modelu nosilca prijemala je bilo potrebno najprej določiti materialne lastnosti. Ker gre za linearno - elastično analizo, smo potrebovali modul elastičnosti materiala E in Poissonovo število ν . Zraven modula elastičnosti in Poissonovega števila, pa smo zaradi upoštevanja lastne teže nosilca prijemala, potrebovali še gostoto materiala. Celoten nosilec prijemala je sestavljen iz konstrukcijskega jekla s standardno oznako S235JR. V tabeli 3.1 sta poleg omenjenih lastnosti dodani še meja plastičnosti materiala ter natezna trdnost, ki služita pri vrednotenju rezultatov – ali je prišlo do plastične deformacije v materialu.

Tabela 3.1: Materialni podatki jekla S235JR [1]

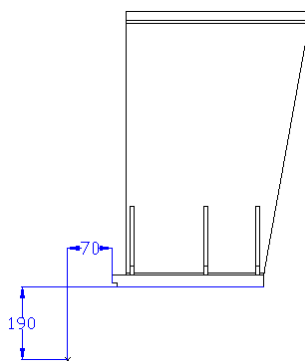
Številka SIST EN 10027 – 1	Gostota [kg/m ³]	Modul elastičnosti E [MPa]	Poissonovo število ν	Meja plastičnosti Re [N/mm ²]	Natezna trdnost Rm[N/mm ²]
S235JR	7850	210000	0.3	235	340

3.3 Določitev robnih pogojev

Preden izvedemo numerični preračun nosilca prijemala, je potrebno določiti robne pogoje. Z njimi zajamemo spekter obremenitev, simetrije (polovični model), kontaktov in vpetja. Robne pogoje smo pojasnili na originalni varianti nosilca prijemala in smo jih uporabili pri vseh numeričnih preračunih konstrukcijskih variant.

3.3.1 Referenčna točka za vnos obremenitev

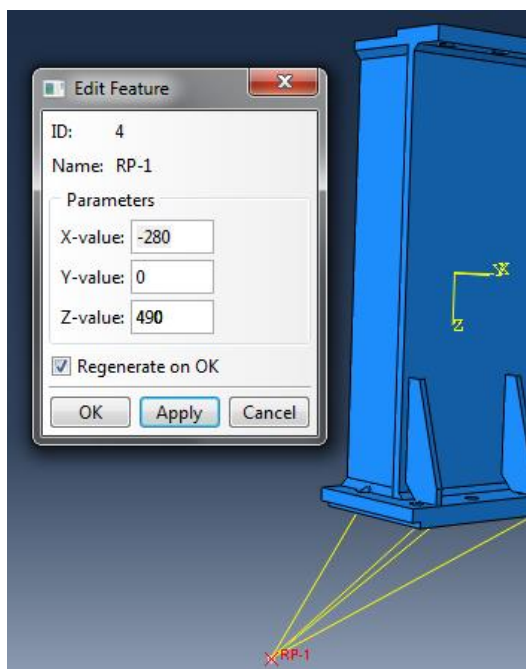
Da nismo potrebovali modelirati celotnega ohišja prijemala in prijemala, smo definirali referenčno točko za vnos obremenitev, ki je pozicionirana v središčno točko prijemala hidravličnega motorja, na mestu kjer vpne aluminijsko bramo. Na sliki 3.3 je prikazana pozicija referenčne točke, kjer lahko vidimo, da je od spodnjega roba oddaljena 190 mm, od stranskega roba pa 70 mm.



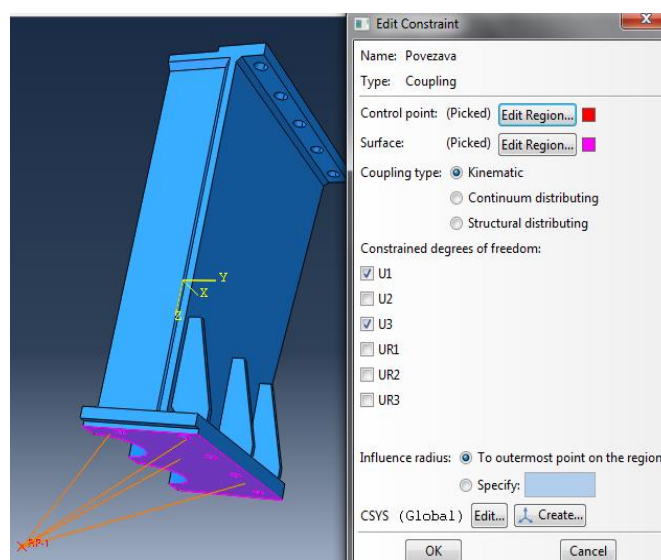
Slika 3.3: Pozicija referenčne točke za vnos obremenitev

V programskem paketu Abaqus moramo pri pozicioniranju referenčne točke za vnos obremenitev upoštevati globalni koordinatni sistem, ki je v našem primeru v središču geometrijskega modela. Prav tako je potrebno biti pozoren na usmeritev globalnega koordinatnega sistema v modelu. Na sliki 3.4, je prikazana postavitve referenčne točke za vnos obremenitev glede na globalni koordinatni sistem, ter njene koordinate, ki tako znašajo (-280,0,490).

Po definiciji koordinat referenčne točke za vnos obremenitev, smo morali povezati referenčno točko s spodnjo površino nosilca prijemala (slika 3.5). To smo storili s pomočjo ukaza *Coupling* v modulu *Interaction*. Ta ukaz nam poveže točko za vnos obremenitev z zeleno površino in med njima ustvari tog kontakt – obremenitve se bodo z referenčne točke za vnos obremenitev prenesle na izbrano ploskev. Vpeli smo pomike v smeri x ter v smeri z .



Slika 3.4: Postavitve referenčne točke za vnos obremenitev v Abaqusu



Slika 3.5: Povezava med referenčno točko za vnos obremenitev in površino

3.3.2 Sila tlaka F_t

Tretji Newtonov zakon pravi, da če prvo telo deluje na drugo telo z določeno silo, drugo telo deluje na prvega z nasprotno enako silo. V našem primeru prijemalo s hidravličnim motorjem vpenja aluminijasto bramo s silo tlaka, ki ga ustvari, torej to pomeni, da na prijemalo in nosilec prijemala deluje nasprotno enako velika sila, ki prejmlje v referenčni točki za vnos obremenitev. Tlak vpenjanja aluminijaste brame znaša 200 bar, premer hidravličnega bata pa znaša 80 mm. Silo tlaka vpenjanja aluminijaste brame izračunamo s pomočjo enačbe (3.1), katero ustrezno obrnemo, tako da izpostavimo silo tlaka.

$$p = \frac{F_{t0}}{A} \quad (3.1)$$

p	[Pa]	- Tlak
F _{t0}	[N]	- Sila tlaka
A	[mm ²]	- Ploščina hidravličnega bata

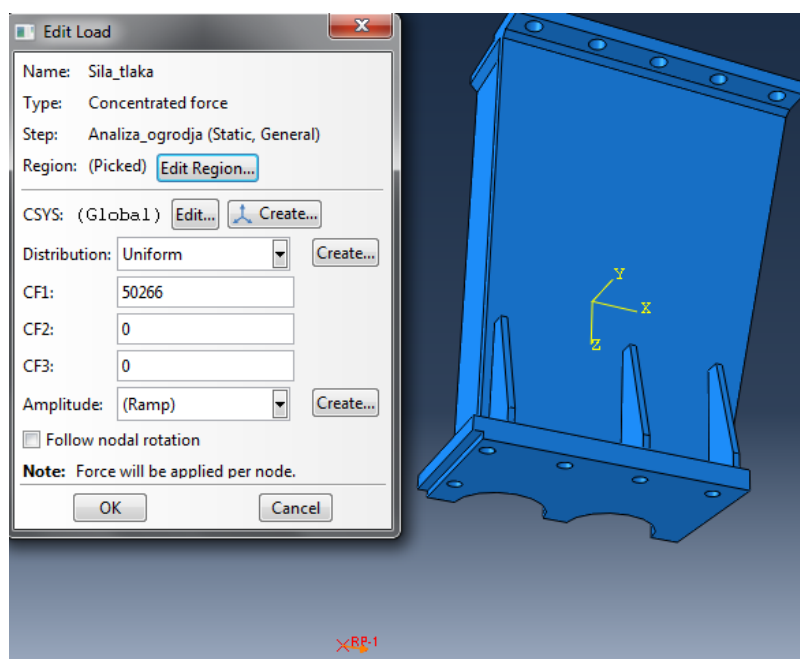
$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3.2)$$

A	[mm ²]	- Ploščina hidravličnega bata
d	[mm]	- Premer hidravličnega bata

$$F_{t0} = p \cdot A = 200 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \frac{\pi \cdot (0,08\text{mm})^2}{4} = 100.531 \text{ N}$$

Zaradi modeliranja polovične geometrije, moramo izračunano vrednost sile tlaka podeliti z 2, ter tako dobimo silo tlaka, ki deluje na polovično geometrijo nosilca prijemala. Sila tlaka deluje v nasprotni smeri sile vpenjanja, torej v pozitivni *x* smeri glede na globalni koordinatni sistem (slika 3.6).

$$F_t = \frac{F_{t0}}{2} = \frac{100531}{2} = \mathbf{50.266 \text{ N}}$$



Slika 3.6: Predpisan robni pogoj sile tlaka

3.3.3 Sila teže aluminijaste brame F_{Al}

Kot smo že omenili, so najtežje aluminijaste brame težke 4200 kg. Vsako od prijemal nosi polovico te teže – torej 2100 kg. Silo teže aluminijaste brame izračunamo s pomočjo enačbe (3.3). Podobno kot pri sili tlaka, moramo tudi pri sili teže aluminijaste brame upoštevati polovično geometrijo, ter tako uporabiti za polovico manjšo silo teže. Sila teže aluminijaste brame prijemlje v referenčni točki za vnos obremenitev, pozitivna z smer, glede na globalno koordinatno izhodišče (slika 3.7).

$$F_{Al0} = m_{Al} \cdot g \quad (3.3)$$

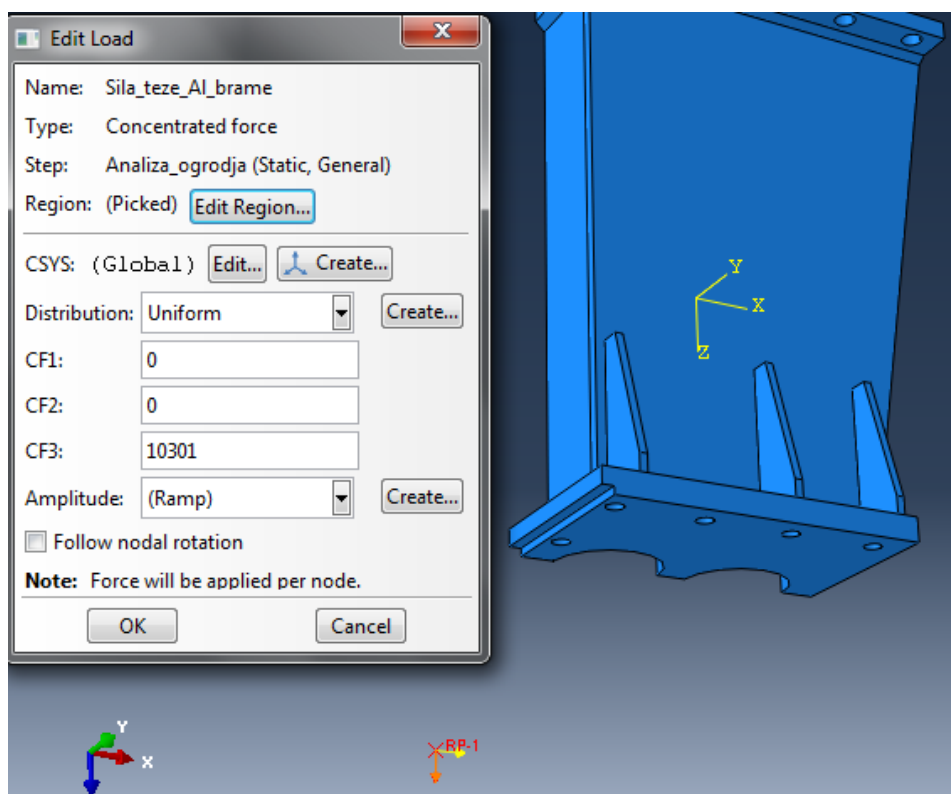
F_{Al0} [N] - Sila teže aluminijaste brame

m_{Al} [kg] - Masa aluminijaste brame

g [m/s²] - Gravitacijski pospešek; $g = 9,81$ m/s²

$$F_{Al0} = m_{Al} \cdot g = 2100 \cdot 9,81 = 20.601 \text{ N}$$

$$F_{Al} = \frac{F_{Al0}}{2} = \frac{20601}{2} = \mathbf{10.301 \text{ N}}$$



Slika 3.7: Predpisan robni pogoj sile teže aluminijaste brame

3.3.4 Sila teže ohišja prijemala F_0 , sila teže hidravličnega motorja s prijemalom F_h in sila teže komponent F_k

Silo teže ohišja prijemala, silo teže hidravličnega motorja s prijemalom in silo teže komponent (elektro omara, ventili, končno stikalo...) predpišemo s tlakom na spodnjo površino, kamor je privijačeno ohišje prijemala. Tlak bomo izračunali s pomočjo enačbe (3.4). Najprej smo s pomočjo enačbe (3.3) izrazili silo teže ohišja prijemala, silo teže hidravličnega motorja in silo teže komponent ter jih nato sešteli v skupno silo teže. Masa ohišja prijemala znaša 79 kg, masa hidravličnega motorja 70 kg, masa komponent pa 50 kg. Sledi izračun površine spodnje plošče (slika 3.8) in nato izračun skupnega tlaka, ki bo predpisan na spodnjo površino. V tem primeru lahko naredimo izračun na celotni geometriji, bi v primeru računanja polovične geometrije dobili povsem enak rezultat (pri polovični geometriji dobimo enak rezultat, saj sta tako skupna sila, kot tudi površina polovico manjši in je kvocient enak).

$$p_{sk} = \frac{F_{sk}}{A} \quad (3.4)$$

p_{sk}	[MPa]	- Skupni tlak
F_{sk}	[N]	- Skupna sila
A	[mm ²]	- Površina spodnje plošče

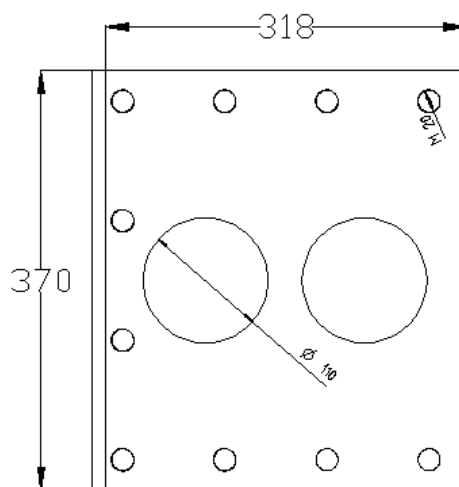
$$F_0 = m_0 \cdot g$$

$$F_h = m_c \cdot g$$

$$F_k = m_k \cdot g$$

$$F_{sk} = m_0 \cdot g + m_h \cdot g + m_k \cdot g = (m_0 + m_h + m_k) \cdot g$$

$$F_{sk} = (79 + 70 + 50) \cdot 9,81 = 1.952 \text{ N}$$



Slika 3.8: Spodnja površina kamor predpišemo skupni tlak

Spodnja površina, kamor je privijačeno ohišje prijemala ima obliko pravokotnika. Površino izračunamo tako, da pomnožimo višino in širino, ter odštejemo luknje (enačba 3.5), od katerih sta dve z premerom 110 mm, ostale pa imajo premer 17,5 mm (vrezan navoj M20).

$$A = a \cdot b - \left(10 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} + 2 \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \right) \quad (3.5)$$

A	[mm ²]	- Ploščina spodnjega dela
a	[mm]	- Višina pravokotnika
b	[mm]	- Širina pravokotnika
d_1	[mm]	- Premer lukenj, kjer je vrezan navoj
d_2	[mm]	- Premer lukenj s premerom 110 mm

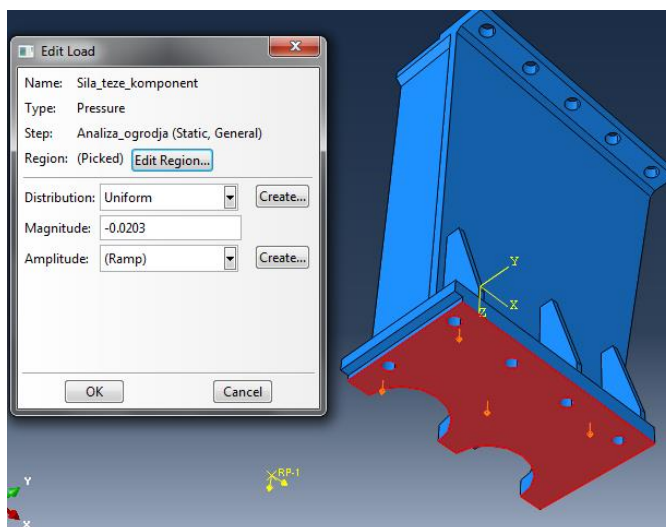
$$A = a \cdot b - \left(10 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} + 2 \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \right)$$

$$A = 370 \cdot 318 - \left(10 \cdot \frac{\pi \cdot 17,5^2}{4} + 2 \cdot \frac{\pi \cdot 110^2}{4} \right) = 96.248 \text{ mm}^2$$

$$p_{sk} = \frac{F_{sk}}{A}$$

$$p_{sk} = \frac{1952}{96248} = \mathbf{0,0203 \text{ MPa}}$$

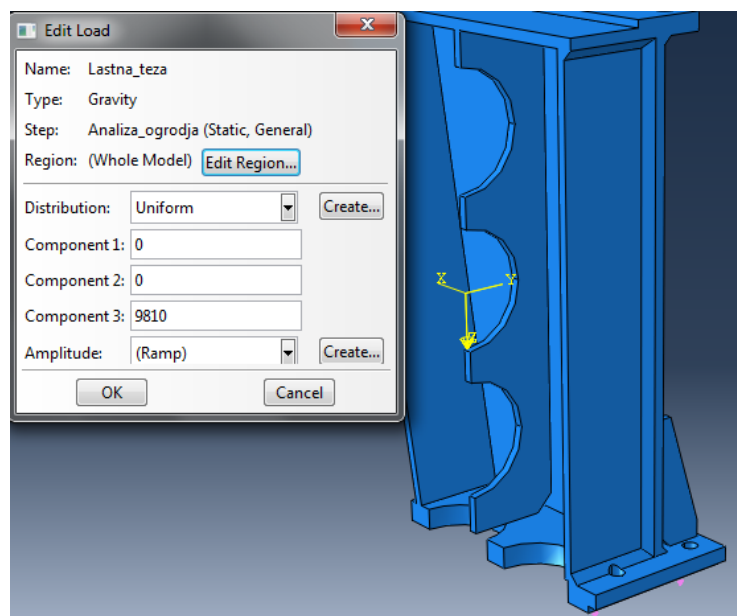
Ker sila tlaka deluje vedno na površino, v našem primeru pa mora delovati v pozitivni z smeri, moramo v programu dodati negativen predznak (slika 3.9).



Slika 3.9: Določitev sile skupnega tlaka na površino

3.3.5 Lastna teža nosilca prijemala

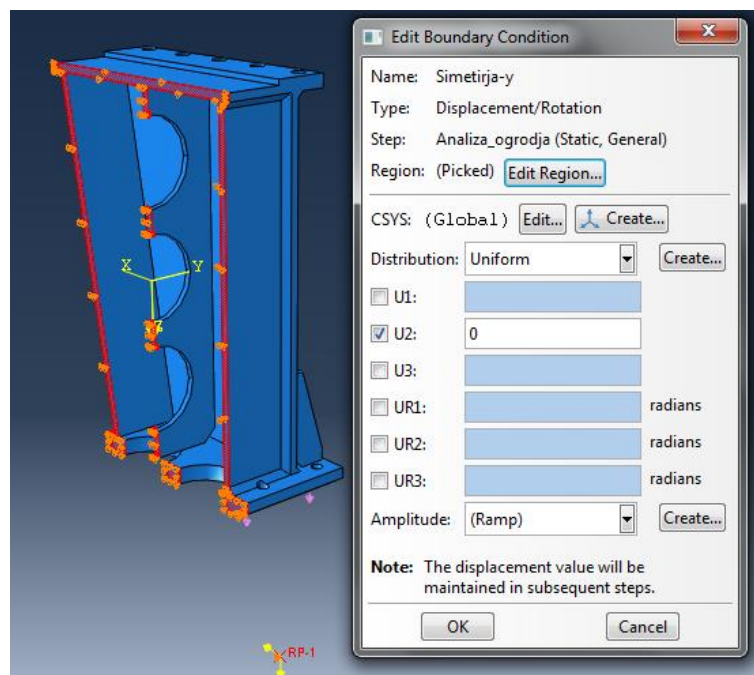
V programskem paketu Abaqus lahko upoštevamo lastno težo nosilca prijemala. Vse kar moramo storiti je, da ko geometrijskemu modelu – nosilcu prijemala, definiramo materialne lastnosti, poleg zahtevanega modula elastičnosti in Poissonovega števila dodamo še gostoto materiala. Ko vpisujemo gostoto materiala moramo biti pazljivi na enote, v katerih jo vpisujemo – če želimo rezultate primerjalnih napetosti v MPa in pomike v mm, moramo gostoto vpisati namesto v kg/m^3 v t/mm^3 (namesto 7850 kg/m^3 vstavimo $7,85 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$). V modulu *Load* nato nosilcu prijemala predpišemo novo obremenitev in sicer silo lastne teže s pomočjo gravitacijskega pospeška g . Tudi pri gravitacijskem pospešku moramo paziti na enote – namesto m/s^2 uporabimo mm/s^2 (namesto $9,81 \text{ m/s}^2$, uporabimo 9810 mm/s^2). Sila lastne teže je v našem primeru definirana v pozitivni z smeri (slika 3.10).



Slika 3.10: Sila lastne teže

3.3.6 Robni pogoj simetrije

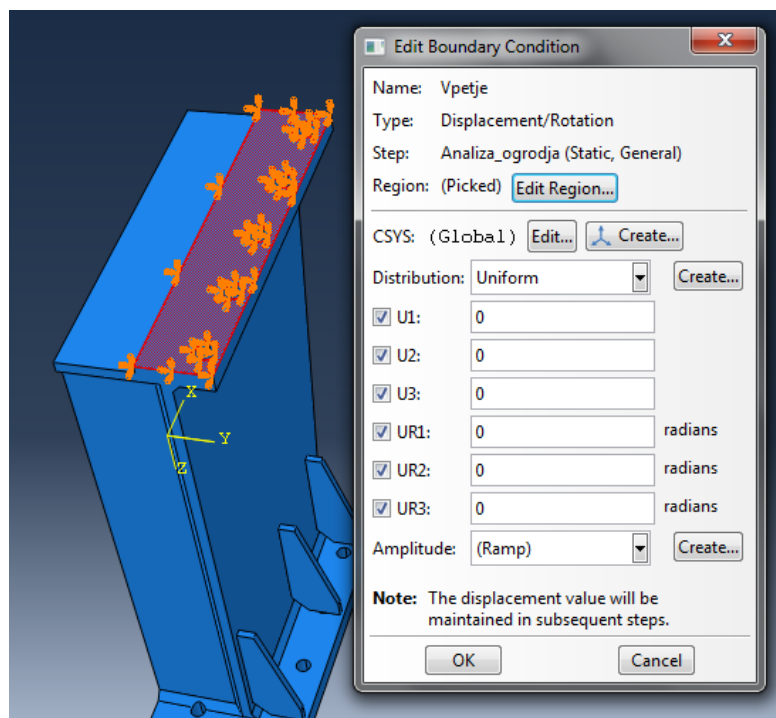
Ker je nosilec prijemala simetričen glede na zx ravnino in smo ga zato modelirali samo polovico, moramo nosilcu prijemala predpisati ustrezne robne pogoje simetrije. Za simetrične robne pogoje je značilno, da vpneemo pomike v osi, ki je normalna glede na ravnino v kateri je prerezan model. V našem primeru je to y os, torej vpneemo pomike v tej osi. V robni pogoj simetrije zajamemo vse površine v ravnini zx , ter referenčno točko za vnos obremenitev, ki smo ji v poglavju 3.3.1 vpeli pomike v smereh x in z (slika 3.11).



Slika 3.11: Robni pogoj simetrije

3.3.7 Vpetje

Nosilec prijemala je na zgornji strani privijačen z desetimi vijaki – na vsaki strani s petimi. Na zgornji ploskvi, smo uporabili nepomično podporo, s katero smo preprečili pomike in rotacije v vseh treh oseh (slika 3.12).



Slika 3.12: Robni pogoj vpetja

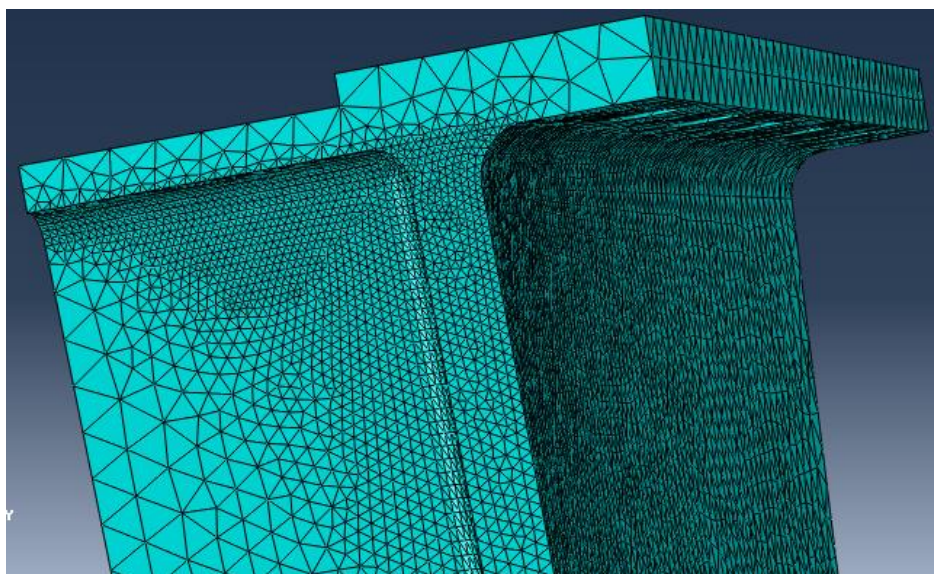
3.4 Mreža končnih elementov

Programski paket Abaqus CAE temelji na metodi končnih elementov, kar pomeni, da moramo nosilec prijemala zamrežiti. Ker se je na nosilcu prijemala na zgornjem delu tik pod zvarom že pojavila razpoka, smo predvidevali, da na tem mestu lahko pričakujemo koncentracije napetosti, zato smo tukaj zgoščili mrežo (slika 3.13). Število vozlišč, globalna velikost in število končnih elementov je prikazano v tabeli 3.2.

Pri vseh numeričnih preračunih smo uporabili tetraedične končne elemente s kvadratno interpolacijo, kar pomeni, da se napetost znotraj končnega elementa zvezno spreminja. Kvadratni končni elementi povečajo računski čas, vendar dajo natančnejše rezultate od linearnih končnih rezultatov.

Tabela 3.2: Število končnih elementov, število vozlišč in velikost končnih elementov posamezne variante

Konstrukcijska varianta	Število končnih elementov	Število vozlišč	Globalna velikost elementov [mm]
Original	63332	109778	2 – 12
Varianta 1	79466	130936	2 – 12
Varianta 2	91833	149382	2 – 12
Varianta 3	94714	150987	2 – 12

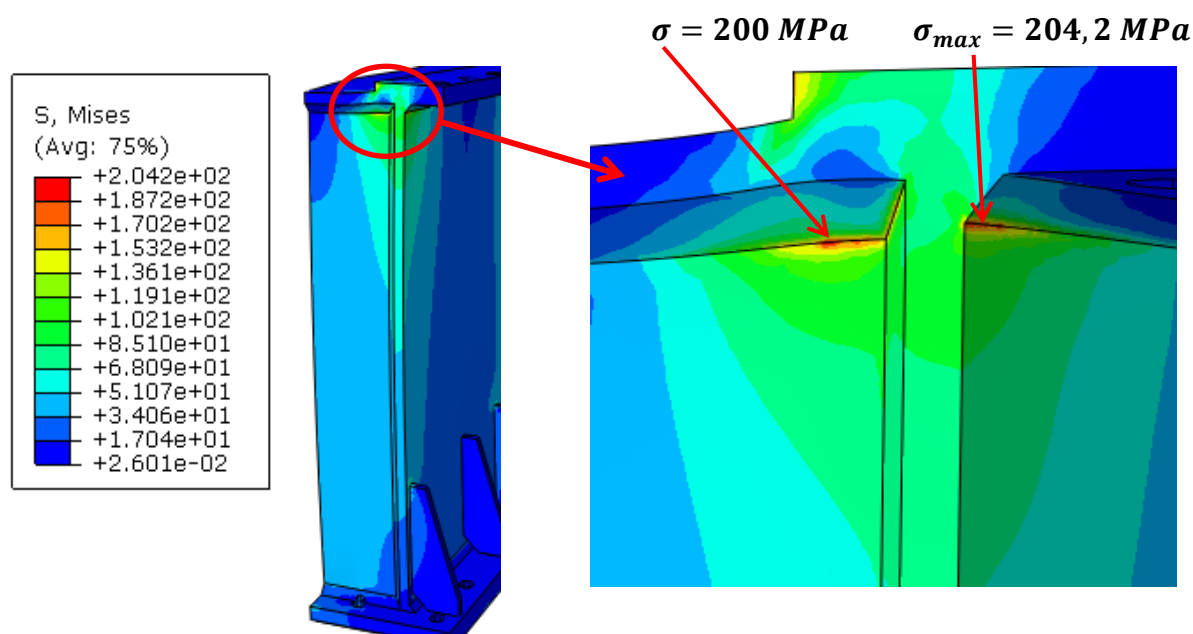


Slika 3.13: Primer zgoščene mreže variante 2

4 REZULTATI NUMERIČNIH SIMULACIJ

4.1 Originalna varianta

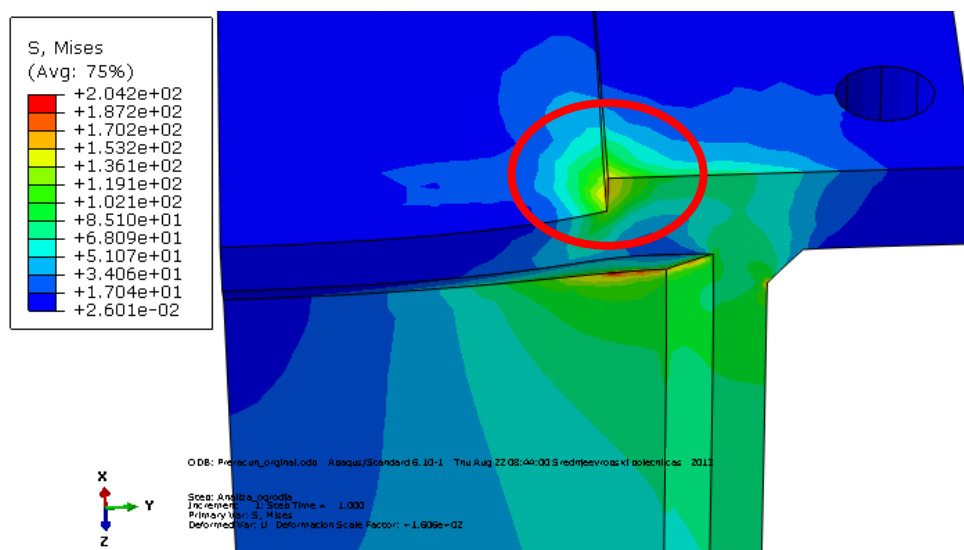
Najprej smo numerično analizirali obstoječo varianto nosilca prijemala (slika 4.1). Ugotoviti smo želeli, kakšni so razlogi, da je prišlo do razpoke in kje prihaja do koncentracij napetosti, da bomo lahko s konstrukcijskimi spremembami nadaljnjih variant, izboljšali obstoječo varianto. Numerična simulacija je potrdila naša pričakovanja, saj se je izkazalo, da se koncentracija napetosti pojavi na mestu pod zvarom, kjer je prišlo do razpoke. Na sliki (4.1) je povečano območje zvara, kjer se pojavijo maksimalne napetosti.



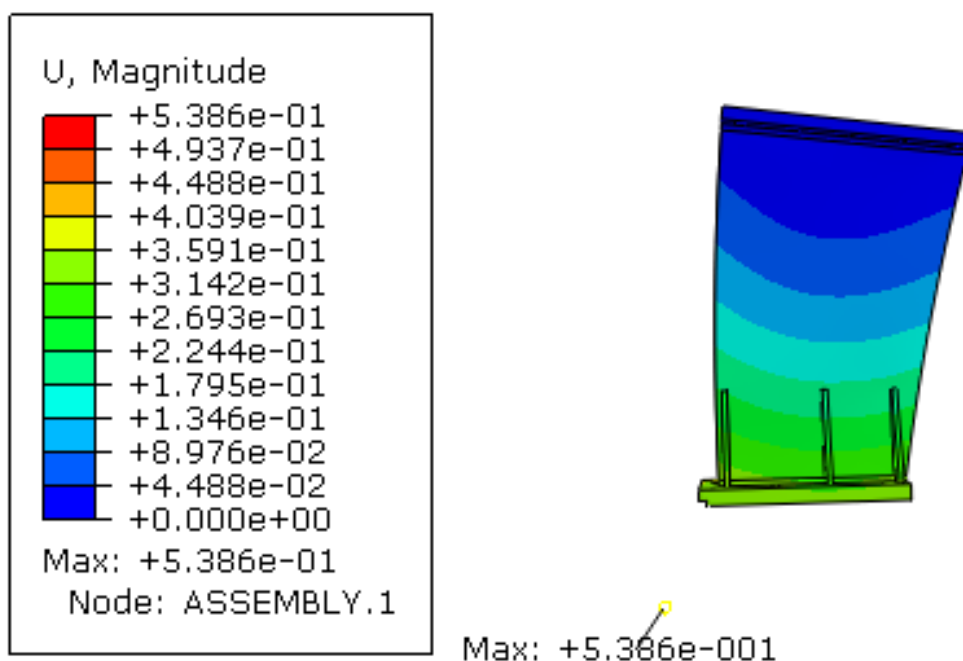
Slika 4.1: Rezultati napetosti v obstoječi varianti

Maksimalna napetost locirana pod zvarom, kjer je prišlo do razpoke znaša 204,2 MPa. Ta napetost je občutno previsoka od dopustne napetosti, definirane v podpoglavju 2.4.3, ki znaša za mejo plastičnosti 235 MPa, 67 MPa. Še ena koncentracija napetosti (200 MPa) se pojavi med čelno pločevino in zgornjo pritrditveno ploščo na spodnji strani zvara. Tudi na tem mestu je napetost precej višja od dopustne napetosti. Opozoriti je potrebno na napetost, ki se pojavi na zgornji plošči nosilca prijemala spredaj (slika 4.2) in zadaj. Razlog za to napetost je nepremična toga podpora, ki preprečuje kakršne koli pomike in rotacije in je posledica robnih pogojev ter nima vpliva na rezultate numerične analize.

Poleg napetosti smo analizirali tudi pomike originalne konstrukcije. Največji pomik se pojavi v točki, kjer je prijemalo in prijemlje aluminijasto bramo in znaša 0,54 mm (slika 4.3).



Slika 4.2: Napetost na zgornji pritrditveni plošči - posledica robnih pogojev



Slika 4.3: Pomiki obstoječe variante

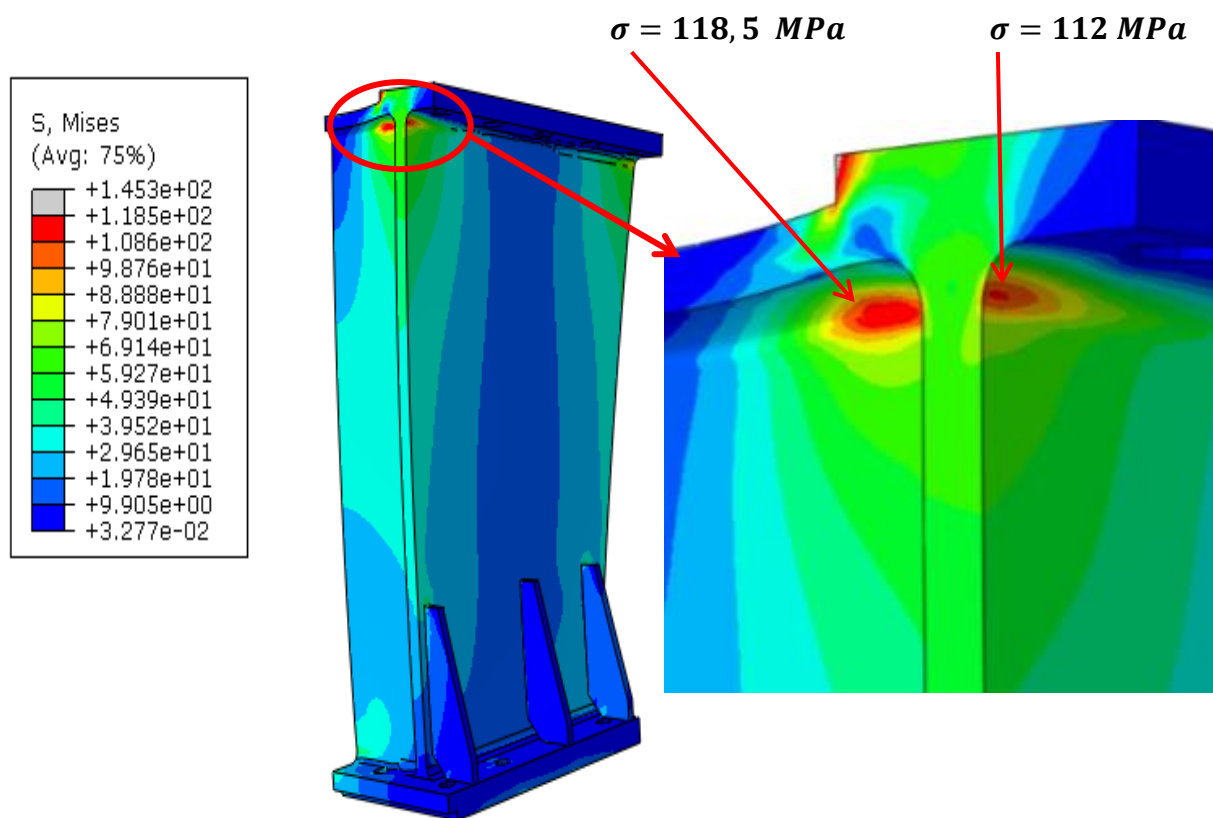
4.2 Varianta 1

Zaradi koncentracije napetosti zaradi oblike zvara na originalni varianti, smo želeli z zaokroženimi zvari pri varianti 1 doseči lepšo razporeditev napetosti. Prav tako smo spremenili dimenzije čelne, zadnje in stranske pločevine, ter tako povečali upogibni

odpornostni moment prereza. Največja koncentracija napetosti se je tokrat pojavila na zgornji plošči, kjer je celoten nosilec prijemala pritrjen na manipulator aluminijskih bram, vendar kot smo že omenili je to posledica togega nepremičnega vpetja. Da smo dobili lepši prikaz razporeditve napetosti smo skalo omejili na najvišjo napetost, ki se pojavi v konstrukciji, brez upoštevanja koncentracije napetosti zaradi togega vpetja – pri varianti 2 je ta napetost znašala 118,5 MPa.

Prva koncentracija napetosti se pojavi na območju pod zvarom med stransko pločevino in pritrditveno ploščo in znaša 112 MPa. Druga koncentracija napetosti pa se pojavi na območju pod zvarom med čelno pločevino in pritrditveno ploščo ter znaša 118,5 MPa. Obe koncentraciji napetosti sta prikazani na sliki 4.4.

Z varianto 1 smo uspeli znižati območja koncentracij napetosti iz 204,2 Mpa na 118,5 MPa. Dopustna napetost za varianto 1 znaša isto kot za originalno varianto, torej 67 MPa, tako da so dejanske napetosti pri varianti 1 še vedno previsoke.

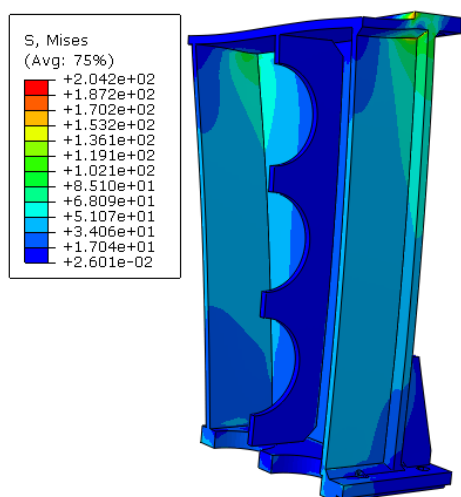


Slika 4.4: Rezultati napetosti v varianti 1

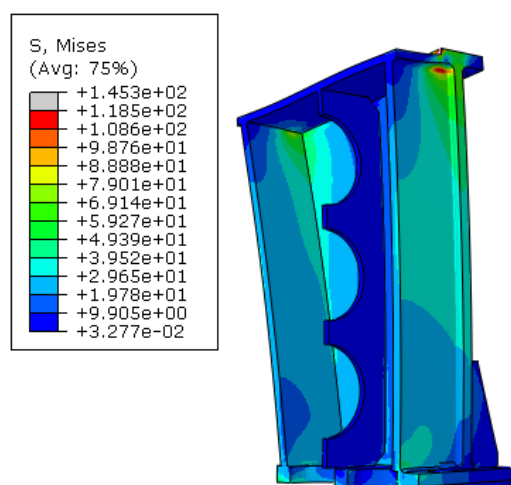
Po rezultatih numeričnih simulacij originalnega nosilca prijemala in prve variante, se je izkazalo, da je notranje ojačitveno rebro skoraj neobremenjeno. Dejstvo je, da največjo obremenitev na nosilec prijemala povzročata tlak, ki vpenja aluminijsko bramo. Ta na nosilcu

prijemala povzročča upogibne napetosti, za katere je značilno, da se v nosilcu prijemala pojavijo natezne (sprednji del nosilca prijemala) in tlačne (zadnji del nosilca prijemala) obremenitve. Na stranski pločevini je lepo razvidno kako se spreminja napetosti iz natezne v tlačno. Na sprednjem delu nosilca so na stranski pločevini maksimalne natezne napetosti, ki se nato proti sredini stranske pločevine manjšajo, na sredini je napetost skoraj nič, nato pa se proti koncu stranske pločevine pričnejo večati tlačne obremenitve in na koncu dosežejo maksimalno vrednost (slika 4.4). Notranje ojačitveno rebro je pozicionirano ravno v območju, kjer se menjajo natezne in tlačne obremenitve in to je razlog, da je skoraj povsem neobremenjeno, kar je vidno na slikah (4.5 – originalna varianta) in (4.6 – varianta 1).

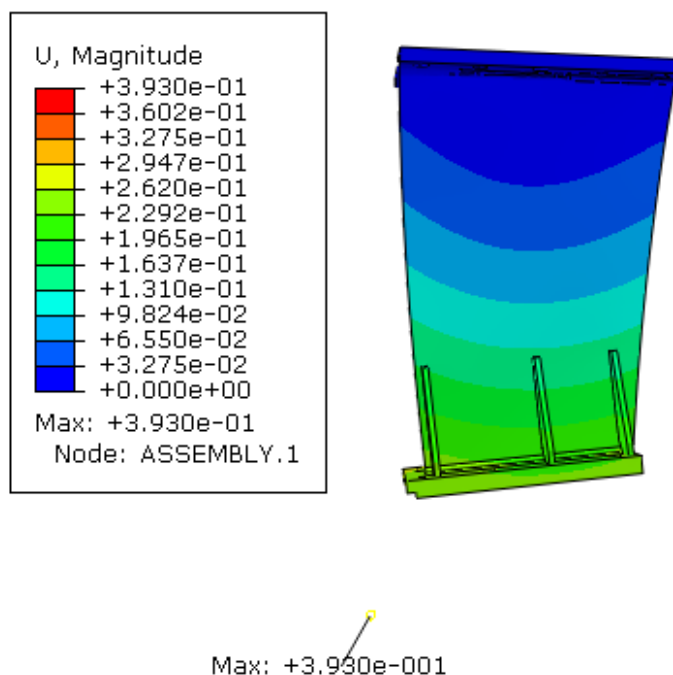
Prav tako smo pri varianti 1 kontrolirali pomike celotne konstrukcije. Vrednost največjega pomika tako znaša 0,39 mm (slika 4.7).



Slika 4.5: Obremenjenost notranjega ojačitvenega rebra originalne variante



Slika 4.6: Obremenjenost notranjega ojačitvenega rebra variante 1

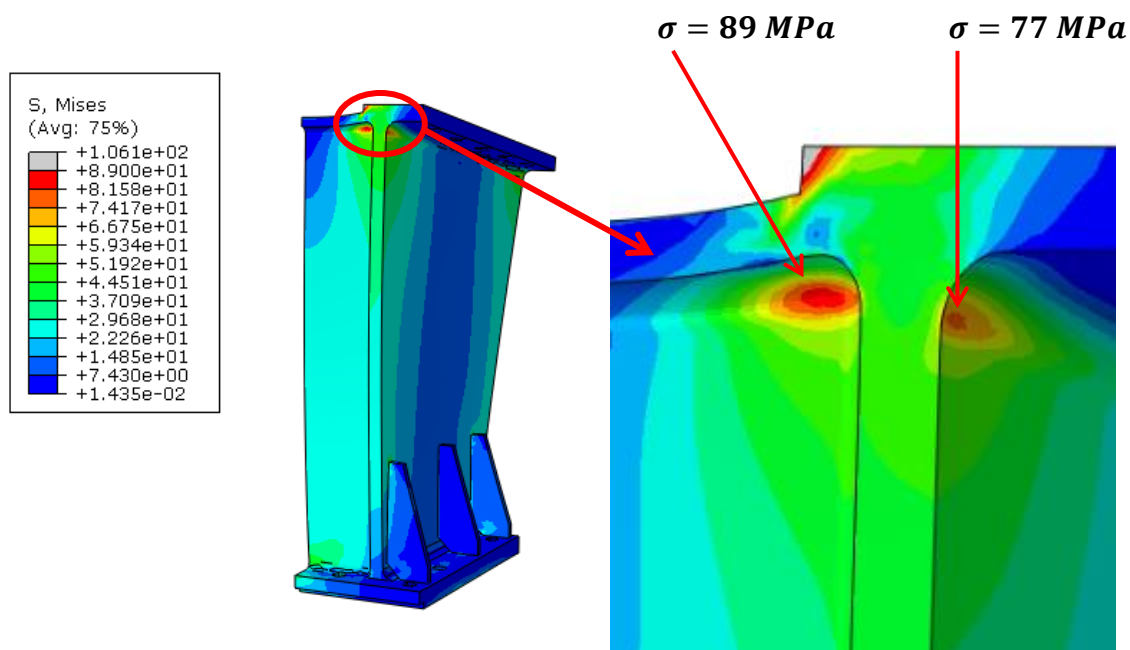


Slika 4.7: Prikaz pomikov variante 1

4.3 Varianta 2

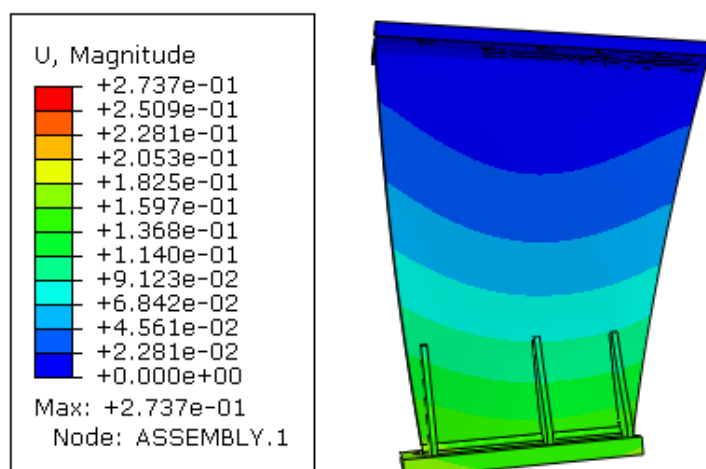
Pri varianti 2 smo uporabili konstrukcijske rešitve variante 1, ki so se izkazale za dobre, saj smo z njimi uspeli zmanjšati vrednosti napetosti. Zaradi nepravilno pozicioniranega notranjega ojačitvenega rebra smo ga pri varianti 2 in 3 odstranili. Za zmanjšanje upogibne napetosti je potrebno povečati višino prereza nosilca prijemala. To smo storili pri varianti 2, ko smo sprednjo in zadnjo stran zgornje plošče nosilca prijemala podaljšali na vsako stran 40 mm. Prav tako smo spremenili debelino sten čelne, zadnje in stranske pločevine na 18 mm. Zaradi povečanja debeline na 18 mm, se nam je spremenila meja plastičnosti iz 235 MPa na 225 MPa, prav tako pa tudi dopustna napetost iz 67 MPa na 64 MPa.

Numerične simulacije so pokazale (slika 4.8), da do koncentracij napetosti ponovno pride pod varom med stransko pločevino in zgornjo ploščo, kjer je maksimalna vrednost 77 MPa in pod varom med čelno pločevino in zgornjo ploščo, kjer maksimalna vrednost napetosti znaša 89 MPa. Napetosti smo z varianto 2 ponovno znižali, ampak so dejanske napetosti še vedno večje od dopustne, ki znaša 64 MPa. Skalo za prikaz napetosti smo nastavili na maksimalno napetost, ki se pojavi v nosilcu prijemala, torej 89 MPa.



Slika 4.8: Prikaz rezultatov napetosti v varianti 2

Na sliki 4.9 so prikazani pomiki variante 2. Vrednost največjega pomika nosilca prijemala variante 2 znaša 0.27 mm.



Max: +2.737e-001

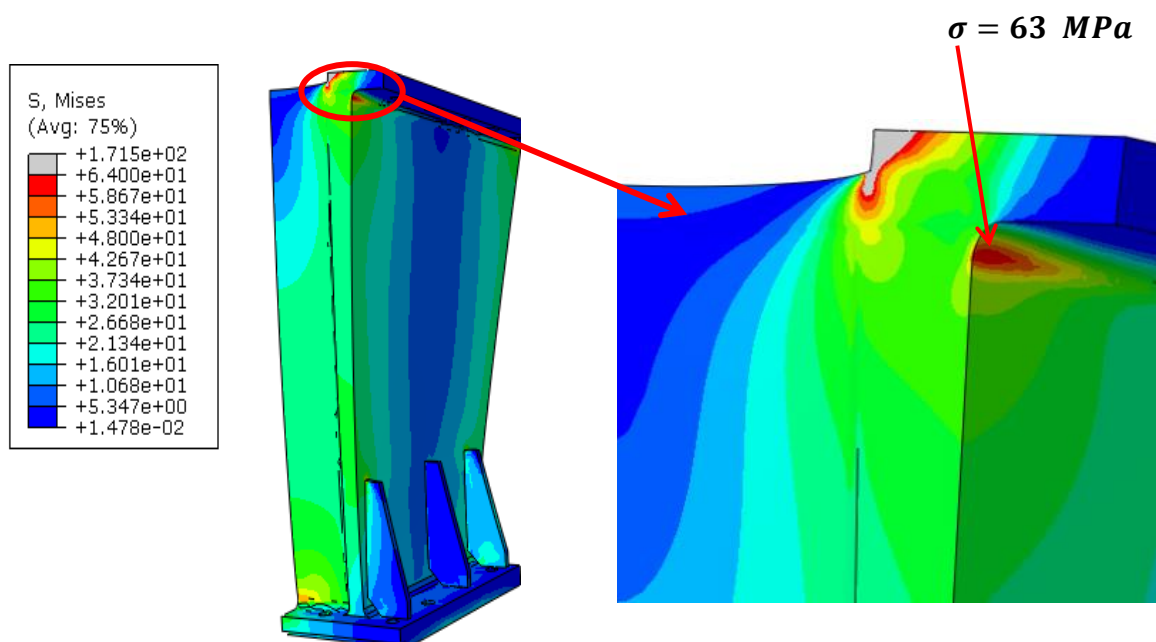
Slika 4.9: Prikaz pomikov variante 2

4.4 Varianta 3

Izkazalo se je, da smo s konstrukcijskimi rešitvami variante 1 in 2 uspeli znižati koncentracije napetosti zato smo jih uporabili pri snovanju variante 3. Zaradi pojavljanja koncentracije

napetosti pod zvarom med čelno ploščo in zgornjo ploščo pri prejšnjih variantah, smo pri varianti 3 čelno ploščo zamaknili navzven, da se lahko napetost lepše porazdeli po materialu. Za upogibno napetost je značilno (v primeru, da je nosilec vpet samo na eni strani – v našem primeru je nosilec prijemala privijačen samo na zgornji strani), da se maksimalne napetosti pojavijo pri vpetju, nato pa se z dolžino zmanjšujejo. Zaradi tega, smo naredili čelno in stransko pločevino, od zgornjega dela proti spodnjemu, po debelini spreminjajočo (debelejša v zgornjem delu in tanjša v spodnjem). Tako smo dosegli lepšo razporeditev napetosti na nosilcu prijemala (slika 4.10).

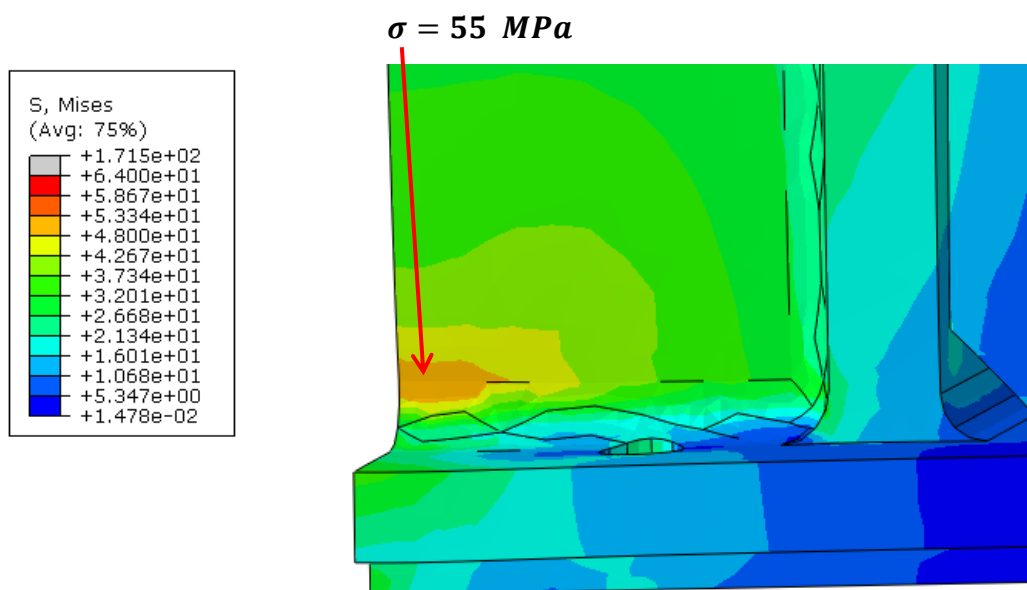
Prva koncentracija napetosti, kjer je tudi maksimalna napetost v nosilcu prijemala, se je pojavila pod varom med stransko pločevino in zgornjo ploščo, kjer znaša najvišja vrednost napetosti 63 MPa (slika 4.10). Tako smo skalo, ki prikazuje rezultate nastavili na dopustno napetost in sicer 64 MPa.



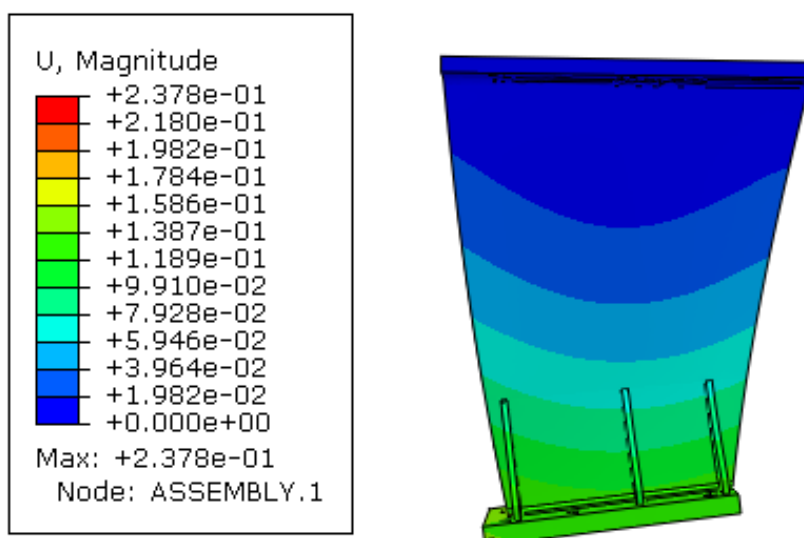
Slika 4.10: Prikaz rezultatov napetosti na varianti 3

Druga koncentracija napetosti pa se je pojavila na spodnji strani čelne pločevine tik nad zvarom. Razlog za to koncentracijo napetosti je, da je debelina čelne plošče tam najmanjša, saj smo naredili čelno ploščo po višini s spreminjajočo debelino. Maksimalna napetost na tem območju znaša 55 MPa (slika 4.11).

Na sliki 4.12 so prikazani pomiki nosilca prijemala variante 3. Maksimalni pomik znaša 0.24 mm.



Slika 4.11: Koncentracija napetosti v spodnjem delu čelne pločvine



Max: +2.378e-001

Slika 4.12: Prikaz maksimalnega pomika – varianta 3

5 INTERPRETACIJA REZULTATOV

S pomočjo programskega paketa Abaqus CAE, ki temelji na metodi končnih elementov, smo izvajali numerične simulacije variant nosilca prijemala manipulatorja aluminijastih bram. Za lažjo interpretacijo rezultatov, smo v tabeli 5.1, prikazali maksimalne napetosti, pomike in maso nosilca prijemala po posameznih variantah.

Tabela 5.1: Maksimalne napetosti, pomiki in masa po posameznih variantah

	Maksimalna primerjalna napetost v konstrukciji [MPa]	Maksimalni pomik [mm]	Masa celotnega nosilca prijemala [kg]
Originalna varianta	204,2	0,54	99
Varianta 1	118,5	0,39	123,2
Varianta 2	89	0,27	134,4
Varianta 3	63	0,24	152,6

Pri vseh numeričnih preračunih se je pojavila koncentracija napetosti na zgornji pritrditveni plošči, kjer je predpisan robni pogoj vpetja (slika 4.2). Koncentracija napetosti se pojavi tako na sprednji, kot tudi na zadnji strani zgornje plošče in je posledica toga (preprečeni vsi pomiki in vse rotacije) vpete zgornje plošče. Na rezultate simulacij ta napetost ne vpliva, zato je pri iskanju konstrukcijskih rešitev nismo upoštevali.

Pri numerični analizi originalne variante smo želeli ugotoviti, kje so polja najvišjih koncentracij napetosti ter jih primerjati z dopustnimi napetostmi. Dopustna napetost v nosilcu prijemala originalne variante zaradi utripne obremenitve znaša 67 MPa (podpoglavje 2.4.3), dejanska napetost v nosilcu prijemala pa znaša 204.2 MPa, kar je skoraj trikrat več od dopustne. Z numerično analizo originalne variante nosilca prijemala smo ugotovili, da je do razpoke tik pod varom med stransko pločevino in zgornjo ploščo prišlo zaradi prevelike koncentracije napetosti v območju zvara, kar je posledica nepravilno dimenzioniranega nosilca prijemala. Maksimalni pomik v točki vpetja je pri originalni varianti znašal 0.54 mm.

Z numeričnima analizama variante 1 in 2 smo s pomočjo konstrukcijskih sprememb, ki smo jih naredili na nosilcu prijemala uspeli znižati maksimalne napetosti v konstrukciji. Pri

varianti 1 je dopustna napetost zaradi debeline stranske, čelne in stranske pločevine znašala isto kot pri originalni varianti, torej 67 MPa. S spremembo debeline čelne, stranske in zadnje pločevine ter z zaokroženjem zvarov, smo uspeli dejansko maksimalna napetost, ki se je pojavila v konstrukciji variante 1 znižati na 118,5 MPa. Prav tako smo zmanjšali največji pomik v konstrukciji, ki znaša 0,39 mm. Pri varianti 2 pa se s spremembo debeline čelne zadnje in stranske pločevine, spremeni dopustna napetost v nosilcu prijemala na 64 MPa (podpoglavje 2.4.3). Poleg spremembe debeline pločevin, pa smo povečali tudi odpornostni moment prereza s spremembo dolžine zgornje plošče. Maksimalna napetost v nosilcu prijemala variante 2 znaša 89 MPa, maksimalni pomik pa 0,27 mm.

Na podlagi numeričnih rešitev konstrukcijskih variant 1 in 2, smo naredili varianto 3, kjer smo poleg konstrukcijskih rešitev variante 1 in 2, naredili spreminjajočo debelino čelne in stranske plošče, ter prestavili čelno pločevino na vrhu naprej. Predvidevali smo, da se bo koncentracija napetosti, ki se je pojavljala pri prejšnjih variantah na mestu pod varom med čelno pločevino in zgornjo ploščo, lepše razporedila. Naša predvidevanja so se izkazala za pravilna, saj napetost lepše razporedi po nosilcu prijemala (slika 4.10). Dopustna napetost za varianto 3 znaša 64 MPa. Maksimalna primerjalna napetost, ki se pojavi pri varianti 3 pojavi pod varom na mestu med čelno pločevino in zgornjo ploščo znaša 63 MPa. Druga koncentracija napetosti pa se pojavi na spodnjem delu čelne pločevine nad varom med spodnjo ploščo in čelno pločevino ter znaša 55 MPa. Razlog za pojavitev koncentracije napetosti na tem mestu je, da je tukaj material čelne plošče najtanjši. Največji pomik v nosilcu prijemala variante 3 znaša 0,24 mm. Pri varianti 3 smo s pomočjo konstrukcijskih sprememb dosegli, da maksimalne napetosti v konstrukciji ne presegajo dopustnih napetosti.

V tabeli 5.1 je razvidno, da se maksimalne napetosti in maksimalni pomiki tekom variant zmanjšujejo, povečuje pa se masa celotnega nosilca prijemala – z vsako novo varianto je masa celotnega nosilca višja. Razloga zato sta velika koncentracija napetosti v originalni varianti na območju pod zvarom med stransko pločevino in zgornjo ploščo, ter geometrijske omejitve, ki nam določujejo prostor za konstrukcijske spremembe. Masa variante 3 znaša 152,6 kg, kar je 50% več od originalne variante. Če pogledamo manipulator aluminijastih bram kot celoto, vidimo da je namenjen za dvigovanje bram teže 4200 kg, zato smo predpostavili, da 53,6 kg kolikor je razlike v masi med originalnim nosilcem prijemala in varianto 3 ne predstavlja kakršnegakoli problema pri obratovanju.

6 SKLEP

V diplomskem delu smo s pomočjo numeričnih simulacij izvedli preračune variant nosilca prijemala manipulatorja aluminijastih bram. Najprej smo predstavili podjetje, kjer manipulator obratuje, ter predstavili njihovo dejavnost in organizacijo.

Sledila je predstavitev vloge stroja v proizvodnji, kakšne oblike in teže surovcev transportira, opisa delovanja ter opisa vpenjanja aluminijaste brame.

Predstavili smo problem, ki je bil predmet diplomske naloge, ter podali mejo plastičnosti v odvisnosti od debeline materiala. Iz narave delovanja manipulatorja aluminijastih bram smo ugotovili, da gre za utripno obremenitev, zato smo glede na mejo plastičnosti materiala določili dopustno napetost, ki se lahko pojavi v nosilcu prijemala manipulatorja aluminijastih bram. Predstavili smo tudi geometrijske omejitve, ki smo jih upoštevali pri iskanju konstrukcijskih rešitev nosilca prijemala.

S pomočjo programskega paketa Catia V5R20, smo pripravili 3D numerični model in ga nato uvozili in numerično preračunali s programskim paketom Abaqus CAE. Numeričnim modelom smo določili materialne lastnosti, robne pogoje obremenitev, simetrije in vpetja. Težave so se pojavile, ko smo pri povezavi med referenčno točko in spodnjo površino spodnje plošče, predpisali togo povezavo (vpeli smo vse rotacije in pomike), ter s tem naredili spodnjo ploščo povsem togo. Zaradi tega, je prihajalo do koncentracij napetosti na robu, kjer so bili predpisani robni pogoji simetrije. Prav tako so bili rezultati analiz napetosti napačni (pojavila se je nižja koncentracija napetosti od dejanske). Težavo smo rešili tako, da smo referenčni točki predpisali robne pogoje simetrije, ter tako dobili pravilne rezultate.

Sledila je numerična analiza posameznih variant, kjer smo z rezultati numeričnih simulacij pri originalni varianti dokazali vzrok, zaradi katerega je prišlo do razpoke. S pomočjo rezultatov numeričnih simulacij konstrukcijskih variant 1 in 2 pa smo naredili varianto 3, katere maksimalne napetosti so manjše od dopustnih napetosti, ter tako podali boljšo konstrukcijsko rešitev nosilca prijemala.

7 SEZNAM UPORABLJENIH VIROV

- [1] KRAUT Bojan. *Krautov strojniški priročnik – 15. Slovenska izdaja / izdajo pripravila Jože Puhar in Jože Stropnik*. Ljubljana: Littera picta, 2011
- [2] REN Zoran, GLODEŽ Srečko. *Strojni elementi 1.del*: univerzitetni učbenik. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2005
- [3] REN Zoran, ULBIN Miran. *MKE praktikum za ABAQUS*: navodila za vaje. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2010
- [4] Impol 2000 d.d.: Uradna spletna stran podjetja Impol 2000 d.d. [svetovni splet] Dostopno na WWW: <http://www.impol.si/> [04.08.2013]
- [5] Abaqus 6.11 spletna dokumentacija: Uradna spletna stran podjetja Dassault systems Simulia [Svetovni splet]. Dostopno na WWW: <https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus/6.11.2/index.html> [11.07.2013]