

# Konstruiranje i numerička analiza oslabljenja na kućištu baterije električnog vozila za smanjenje pretlaka

---

Krajinović, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:510132>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-19**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marin Krajinović**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Skozrit

Student:

Marin Krajinović

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Ivici Skozritu na pomoći, uloženom trudu i savjetovanju tijekom pisanja diplomskog rada.

Zahvaljujem se tvrtci „Rimac Automobili d.o.o.“ na zadanom zadatku i modelima te Gregoru Juretiću, dipl. ing. stroj. na stalnoj dostupnosti i pomoći.

Ponajviše se zahvaljujem svojim roditeljima i bratu na pruženoj podršci, pokazanom strpljenju i moralnoj podršci.

Također, zahvaljujem se i svojoj djevojci te svojim prijateljima koji su mi uljepšali i olakšali studiranje.

Marin Krajinović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|                                                              |         |
|--------------------------------------------------------------|---------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |         |
| Datum:                                                       | Prilog: |
| Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1                                 |         |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -                                   |         |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marin Krajinović**

Mat. br.: 0035200923

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Konstruiranje i numerička analiza oslabljenja na kućištu baterije električnog vozila za smanjenje pritlaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design and Numerical Analysis of Safety Pressure Relief on Electric Vehicle Battery Pack**

Opis zadatka:

Električna vozila nas svakim danom sve više okružuju te se nameću kao budućnost automobilske industrije. Neizostavna stavka svakog električnog automobila je baterijski sustav koji prvenstveno služi za napajanje elektromotora koji pogoni električno vozilo. Međutim, glavna komponenta sustava su baterije koje imaju svoje nedostatke. Uslijed greške unutar same baterije može doći do pojave „toplinskog bijega“ a zatim i do naglog povećanja tlaka unutar kućišta baterije. Kućište mora biti tako izvedeno da je na određenom mjestu „oslabljeno“ tako da uslijed povećanja tlaka tu dolazi do kontroliranog loma kućišta i sigurnog smanjenja pritlaka.

U radu je potrebno:

- za definirani oblik, dimenzije i karakteristike materijala kućišta baterije konstruirati moguća sigurnosna oslabljenja kućišta te izraditi prostorne CAD modele istih,
- sve numeričke analize provesti primjenom programskog paketa Abaqus® koji se temelji na metodi konačnih elemenata i za diskretizaciju svih numeričkih modela koristiti dostupne konačne elemente iz korištenog programskog paketa,
- na jednostavnim problemima provesti verifikaciju svih kasnije u numeričkim analizama korištenih konačnih elemenata i rezultate usporediti s dostupnim analitičkim rješenjima,
- za izrađene CAD modele sigurnosnog oslabljenja kućišta te rubne uvjete i opterećenje, provesti numeričke analize te:
  - o odrediti optimalnu mrežu konačnih elemenata i prikazati konvergenciju rješenja,
  - o odrediti optimalni oblik sigurnosnog oslabljenja kućišta s obzirom na dozvoljeni maksimalni tlak u kućištu.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

12. studenoga 2020.

Datum predaje rada:

14. siječnja 2021.

Predviđeni datum obrane:

18. – 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:

*Shant Ivica*

Doc. dr. sc. Ivica Skozrit

Predsjednica Povjerenstva:

*Tanja Jurčević Lulić*

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

|                                                                               |      |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| SADRŽAJ .....                                                                 | I    |
| POPIS SLIKA .....                                                             | III  |
| POPIS TABLICA.....                                                            | VI   |
| POPIS OZNAKA .....                                                            | VII  |
| SAŽETAK.....                                                                  | VIII |
| SUMMARY .....                                                                 | IX   |
| 1. UVOD .....                                                                 | 1    |
| 1.1. Baterije u električnim automobilima.....                                 | 1    |
| 1.2. Problem toplinskog bijega.....                                           | 3    |
| 1.3. Rupture disk .....                                                       | 4    |
| 2. MODEL KUĆIŠTA BATERIJE .....                                               | 6    |
| 2.1. Geometrijska ograničenja pri konstruiranju oslabljenja.....              | 7    |
| 2.2. Materijal kućišta .....                                                  | 7    |
| 3. POSTOJEĆA RJEŠENJA I IDEJE .....                                           | 9    |
| 3.1. Patent US4576303A.....                                                   | 9    |
| 3.2. Patent US3826412A.....                                                   | 10   |
| 3.3. Patent US8193770B2 .....                                                 | 10   |
| 3.4. Patent CA638422A .....                                                   | 11   |
| 4. METODA KONAČNIH ELEMENATA .....                                            | 13   |
| 4.1. Opis programskog paketa.....                                             | 13   |
| 4.2. Konačni elementi u programskom paketu <i>Abaqus</i> .....                | 14   |
| 4.3. Trodimenzijski konačni elementi .....                                    | 15   |
| 4.4. Tetraedarski konačni elementi drugog reda .....                          | 15   |
| 4.4.1. Tetraedarski konačni elementi u programskom paketu <i>Abaqus</i> ..... | 16   |
| 4.5. Nelinearna analiza .....                                                 | 16   |
| 4.5.1. Geometrijska nelinearnost.....                                         | 17   |
| 4.5.2. Materijalna nelinearnost .....                                         | 17   |
| 4.5.3. Nelinearnost kontakta i rubnih uvjeta .....                            | 18   |
| 4.6. Verifikacija primjenjenih konačnih elemenata .....                       | 18   |
| 5. KONCEPTI I RJEŠENJA .....                                                  | 22   |
| 5.1. Dizajni izrađeni odvajanjem čestica.....                                 | 22   |
| 5.1.1. Položaj oslabljenja.....                                               | 23   |
| 5.1.2. Kružno udubljenje na poklopcu oko zareza .....                         | 26   |
| 5.1.3. Odabir svrdla .....                                                    | 28   |

|        |                                                        |    |
|--------|--------------------------------------------------------|----|
| 5.1.4. | Dizajn „zvijezda“ .....                                | 31 |
| 5.1.5. | Dizajn „I“ .....                                       | 33 |
| 5.1.6. | Dizajn „zvijezda bez sjecišta“ .....                   | 35 |
| 5.1.7. | Dizajn „zvijezda s polukružnim središtem“ .....        | 38 |
| 5.1.8. | Dizajn s kružnim zarezima .....                        | 40 |
| 5.2.   | Dizajni izrađeni injekcijskim prešanjem .....          | 42 |
| 5.2.1. | Kružno udubljenje na poklopcu oko zareza .....         | 43 |
| 5.2.2. | Dizajn „zvijezda“ .....                                | 45 |
| 5.2.3. | Dizajn „I“ .....                                       | 47 |
| 6.     | NUMERIČKA ANALIZA ODABRANIH RJEŠENJA .....             | 51 |
| 6.1.   | Odabrani dizajn izrađen odvajanjem čestica .....       | 51 |
| 6.1.1. | Konvergencija .....                                    | 53 |
| 6.1.2. | Analiza dizajna izrađenog odvajanjem čestica.....      | 55 |
| 6.2.   | Odabrani dizajn izrađen injekcijskim prešanjem .....   | 60 |
| 6.2.1. | Konvergencija .....                                    | 61 |
| 6.2.2. | Analiza dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem ..... | 64 |
| 6.3.   | Usporedba odabranih rješenja .....                     | 68 |
| 7.     | ZAKLJUČAK .....                                        | 70 |
|        | LITERATURA.....                                        | 72 |
|        | PRILOZI.....                                           | 73 |

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1.1. Različite vrste električnih baterija [3] .....                                                                                              | 1  |
| Slika 1.2. Rimac C-Two hiper-automobil (lijevo); Rimac C-Two baterijski sustav (desno) [4]2                                                            |    |
| Slika 1.3. Baterijski modul auta Rimac Concept One [4] .....                                                                                           | 2  |
| Slika 1.4. Model procesa „toplinskog bijega“ [6] .....                                                                                                 | 3  |
| Slika 1.5. Rupture disk – ravni [8] .....                                                                                                              | 4  |
| Slika 1.6. Eksplozijski otvori (eng. <i>explosion vents</i> ) [9].....                                                                                 | 5  |
| Slika 2.1. Poklopac modula kućišta baterije električnog automobila dobivenog od tvrtke „Rimac Automobili d.o.o.“ u <i>SolidWorks</i> -u [4] .....      | 6  |
| Slika 2.2. Simbolički graf naprezanje-deformacija materijala PAGF-13 .....                                                                             | 8  |
| Slika 3.1. Patent US4576303A [12] .....                                                                                                                | 9  |
| Slika 3.2. Patent US3826412A [13] .....                                                                                                                | 10 |
| Slika 3.3. Patent US8193770B2 [14] .....                                                                                                               | 11 |
| Slika 3.4. Patent CA638422A [15].....                                                                                                                  | 12 |
| Slika 4.1. Najčešće korištene skupine konačnih elemenata [18].....                                                                                     | 14 |
| Slika 4.2. a) Konačni element prvog reda; b) Konačni element drugog reda [18].....                                                                     | 14 |
| Slika 4.3. Tetraedarski konačni element 2. reda [18] .....                                                                                             | 15 |
| Slika 4.4. Položaj integracijskih točaka na tetraedarskom konačnom elementu 2. reda [19] ..                                                            | 16 |
| Slika 4.5. Geometrijska nelinearnost.....                                                                                                              | 17 |
| Slika 4.6. Materijalna nelinearnost gumenog materijala.....                                                                                            | 18 |
| Slika 4.7. Kontaktna nelinearnost .....                                                                                                                | 18 |
| Slika 4.8. Slobodno oslonjena pravokutna ploča opterećena konstantnim tlakom $p_1$ .....                                                               | 19 |
| Slika 4.9. Tablica za izračun progiba slobodno oslonjene pravokutne ploče opterećene konstantnim tlakom [21] .....                                     | 19 |
| Slika 4.10. Verifikacijski model s rubnim uvjetima.....                                                                                                | 20 |
| Slika 4.11. Diskretizirani verifikacijski model.....                                                                                                   | 20 |
| Slika 4.12. Raspodjela pomaka po verifikacijskom modelu [mm] .....                                                                                     | 21 |
| Slika 5.1. Rubni uvjeti.....                                                                                                                           | 22 |
| Slika 5.2. Utor izrađen svrdlom promjera 0,8 mm (lijevo) i svrdlom s vrhom od 60° (desno) 23                                                           |    |
| Slika 5.3. Mreža konačnih elemenata za dizajn "križ" .....                                                                                             | 23 |
| Slika 5.4. Dizajn s vanjske strane poklopca - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                               | 24 |
| Slika 5.5. Dizajn s unutarnje strane poklopca - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                             | 24 |
| Slika 5.6. Položaj najvećeg naprezanja za dizajn s vanjske (lijevo) i s unutarnje strane poklopca (desno) u Pa .....                                   | 25 |
| Slika 5.7. Utor zarez dizajna s udubljenjem (lijevo) i bez udubljenja (desno).....                                                                     | 26 |
| Slika 5.8. Mreža konačnih elemenata za dizajn s kružnim udubljenjem .....                                                                              | 26 |
| Slika 5.9. Dizajn bez udubljenja - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                          | 27 |
| Slika 5.10. Dizajn s udubljenjem - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                          | 27 |
| Slika 5.11. Sredina dizajna bez udubljenja (lijevo) i s udubljenjem (desno) u Pa .....                                                                 | 28 |
| Slika 5.12. Mreža konačnih elemenata za dizajn izrađen svrdlom promjera 0,8 mm (lijevo) i dizajn izrađen svrdlom s vrhom od 60 stupnjeva (desno) ..... | 29 |
| Slika 5.13. Dizajn izrađen svrdlom promjera 0,8 mm - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                        | 29 |
| Slika 5.14. Dizajn izrađen svrdlom s vrhom od 60° - raspodjela naprezanja po modelu u Pa. 30                                                           |    |
| Slika 5.15. Položaj najvećeg naprezanja za dizajn izrađen svrdlom promjera 0,8 mm (lijevo) i s vrhom od 60° (desno) u Pa .....                         | 30 |
| Slika 5.16. Mreža konačnih elemenata za dizajn "križ" (lijevo) i dizajn "zvijezda" (desno)... 31                                                       |    |

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 5.17. Dizajn "križ" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                                               | 32 |
| Slika 5.18. Dizajn "zvijezda" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                                           | 32 |
| Slika 5.19. Položaj najvećeg naprezanja dizajna "križ" (lijevo) i dizajna "zvijezda" (desno) u Pa .....                                                              | 33 |
| Slika 5.20. Model dizajna "I" u <i>Solidworks</i> -u .....                                                                                                           | 34 |
| Slika 5.21. Dizajn "I" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                                                  | 34 |
| Slika 5.22. Položaj najvećeg naprezanja dizajna "zvijezda" (lijevo) i dizajna "I" (desno) u Pa .....                                                                 | 35 |
| Slika 5.23. Model dizajna "zvijezda bez sjecišta" u <i>Solidworks</i> -u .....                                                                                       | 36 |
| Slika 5.24. Mreža konačnih elemenata za dizajn "zvijezda bez sjecišta" .....                                                                                         | 36 |
| Slika 5.25. Dizajn "zvijezda bez sjecišta" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                              | 37 |
| Slika 5.26. Položaj najvećeg naprezanja dizajna "zvijezda" (lijevo) i dizajna "zvijezda bez sjecišta" (desno) u Pa .....                                             | 37 |
| Slika 5.27. Model dizajna "zvijezda s polukružnim središtem" u <i>Solidworks</i> -u .....                                                                            | 38 |
| Slika 5.28. Mreža konačnih elemenata za dizajn "zvijezda s polukružnim središtem" .....                                                                              | 39 |
| Slika 5.29. Dizajn "zvijezda s polukružnim središtem" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                   | 39 |
| Slika 5.30. Položaj najvećeg naprezanja dizajna "zvijezda s polukružnim središtem" u Pa ....                                                                         | 40 |
| Slika 5.31. Model dizajna "zvijezda s kružnim zareza" u <i>Solidworks</i> -u .....                                                                                   | 41 |
| Slika 5.32. Dizajn "zvijezda s kružnim zareza" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa ...                                                                            | 41 |
| Slika 5.33. Dimenzije zareza dizajna za injekcijsko prešanje .....                                                                                                   | 42 |
| Slika 5.34. Dimenzije i oblik zareza (lijevo); presjek prijelaza s poklopca na udubljenje po pravilima injekcijskog prešanja (desno) .....                           | 43 |
| Slika 5.35. Mreža konačnih elemenata za dizajn bez udubljena (lijevo) i dizajn s udubljenjem (desno) .....                                                           | 43 |
| Slika 5.36. Dizajn bez udubljenja za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                               | 44 |
| Slika 5.37. Dizajn s udubljenjem za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                | 44 |
| Slika 5.38. Mreža konačnih elemenata na najopterećenijem području za dizajn "križ" (lijevo) i dizajn "zvijezda" (desno) .....                                        | 45 |
| Slika 5.39. Dizajn "križ" za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa ....                                                                        | 46 |
| Slika 5.40. Dizajn "zvijezda" za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                   | 46 |
| Slika 5.41. Položaj najvećeg naprezanja za dizajn "križ" (lijevo) i dizajn "zvijezda" (desno) izrađeni injekcijskim prešanjem u Pa .....                             | 47 |
| Slika 5.42. Mreža konačnih elemenata za model dizajna "I" .....                                                                                                      | 48 |
| Slika 5.43. Dizajn "križ" za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                       | 48 |
| Slika 5.44. Dizajn "I" za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                          | 49 |
| Slika 5.45. Položaj najvećeg naprezanja za dizajn "križ" (lijevo) i dizajn "zvijezda" (desno) izrađeni injekcijskim prešanjem u Pa .....                             | 49 |
| Slika 6.1. Alat za izradu zareza odvajanjem čestica [22] (lijevo) i dimenzije utora (desno) ...                                                                      | 51 |
| Slika 6.2. Poklopac kućišta baterije s prijedlogom za položaj oslabljenja .....                                                                                      | 52 |
| Slika 6.3. Dimenzije i geometrija modela oslabljenja izrađenog odvajanjem čestica .....                                                                              | 52 |
| Slika 6.4. Diskretizacija s a) 45211 elementa - aproksimativna veličina elementa je 0,6 mm i b) 74734 elementa – aproksimativna veličina elementa je 0,33 mm .....   | 53 |
| Slika 6.5. Diskretizacija s c) 127799 elementa - aproksimativna veličina elementa je 0,2 mm i d) 185795 elementa – aproksimativna veličina elementa je 0,15 mm ..... | 53 |
| Slika 6.6. Diskretizirana stražnja strana modela na najopterećenijem području (lijevo); poprečni presjek mreže na najopterećenijem području (desno) .....            | 54 |

|                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 6.7. Grafički prikaz konvergencije rezultata dizajna izrađenog odvajanjem čestica .....                                                                                                    | 55 |
| Slika 6.8. Model dizajna oslabljenja izrađenog odvajanjem čestica s zadanim rubnim uvjetima .....                                                                                                | 55 |
| Slika 6.9. Dizajn izrađen odvajanjem čestica za 1. slučaj - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                                           | 56 |
| Slika 6.10. Položaj najvećeg naprezanja - 1. slučaj dizajna izrađenog odvajanjem čestica u Pa .....                                                                                              | 57 |
| Slika 6.11. Položaj najvećeg naprezanja dizajna izrađenog odvajanjem čestica – radni pretlak (lijevo); raspodjela glavne komponente naprezanja u smjeru osi y po presjeku (desno) u Pa. ....     | 58 |
| Slika 6.12. Dizajn izrađen odvajanjem čestica - radni pretlak - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                                       | 59 |
| Slika 6.13. Poklopac kućišta baterije s prijedlogom za položaj oslabljenja dizajna „I“ .....                                                                                                     | 60 |
| Slika 6.14. Dimenzije utora (lijevo) i presjek prijelaza s poklopca na udubljenje (desno) za dizajn izrađen injekcijskim prešanjem .....                                                         | 60 |
| Slika 6.15. Dimenzije i geometrija modela oslabljenja izrađenog injekcijskim prešanjem.....                                                                                                      | 61 |
| Slika 6.16. Diskretizacija s a) 25807 elementa - aproksimativna veličina elementa je 0,6 mm i b) 54517 elementa – aproksimativna veličina elementa je 0,3 mm .....                               | 61 |
| Slika 6.17. Diskretizacija s c) 103035 elementa - aproksimativna veličina elementa je 0,2 mm i d) 136405 elementa – aproksimativna veličina elementa je 0,175 mm .....                           | 62 |
| Slika 6.18. Diskretizirana stražnja strana modela na najopterećenijem području (lijevo); Poprečni presek mreže na najopterećenijem dijelu (desno) .....                                          | 62 |
| Slika 6.19. Grafički prikaz konvergencije rezultata dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem .....                                                                                               | 63 |
| Slika 6.20. Model dizajna oslabljenja izrađenog injekcijskim prešanjem s zadanim rubnim uvjetima .....                                                                                           | 64 |
| Slika 6.21. Dizajn izrađen injekcijskim prešanjem - 1. slučaj - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                                       | 65 |
| Slika 6.22. Položaj najvećeg naprezanja dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem za 1. slučaj u Pa .....                                                                                         | 65 |
| Slika 6.23. Dizajn izrađen injekcijskim prešanjem - radni pretlak - raspodjela naprezanja po modelu u Pa .....                                                                                   | 67 |
| Slika 6.24. Položaj najvećeg naprezanja dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem - radni pretlak (lijevo); raspodjela glavne komponente naprezanja u smjeru osi y po presjeku (desno) u Pa ..... | 67 |

## POPIS TABLICA

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 5.1. Usporedba dizajna s vanjske i dizajna s unutarnje strane .....                         | 25 |
| Tablica 5.2. Usporedba dizajna bez i s kružnim udubljenjem oko zareza .....                         | 28 |
| Tablica 5.3. Usporedba dizajna izrađenim sa svrdlom promjera 0,8 mm i s vrhom od 60° .....          | 31 |
| Tablica 5.4. Usporedba dizajna "križ" i dizajna "zvijezda" .....                                    | 33 |
| Tablica 5.5. Usporedba dizajna "zvijezda" i dizajna "I" .....                                       | 35 |
| Tablica 5.6. Usporedba dizajna "zvijezda" i dizajna "zvijezda bez sjecišta" .....                   | 38 |
| Tablica 5.7. Usporedba dizajna "zvijezda" i dizajna "zvijezda s polukružnim središtem" .....        | 40 |
| Tablica 5.8. Usporedba dizajna "zvijezda" i dizajna "zvijezda s kružnim zarezima" .....             | 42 |
| Tablica 5.9. Usporedba dizajna bez udubljenja i s udubljenjem izrađeni injekcijskim prešanjem ..... | 45 |
| Tablica 5.10. Usporedba dizajna "križ" i dizajna "zvijezda" izrađeni injekcijskim prešanjem .....   | 47 |
| Tablica 5.11. Usporedba dizajna "križ" i dizajna "I" izrađeni injekcijskim prešanjem .....          | 50 |
| Tablica 6.1. Konvergencija rezultata naprezanja dizajna izrađenog odvajanjem čestica .....          | 54 |
| Tablica 6.2. Dizajn oslabljenja izrađen odvajanjem čestica - 1. slučaj .....                        | 57 |
| Tablica 6.3. Dizajn oslabljenja izrađen odvajanjem čestica - radni pretlak .....                    | 59 |
| Tablica 6.4. Konvergencija rezultata naprezanja dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem ..         | 63 |
| Tablica 6.5. Dizajn oslabljenja izrađen injekcijskim prešanjem - 1. slučaj .....                    | 66 |
| Tablica 6.6. Dizajn oslabljenja izrađen injekcijskim prešanjem - radni pretlak .....                | 68 |
| Tablica 6.7. Usporedba odabranih rješenja .....                                                     | 68 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka                                                                                  | Jedinica          | Opis                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $a$                                                                                     | mm                | Duljina pravokutne ploče                                               |
| $b$                                                                                     | mm                | Širina pravokutne ploče                                                |
| $E$                                                                                     | N/mm <sup>2</sup> | Modul elastičnosti                                                     |
| $h$                                                                                     | mm                | Debljina pravokutne ploče                                              |
| $p$                                                                                     | N/mm <sup>2</sup> | Pretlak                                                                |
| $p_1$                                                                                   | N/mm <sup>2</sup> | Konstantni tlak                                                        |
| $S$                                                                                     |                   | Faktor sigurnosti                                                      |
| $T$                                                                                     | °C                | Temperatura                                                            |
| $U$                                                                                     | mm                | Pomak u smjeru osi $x$                                                 |
| $V$                                                                                     | mm                | Pomak u smjeru osi $y$                                                 |
| $w$                                                                                     | mm                | Maksimalni progib pravokutne ploče u numeričkom proračunu              |
| $w_1$                                                                                   | mm                | Maksimalni progib pravokutne ploče u analitičkom proračunu             |
| $W$                                                                                     | mm                | Pomak u smjeru osi $z$                                                 |
| $x, y, z$                                                                               |                   | Koordinatne osi                                                        |
| $\delta$                                                                                | mm                | Ukupni pomak                                                           |
| $\varepsilon$                                                                           | mm                | Deformacija                                                            |
| $\sigma$                                                                                | N/mm <sup>2</sup> | Naprezanje                                                             |
| $\sigma_{M,0^\circ\text{C}}, \sigma_{M,20^\circ\text{C}}, \sigma_{M,23^\circ\text{C}}$  | N/mm <sup>2</sup> | Lomna čvrstoća materijala za temperaturu 0°C, 20°C i 23°C              |
| $\sigma_{M,60^\circ\text{C}}, \sigma_{M,75^\circ\text{C}}, \sigma_{M,80^\circ\text{C}}$ | N/mm <sup>2</sup> | Lomna čvrstoća materijala za temperaturu 60°C, 75°C i 80°C             |
| $\sigma_{p,75^\circ\text{C}}$                                                           | N/mm <sup>2</sup> | Naprezanje u uvjetima kvaziperiodičnog opterećenja za temperaturu 75°C |
| $\sigma_{\text{radni}}$                                                                 | N/mm <sup>2</sup> | Naprezanje pri radnom pretlaku                                         |
| $\nu$                                                                                   |                   | Poissonov faktor                                                       |

## SAŽETAK

U radu je provedeno konstruiranje i numerička analiza sigurnosnog oslabljenja na kućištu baterije električnog vozila u slučaju povišenog pretlaka. Model kućišta električne baterije te karakteristike materijala PAGF-13, od kojeg je izrađeno kućište, je ustupila tvrtka „Rimac Automobili d.o.o.“. Na početku je definiran problem te kako dolazi do povišenog pretlaka u kućištu zatim i na kojem dijelu kućišta električne baterije treba izraditi oslabljenje. Zatim su definirana geometrijska i proizvodna ograničenja pri konstruiranju oslabljenja. Nadalje, analizirano je stanje na tržištu i među patentima koji nude rješenja za zadani problem. Prije samih analiza provedena je verifikacija kasnije primjenjenih konačnih elemenata na jednostavnijem primjeru. Konstruirani su različiti dizajni sigurnosnog oslabljenja izrađeni injekcijskim prešanjem, kojim je izrađeno i samo kućište, te različiti dizajni izrađeni odvajanjem čestica. Dizajni su modelirani pomoću programskog paketa *SolidWorks*. Svaki dizajn je analiziran primjenom metode konačnih elemenata u programskom paketu *Abaqus*. Materijal PAGF-13 je modeliran kao plastičan stoga su numeričke analize bile nelinearne. Dizajni s boljim rezultatima od ostalih su prikazani u radu te međusobno uspoređeni u jednakim uvjetima ovisno o tehnici izrade. Nakon analize i usporedbe odabrana su dva najbolja dizajna, jedan izrađen odvajanjem čestica, a drugi injekcijskim prešanjem. Dva odabrana dizajna oslabljenja su zatim prikazani s dimenzijama i položajem na kućištu te je ispitana konvergencija rezultata za različite brojeve konačnih elemenata. Potom je za oba dizajna određen pretlak pucanja pri normalnim uvjetima rada te je provedena numerička analiza čvrstoće pri radnom pretlaku i najnepovoljnijim uvjetima. Nakon provedenih analiza izvršena je usporedba dvaju odabranih dizajna na temelju dobivenih rezultata. Naposljetku je na temelju rezultata i usporedbi dizajna donešen i zaključak.

Ključne riječi: sigurnosno oslabljenje, kućište električne baterije, pretlak, PAGF-13 materijal, nelinearna numerička analiza, pretlak pucanja, metoda konačnih elemenata, *Abaqus*

## SUMMARY

In this paper, the design and a numerical analysis of safety pressure relief on electric vehicle battery pack were performed. The battery pack model and its PAGF-13 material properties are provided by the company „Rimac Automobili d.o.o.“. Initially, it was defined how the overpressure in battery pack occurs and where the safety pressure relief weakening should be made. Then the geometric and production constraints in the designing of weakening were defined. Afterwards, the market situation and situation among patents that offer solution to given problem were analyzed. Prior to the analysis, verification of later used finite elements applied on a simpler problem has been performed. Various weakening designs made by injection moulding process and milling process were designed. Modeling has been performed with the *SolidWorks* software package. Each weakening design has been analyzed using finite element method used by the *Abaqus* software package. The PAGF-13 material is plastic so the numerical analyses were nonlinear. Only those designs with better results were presented in the paper and compared to each other in the same conditions depending on production method. After the analysis and comparison, the two best weakening designs were selected, one made by milling process and the other made by injection moulding process. The two selected designs were then shown with their dimensions and position on the battery pack and results convergence for various number of finite elements has been checked. Then, for both weakening designs, the bursting pressures under standard conditions were determined and numerical strength analyses at the working pressure and the most unfavorable conditions have been conducted. After the analysis, a comparison of the two selected designs was performed based on the obtained results. Finally, based on the same results and comparison, a conclusion was made.

Key words: safety pressure relief, electric vehicle battery pack, PAGF-13 material, nonlinear numerical analysis, bursting pressure, finite element method, *Abaqus*

## 1. UVOD

Korištenje električnih baterija je postala ljudska svakodnevica te ih nalazimo na svakom koraku u različitim primjenama. Električna baterija je spoj (obično serijski) dvaju ili više istosmjernih i istovrsnih izvora električne energije u kojima se kemijska, toplinska, sunčeva ili nuklearna energija pretvara u električnu energiju. Nalaze se u gotovo svim električnim uređajima koje koristimo, od mobitela, prijenosnih računala, ručnog sata, daljinskih upravljača pa sve do električnih automobila i e-bicikala, od malih baterija koje se mogu kupiti u svakoj trgovini do velikih akumulatora, prikazani na slici 1.1. Teško je danas zamisliti svijet u kojem nemamo te uređaje ili gdje bi svi ti uređaji morali biti spojene žicom direktno na električnu mrežu. No baterije nisu uvijek bile tako dostupne, prvo je trebalo proći mnoge prepreke kao što su zagrijavanje, nestabilnost kemijskih reakcija unutar baterije, vijek trajanja i ostale probleme ovisno o sastavu pojedine baterije. [1]

Baterije se dijele na dvije velike skupine: primarne, koje se nakon trošenja ne mogu više koristiti, i punjive (sekundarne) baterije, koje se mogu višekratno puniti nakon pražnjenja. [2]



Slika 1.1. Različite vrste električnih baterija [3]

### 1.1. Baterije u električnim automobilima

Automobilsko tržište postaje sve više preplavljeno električnim automobilima i već se sa sigurnošću može reći da su električni automobili budućnost automobilske industrije. Imaju

mnoštvo prednosti nad klasičnim automobilima s motorima na unutarnje izgaranje kao što su ekološka prihvatljivost, jednostavnost, veća efikasnost motora i slično. No, imaju i jednu veliku manu, a to su baterije koje imaju dosta nedostataka u usporedbi s standardnim automobilskim gorivom. Primjer jednog baterijskog sustava električnog automobila prikazan je na slici 1.2.



**Slika 1.2. Rimac C-Two hiper-automobil (lijevo); Rimac C-Two baterijski sustav (desno) [4]**

Baterijski sustav električnog vozila sustav je koji služi za pogon elektromotora koji pokreće električna vozila. Sustav se sastoji od paralelno ili serijski povezanih jediničnih ćelija i kao takav predstavlja ekvivalent spremniku goriva u konvencionalnom vozilu. Baterije koje se koriste u tu svrhu imaju mogućnost punjenja odnosno su sekundarnog karaktera (akumulator) i prikazane su na slici 1.3. Najčešće korišteni tipovi punjivih baterija u električnim automobilima su: olovna baterija, nikal-kadmij baterija, nikal-metalhidrid baterija i litij-ionska baterija. Danas možda najzastupljenija baterija je litij-ionska baterija, lagane su, imaju veliku gustoću energije te dugi vijek trajanja i veliki kapacitet. No jedna od najvećih mana, kao i kod većine električnih baterija, je pretjerano zagrijavanje zbog čega može eksplodirati i izazvati požar.



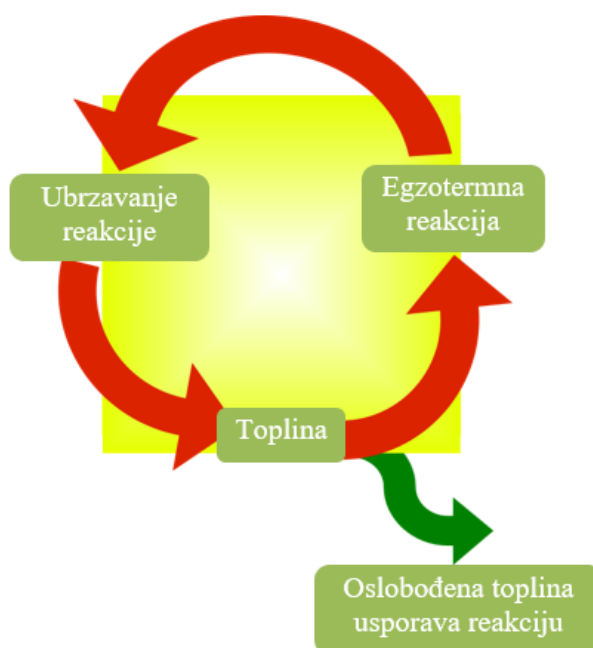
**Slika 1.3. Baterijski modul auta Rimac Concept One [4]**

## 1.2. Problem toplinskog bijega

„Toplinski bijeg“ (eng. *thermal runaway*) je nezaustavljiva lančana reakcija pri kojoj dolazi do naglog povećanja temperature uslijed nekakve greške u sustavu te se tako oslobađa velika količina energije koja također povećava temperaturu sustava te tako pospješuje i ubrzava daljnju reakciju što u nekim situacijama dovodi i do nekontrolirane eksplozije. Rizik toplinskog bijega u električnim baterijama se pojavljuje kada je temperatura baterije iznad  $60^{\circ}\text{C}$ , a postaje iznimno kritično pri  $100^{\circ}\text{C}$ . Pri povišenim temperaturama započinje egzotermna razgradnja materijala ćelije te naposljetku brzina samozagrijavanja je veća od brzine hlađenja ćelije. Temperatura ćelije kreće rasti eksponencijalno te se na kraju gubi stabilnost ćelije što dovodi do ispuštanja preostale toplinske i elektrokemijske energije u okolinu. Shematski prikaz procesa toplinskog bijega prikazan je na slici 1.4. [5]

Najčešće greške u električnim baterijama zbog kojih dolazi do toplinskog bijega su:

- Unutarnji kratki spoj – uslijed nesreće ili sličnog mehaničkog udara,
- Vanjski kratki spoj – uslijed deformacije baterijske ćelije,
- Prekomjerno punjenje baterije – prilikom prekomjernog punjenja baterije iznad maksimalnog napona navedenog u tehničkom listu, na primjer za povećavanje dometa električnog automobila,
- Nagle promjene pri punjenju ili pražnjenju baterije – na primjer uslijed naglog punjenja. [5]



Slika 1.4. Model procesa „toplinskog bijega“ [6]

### 1.3. Rupture disk

Nakon što se dogodi nekakav nepoželjan proces unutar kućišta baterije električnog automobila, kao što je „toplinski bijeg“, oslobođenu toplinu i prekomjerni tlak treba negdje otpustiti kako ne bi došlo do nekontroliranog puknuća kućišta na mjestu gdje to nije poželjno. Dode li do puknuća, primjerice, na bočnoj strani kućišta baterije, vrlo lako se može oštetiti i susjedno kućište baterije te izazvati lančanu reakciju i naposljetku veliku katastrofu.

Jedan od najčešćih rješenja za takve slučajeve je „rupture disk“. To je sigurnosni uređaj koji pri prekomjernom tlaku puca na unaprijed određenom mjestu, pozicioniranom tako da ne ošteti susjedne objekte ili ne ozlijedi ljude. Najčešće je obliku jednokratne membrane koja puca na točno predodređenom tlaku te tako štiti ostatak kućišta ili posude koja je pod tlakom od oštećenja. Pruža trenutni odgovor na povećanje tlaka no nakon puknuća se ne može zatvoriti više. Najčešće je izrađen od metala, ali može biti izrađen od gotovo svih materijala. Raspon dimenzija u kojima se pojavljuje je također velika prednost u odnosu na ostala slična rješenja, može biti veličine od svega nekoliko centimetara pa sve do 1,2 metra. Za ovaj zadatak je potrebno da „rupture disk“ bude ravan, tj. da nije konveksno-konkavnog oblika. Razlozi za to su tehnološke naravi koji će se objasniti kasnije u radu. Primjer ravnog „rupture disk“-a je prikazan na slici 1.5. [7]



Slika 1.5. Rupture disk – ravni [8]

Jedna od izvedbi „rupture disk“-a je i „eksplozijski otvor“ (eng. *explosion vent*). To je sigurnosni uređaj koji radi na istom principu kao i „rupture disk“, ali je većih dimenzija, ravan

i najčešće pravokutnog oblika kao na slici 1.6. Najčešće se primjenjuju u većim industrijskim postrojenjima gdje postoji mogućnost eksplozije.

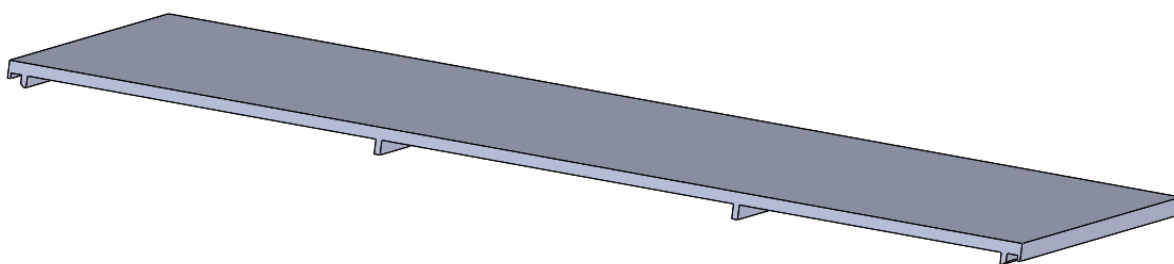


**Slika 1.6. Eksplozijski otvori (eng. *explosion vents*) [9]**

## 2. MODEL KUĆIŠTA BATERIJE

Kućište baterije je najbitnija stavka uz baterijske ćelije u baterijskom sustavu. Zadatak mu je da drži baterijske ćelije čvrsto na svom mjestu, odvaja ih od štetnih utjecaja okoline te također štiti okolinu i ljude od mogućih štetnih utjecaja baterijskih ćelija. Kod električnih vozila mora biti posebnog oblika i dimenzija kako bi stalo u traženi prostor, a pritom mora zadržati čvrstoću i krutost kako se ne bi uslijed vanjskog opterećenja deformirala baterijska ćelija te tako došlo do raznih nepoželjnih ishoda. Također je bitna izvedba kućišta i pri samom hlađenju baterija jer su baterije vrlo osjetljive na temperaturu. Hlađenje može biti izvedeno na više načina: prisilna ili spontana konvekcija zrakom, hlađenje dielektričnim uljem te hlađenjem tekućinom na bazi vode. Svaka izvedba hlađenja ima svoje visoke zahtjeve koje kućište mora zadovoljiti. U električnim vozilima materijal kućišta također mora biti i lagan jer već same baterijske ćelije čine veliki problem zbog velike mase. Stoga ravnoteža između performansi i gustoće materijala te oblika kućišta je od velike važnosti.

Model kućišta baterije električnog automobila je ustupila tvrtka „Rimac Automobili d.o.o.“ [4] te zbog autorski prava nije moguće prikazati cijelo kućište. Kućište je izvedeno tako da se sastoji od više modula koji se međusobno spajaju u konačni oblik kućišta. Za potrebe zadatka prikazati će se samo poklopac središnjeg modula kućišta na kojem će se raditi oslabljenje. Poklopac modula kućišta električne baterije prikazan je na slici 2.1.



**Slika 2.1. Poklopac modula kućišta baterije električnog automobila dobivenog od tvrtke „Rimac Automobili d.o.o.“ u SolidWorks-u [4]**

Modul kojem pripada prikazani poklopac je središnji modul koji se ponavlja na sredini kućišta u serijskom spoju. Jedan središnji modul može držati 24 baterijske ćelije. Poklopac modula je s vanjske strane ravan, a s unutarnje strane poklopca nalaze se rebra koja služe kao ojačanje poklopca. Pričvršćuje se na tijelo kućišta laserskim zavarivanjem. Materijal poklopca je

proziran za laser dok materijal tijela modula upija laser te se tako na području spoju generira toplina koja zavaruje dvije željene površine. Poklopac je za tijelo modula pričvršćen na dva kraja te ukrutama koje su raspoređene po sredini modula. Ukrute pomažu očuvanju čvrstoće i krutosti poklopca no zato ometaju konstruiranje sigurnosnog oslabljenja na poklopcu.

## 2.1. Geometrijska ograničenja pri konstruiranju oslabljenja

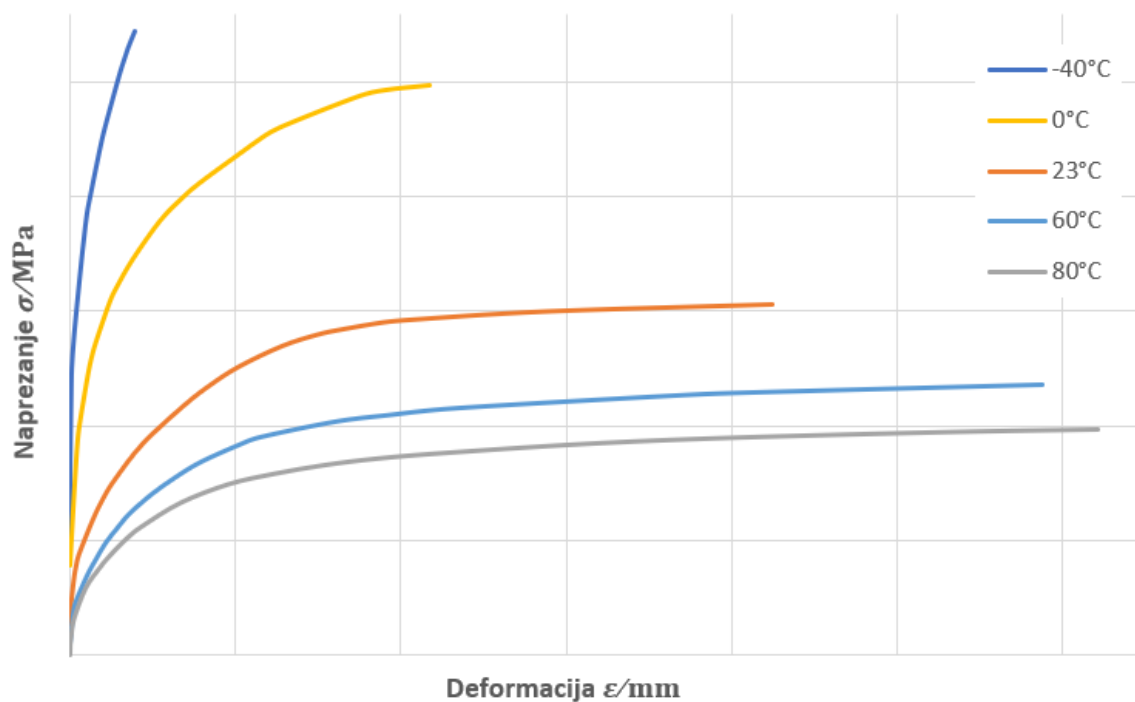
Poklopac, kao i cijelo kućište, se izrađuje injekcijskim prešanjem. Injekcijsko prešanje je proizvodni proces koji se izvodi ubrizgavanjem otopljenog materijala u kalupnu šupljinu te pritom materijal poprima oblik kalupne šupljine te se hlađenjem stvrdne. Kalup je glavni alat koji oblikuje proizvod, sastoji se od dva dijela te može izrađivati samo jednu vrstu otpresaka. O kvaliteti kalupa i površine kalupa ovisi kvaliteta otpreska. Postupak je skup te se isplati samo pri izradi velikih serija proizvoda. Najskuplja stavka je proizvodnja kalupa stoga sigurnosno oslabljenje mora biti izrađeno promjenom najviše jedne strane kalupa. Kako pri izradi novog sigurnosnog oslabljenja na poklopcu injekcijskim prešanjem ne bi mijenjali obje strane kalupa za prešanje, oslabljenje mora biti konstruirano u ravni poklopca, tj. ne smije biti izbočeno na jednu stranu, a da pritom zadržava konstantnu debljinu stijenke te tako utječe na oblik oba kalupa. Što znači da pri izradi injekcijskim prešanjem udubljenja, izbočenja i zarezi se mogu izrađivati samo na jednoj strani poklopca. Pri izradi sigurnosnog oslabljenja na poklopcu odvajanjem čestica također ekonomski i vremenski isplativije bi bilo da se oslabljenje urezuje samo s jedne strane poklopca no taj uvjet tu nije nužan.

## 2.2. Materijal kućišta

Materijal od kojeg se izrađuje zadano kućište baterije električnog automobila je PAGF-13. Ime PAGF-13 predstavlja materijal poliamid ojačan s 13% staklenih vlakana. Ima visoku mehaničku čvrstoću, izvrsnu ravnotežu krutosti i žilavosti te dobre performanse na visokim temperaturama. Također ima dobra električno-otporna i zapaljivo-otporna svojstva te dobru otpornost na habanje i kemijske utjecaje. Dobro je prilagođen za proizvodnju injekcijskim prešanjem, crne je boje te ima široku primjenu zbog svojih kvaliteta, ponajviše u automobilske industriji. [11]

Na slici 2.2. prikazan je graf koji prikazuje odnos naprezanja i deformacije na različitim temperaturama između  $-40^{\circ}\text{C}$  i  $80^{\circ}\text{C}$ . Karakteristike materijala su dobivene od tvrtke „Rimac

Automobili d.o.o.“ [4] te zbog autorskih prava graf je simboličke naravi te iznosi naprezanja i deformacija nisu prikazani. U graf je osim temperature uključen utjecaj starosti te izotropni efekt (neovisnost opterećenja o usmjerenju staklenih vlakana u materijalu). Utjecaj starosti je bitan jer pri eksploataciji je najčešće izložen vlagi te mu se tada dosta mijenjaju mehanička svojstva. Materijal je modeliran kao plastičan stoga su sve provedene analize bile u nelinearnom području.



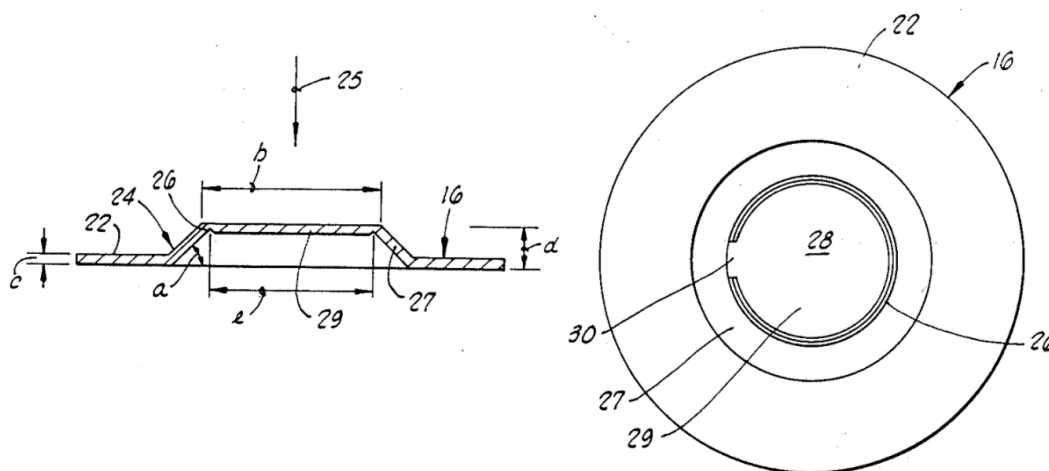
Slika 2.2. Simbolički graf naprežanje-deformacija materijala PAGF-13

### 3. POSTOJEĆA RJEŠENJA I IDEJE

Na tržištu već postoje rješenja za traženi sigurnosni dizajn oslabljenja kućišta no većinom su to gotovi ulošci koje treba kupiti i pričvrstiti za kućište na željenom mjestu. Najčešći primjer je već predstavljen u uvodu ovog rada, a to je „rupture disk“. Međutim, zadatak ovog rada je napraviti oslabljenje na poklopcu kućišta koje će se moći proizvesti odmah na samom poklopcu injekcijskim prešanjem ili oblikovanjem odvajanjem čestica. Za takav dizajn također već postoje određena rješenja i ideje koje se nalaze u patentima i koje će se uzeti u obzir tijekom konstruiranja. Kao što je već prethodno objašnjeno u poglavlju 2.1. *Geometrijska ograničenja pri konstruiranju oslabljenja*, radi tehnološke isplativosti udubljenja, izbočenja i zarezi se mogu izrađivati samo na jednoj strani poklopca, tj. promjenom samo jednog kalupa. Spomenuto ograničenje eliminira veliki broj postojećih patenata no ipak postoji nekoliko primjenjivih ideja.

#### 3.1. Patent US4576303A

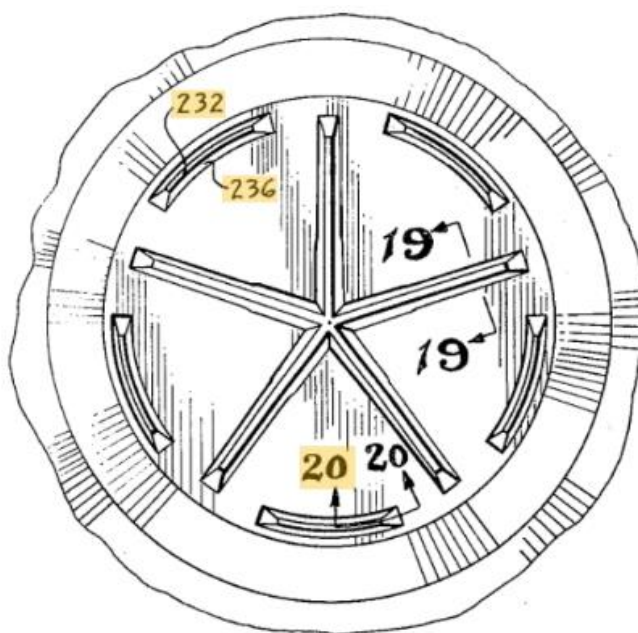
U patentu US4576303A [12] iz 1986. godine primjer je kružnog zareza, ali nespojenog na jednom kraju, prikazan na slici 3.1. Utor je „V“ oblika s vrhom od 90 stupnjeva. Dio poklopca koji je zarezan izidignut je iznad ostatka poklopca kućišta te se tako naprezanje koncentrira na traženom dijelu poklopca, kao i kod većine postojećih patenata. Ovakav dizajn zareza je bolji uz spomenuto uzvišenje no u zadatku takvo uzvišenje nije moguće iz već prethodno navedenih tehnoloških razloga.



Slika 3.1. Patent US4576303A [12]

### 3.2. Patent US3826412A

U patentu US3826412A [13] iz 1974. godine zarez je u obliku petokrake zvijezde na ravnoj plohi prikazan na slici 3.2. Utor je „V“ oblika, ali s ravnim dnom. Okolo zvijezde nalaze se dodatni kružni zarez koji imaju funkciju olakšanja deformacije dijelova koji će se savinuti prema van u trenutku pucanja te na taj način smanjiti opterećenje na ostatku poklopca kućišta i smanjiti mogućnost propagacije pukotine dalje od zareza na ostatak poklopca kućišta.

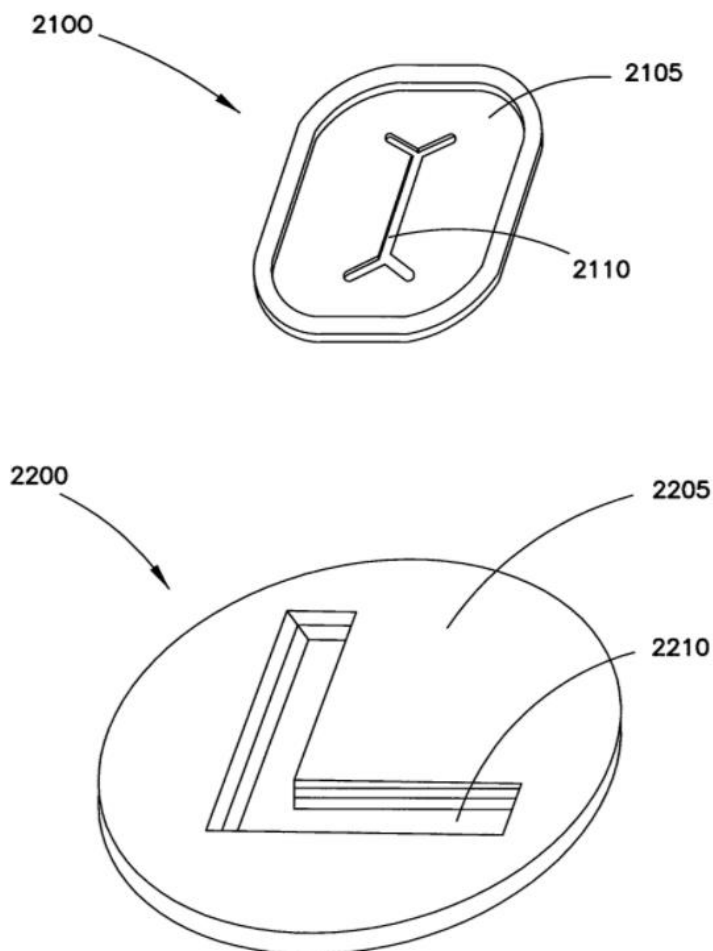


Slika 3.2. Patent US3826412A [13]

### 3.3. Patent US8193770B2

Patent US8193770B2 [14] iz 2008. godine još uvijek je aktivan, ali se prava ne polažu na dizajn sigurnosnog oslabljenja kućišta. U patentu se nalaze primjeri dva nova dizajna oslabljenja kućišta prikazani na slici 3.3. Gornji dizajn sa slike je na ravnoj plohi koja je nešto udubljena u odnosu na ostatak poklopca kućišta te je zarez u obliku slova „I“. Kod njega dolazi do pucanja na srednjoj liniji slova „I“ te je izvodiv i odvajanjem čestica i injekcijskim prešanjem. Ideja s udubljenjem okolo zareza s ciljem koncentriranja naprezanja na traženom području oslabljenja izgleda zanimljivo te je testirana u konceptima.

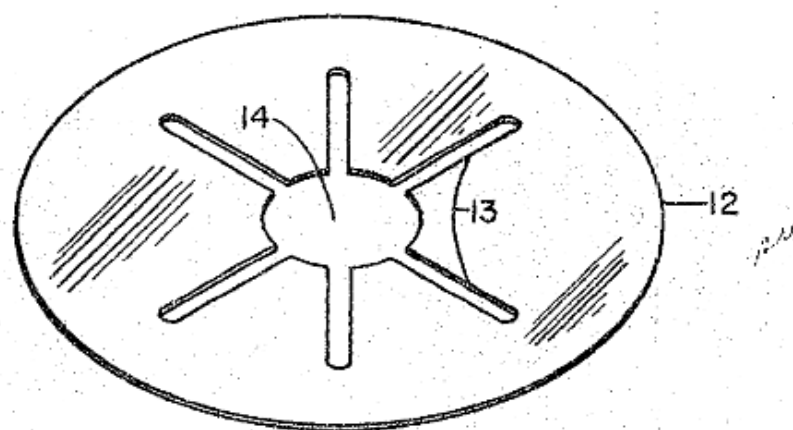
Donji dizajn sa slici 3.3. je u obliku slova „L“ te se ne nalazi na području koje je udubljeno u odnosu na ostatak poklopca kućišta nego je nešto dubljeg zareza. Također je izvodiv i odvajanjem čestica i injekcijskim prešanjem.



Slika 3.3. Patent US8193770B2 [14]

### 3.4. Patent CA638422A

U patentu CA638422A [15] iz 1962. godine nalazi se sljedeći primjer prikazan na slici 3.4. Na slici je prikazana samo jedna od više pločica koje čine „rupture disk” u tom patentu. Međutim, način na koji su izvedeni zarezi na pločici su zanimljivi te slični drugim dosadašnjim dizajnima stoga dizajn vrijedi razmotriti. Ovaj dizajn nema klasičnu zvijezdu nego je središnja točka u kojoj dolazi do pucanja povećana na kružnicu. Ovdje se najveće naprezanje neće pojavljivati u jednoj točki na sredini nego na većoj ravnoj plohi. Sami dizajn vjerojatno neće davati bolja rješenja od prijašnjih ideja no uz male promjene ideja može biti primjenjiva.



Slika 3.4. Patent CA638422A [15]

## 4. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata je metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se s diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Drugim riječima, područje kontinuuma dijeli se na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi, pa se razmatrani kontinuum prikazuje kao mreža konačnih elemenata. Elementi su međusobno povezani u točkama koje nazivamo čvorovi. Za svaki element se pretpostavlja rješenje zadane diferencijalne jednačbe. Diferencijalne jednačbe imaju oblik interpolacijskih funkcija koje povezuju zavisne varijable s njihovim vrijednostima u čvorovima. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, približavanje točnom rješenju raste s povećanjem broja elemenata. Za svaki element se izvodi lokalni sustav algebarskih jednačbi čije su nepoznanice čvorne veličine. Nakon toga se odgovarajućim postupcima formira globalni sustav jednačbi za cijeli diskretizirani model, u kojemu su nepoznanice čvorne vrijednosti svih elemenata diskretiziranog područja. Pomoću izračunatih čvornih veličina moguće je, primjenom poznatih teorijskih relacija, odrediti sve veličine potrebne za analizu opisanoga kontinuiranog sustava. [16]

### 4.1. Opis programskog paketa

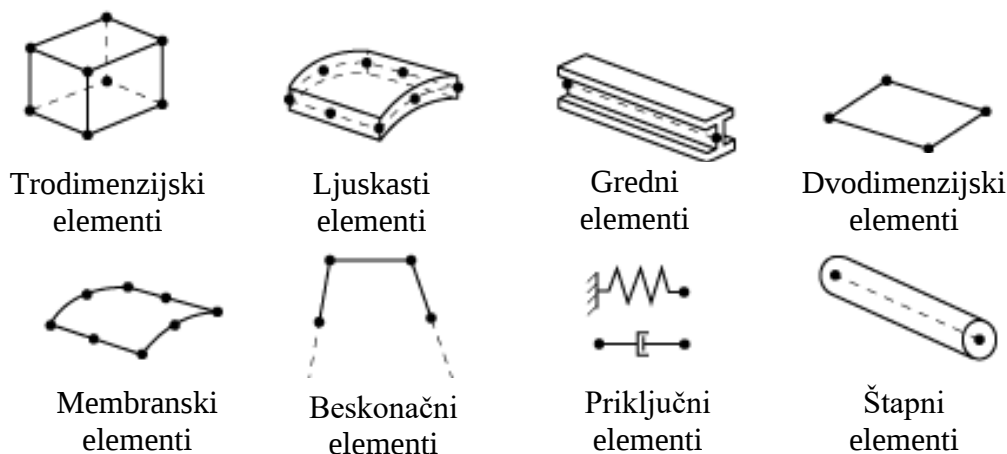
Rješavanje problema pomoću metode konačnih elemenata provodi se primjenom računala najčešće korištenjem postojećih programskih paketa kojima je glavni zadatak izrada proračunskog modela i definiranje ulaznih podataka. Prema [16] većina programskih paketa podijeljena je u tri radne cjeline:

- pretprocesor - faza u kojoj se obavlja učitavanje ulaznih podataka,
- procesor - rješavanje problema matematičkog modeliranja (vrednovanje i simuliranje), stvaranje izlazne datoteke za prikaz rezultata,
- postprocesor - generiranje izvješća, grafičkog prikaza, animacije iz izlazne datoteke.

U ovom radu korišten je programski paket *Abaqus* [17].

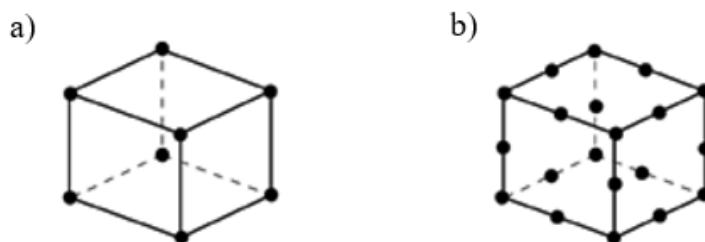
#### 4.2. Konačni elementi u programskom paketu Abaqus

*Abaqus* sadrži opsežnu biblioteku konačnih elemenata te nudi snažan skup alata za rješavanje različitih problema. Postoji pet obilježja koji određuju ponašanje svakog elementa: skupina (familija), broj stupnjeva slobode, broj čvorova, formulacija i integracija. Svaki element u *Abaqus*-u ima vlastito ime koje sadrži oznake za svih pet obilježja prethodno navedenih. Na slici 4.1. prikazane su skupine elemenata koje se najčešće koriste u analizi naprezanja. [18]



Slika 4.1. Najčešće korištene skupine konačnih elemenata [18]

Stupnjevi slobode su temeljne varijable koje se računaju tijekom analize. U analizi naprezanja/pomaka stupnjevi slobode su translacije, a za ljuskaste, gredne i cijevne elemente računaju se i rotacije u svakom čvoru. Pomaci i stupnjevi slobode računaju se u čvorovima elementa. U svakoj drugoj točki elementa pomaci se dobivaju interpolacijom čvornih pomaka. Broj čvorova u elementu uglavnom određuje red interpolacijske funkcije. Elementi koji imaju čvorove samo u vrhovima, na slici 4.2. a), koriste linearnu interpolaciju u svakom smjeru stoga se nazivaju elementi prvog reda. Elementi sa čvorovima na sredini svakog brida, na slici 4.2. b), koriste kvadratnu interpolaciju stoga se često nazivaju elementi drugog reda. [18]



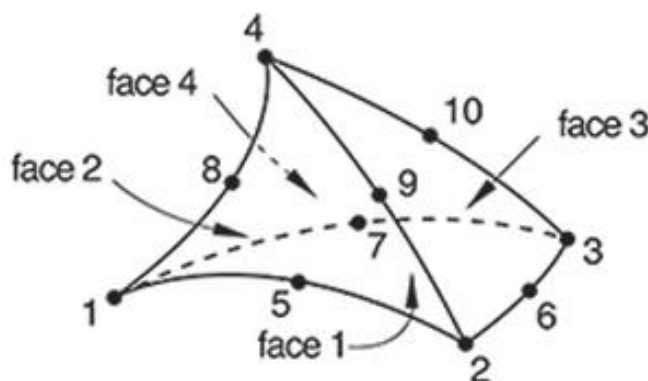
Slika 4.2. a) Konačni element prvog reda; b) Konačni element drugog reda [18]

### 4.3. Trodimenzijski konačni elementi

Trodimenzijski konačni elementi koje nudi programski paket *Abaqus/CAE* su heksaedarski elementi, element u obliku trostrane prizme i tetraedarski elementi. Koriste se za linearne analize ili složene nelinearne analize koje uključuju kontakt, plastičnost i velike deformacije. Stupnjevi slobode trodimenzijskih elemenata su po tri translacije u svakom čvoru. Znatno su precizniji ako nisu distordirani, osobito heksaedarski. Tetraedarski su manje osjetljivi na distorziju. Heksaedarski elementi su preporučljivi trodimenzionalni konačni elementi, a razlog tomu je što brže konvergiraju točnom rješenju i nisu osjetljivi na orijentaciju u mreži. Tetraedarski elementi su geometrijski svestraniji elementi i koriste se u mnogim automatskim algoritmima umrežavanja. Koriste se kada je geometrija modela komplicirana i kada nije moguće dobiti dovoljno kvalitetnu mrežu pomoću heksaedarskih elemenata jer su manje osjetljivi na distorziju. Međutim, dobra mreža heksaedarskih elemenata obično daje rješenja ekvivalentne točnosti tetraedarskim elementima u kraćem vremenu. Najčešće su tetraedarski elementi prvog reda pretjerano kruti i potrebne su fine mreže za dobivanje točnih rezultata. To se može izbjeći korištenjem tetraedarskih elemenata višeg reda. [18]

### 4.4. Tetraedarski konačni elementi drugog reda

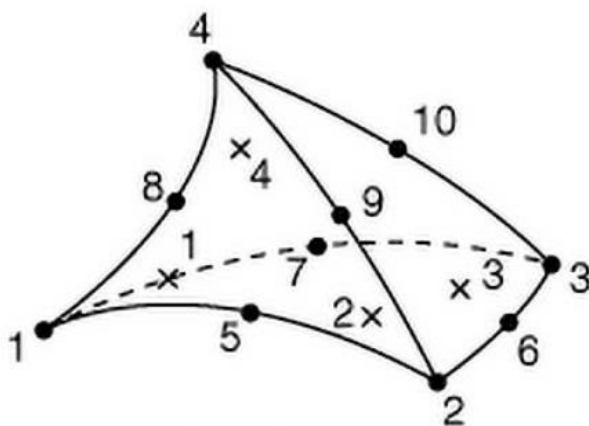
U ovom radu koristiti će se tetraedarski elementi drugog reda, prikazan na slici 4.3., zbog geometrije modela koja se ne može promrežiti heksaedarskim elementima zbog kompliciranosti. Sastoji se od ukupno 10 čvorova po 3 stupnja slobode. Element je drugog reda što znači da je polje pomaka opisano funkcijama drugog reda te može opisati linearno polje deformacija i naprezanja. [18]



Slika 4.3. Tetraedarski konačni element 2. reda [18]

#### 4.4.1. Tetraedarski konačni elementi u programskom paketu Abaqus

Tetraedarski konačni element koji ćemo koristiti u *Abaqus*-u ima naziv C3D10. Taj naziv govori da je to kontinuumski trodimenzijski element s 10 čvorova. Programski paket *Abaqus* kada stvara konturni prikaz raspodjele naprezanja po modelu zahtijeva vrijednosti naprezanja na pojedinačnim čvorovima konačnog elementa te na osnovu tih vrijednosti dodjeljuje boje dijelovima mreže elemenata. Prva vrijednost koja se računa u metodi konačnih elemenata su pomaci te se iz njih dalje računaju iznosi naprezanja i deformacija. *Abaqus* računa pomake u čvorovima no iznose deformacija i naprezanja računa u integracijskim točkama, koje se na tetraedarskom konačnom elementu drugog reda nalaze na pozicijama prikazanim iksevima na slici 4.4. Dakle, pošto su za kreiranje konturnog prikaza potrebne vrijednosti naprezanja u čvorovima, *Abaqus* ekstrapolira vrijednosti naprezanja iz integracijskih točaka u čvorove. No ekstrapolacija je isključivo numerički proces te ne uzima u obzir karakteristike materijala i veoma je osjetljiva na distorziju elementa stoga vrijednosti naprezanja u čvorovima znaju biti netočne te je tako i konturni prikaz raspodjele naprezanja po mreži modela u pojedinim slučajevima netočan. Dakle, u ovom radu vrijednosti naprezanja će se isčitavati iz integracijskih točaka konačnog elementa, a konturni prikaz će služiti samo kao vizualizacija raspodjele naprezanja po mreži modela. [19]



Slika 4.4. Položaj integracijskih točaka na tetraedarskom konačnom elementu 2. reda [19]

#### 4.5. Nelinearna analiza

Nelinearna analiza je analiza gdje postoji nelinearna veza između primjenjenih sila i dobivenih pomaka.

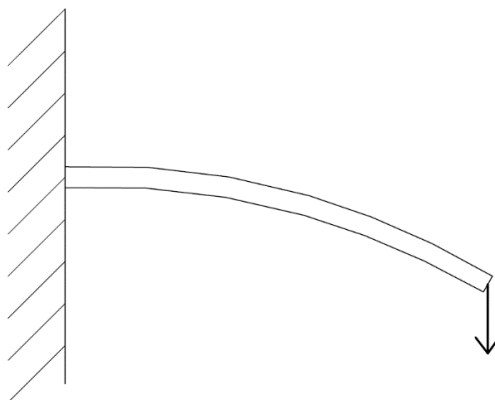
Uzrok nelinearnosti može biti:

- geometrijska nelinearnost (uslijed velikih deformacija)
- materijalna nelinearnost (elastoplastičnost materijala)
- nelinearnost kontakta i rubnih uvjeta

Navedeni uzroci uzrokuju nekonstantnost matrice krutosti tijekom primjene opterećenja. Upravo navedena nekonstantnost matrice krutosti dijeli ovu analizu od linearne gdje je matrica krutosti tijekom primjene opterećenja konstanta. Kao rezultat toga, potrebni su drugačiji pristupi rješavanju problema koji je nelinearan. [20]

#### **4.5.1. Geometrijska nelinearnost**

U analizama koje uključuju geometrijsku nelinearnost, promjene u geometriji dok se konstrukcija deformira uzimaju se u obzir pri formuliranju konstitutivnih i ravnotežnih jednažbi. Primjenjuju se u analizama oblikovanja metala, analizama guma i medicinskih uređaja koje zahtijevaju uporabu analize velikih deformacija temeljene na geometrijskoj nelinearnosti. Primjer problema s geometrijskom nelinearnosti gdje je došlo do velikih deformacija i pomaka prikazan je na slici 4.5. [20]

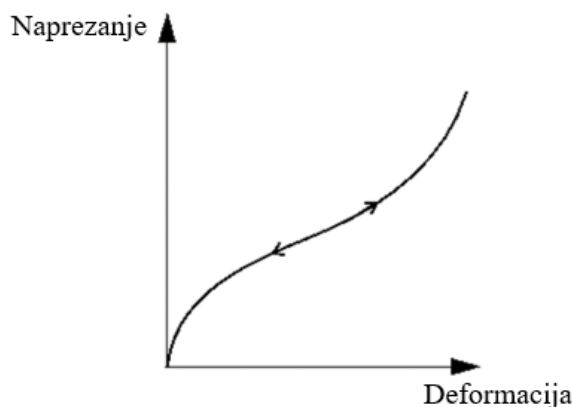


**Slika 4.5. Geometrijska nelinearnost**

#### **4.5.2. Materijalna nelinearnost**

Nelinearnost materijala uključuje nelinearno ponašanje materijala na temelju trenutne deformacije, povijesti deformacija, brzine deformacije, temperature, tlaka itd. Metali imaju linearnu karakteristiku u elastičnom području, a u plastičnom području nelinearnu karakteristiku gdje se javljaju nepovratne deformacije, no elastomeri i slični materijali imaju

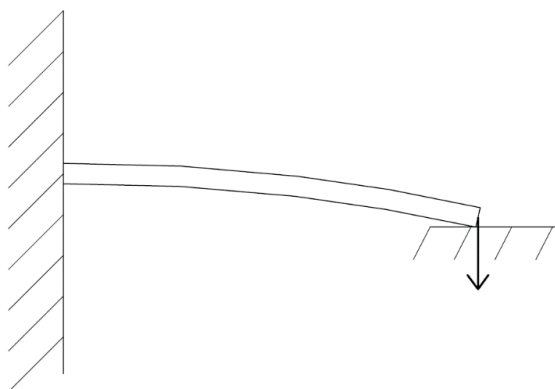
nelinearno karakteristiku i u elastičnom području. Primjer nelinearnog materijala prikazan je na slici 4.6. [20]



Slika 4.6. Materijalna nelinearnost gumenog materijala

#### 4.5.3. Nelinearnost kontakta i rubnih uvjeta

Nelinearnost rubnih uvjeta se javlja kada se oni mijenjaju tijekom analize, tj. kada dolazi do kontakta. Nakon kontakta, kao što je prikazano na slici 4.7., dolazi do trenutnih i naglih promjena u rubnim uvjetima te tako i do trenutnih i naglih promjena u odzivu konstrukcije. [20]

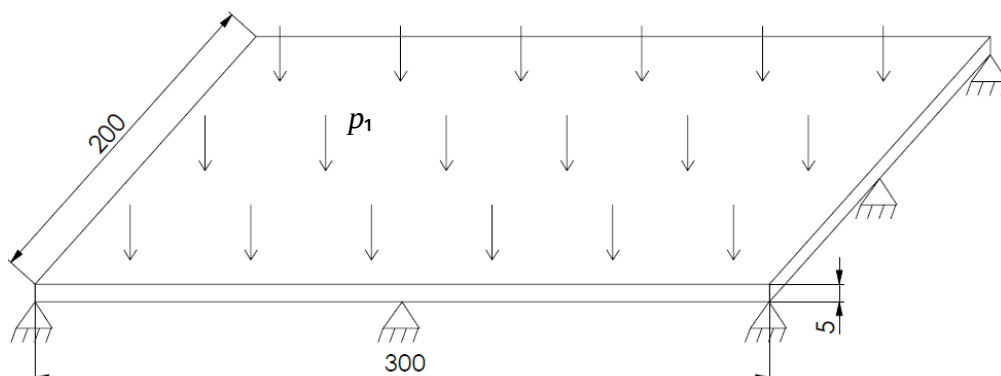


Slika 4.7. Kontaktna nelinearnost

#### 4.6. Verifikacija primjenjenih konačnih elemenata

Potrebno je verificirati konačne elemente koji će se koristiti u kasnijim analizama. Jednostavan primjer problema sličan kasnijim analizama koji se može riješiti analitički nije bilo moguće naći. Stoga su se konačni elementi verificirali na običnoj slobodno oslonjenoj pravokutnoj ploči koja je opterećena konstantnim tlakom. Zareza na ploči nema jer se onda zadatak ne bi mogao riješiti jednostavno analitički.

Za slobodno oslonjenu pravokutnu ploču te opterećenu konstantnim tlakom prema slici 4.8. potrebno je odrediti maksimalni progib ploče.



Slika 4.8. Slobodno oslonjena pravokutna ploča opterećena konstantnim tlakom  $p_1$

Tlak  $p_1$  koji djeluje na cijelu gornju površinu ploče iznosi 50000 Pa. Materijal ploče je konstrukcijski čelik S235JR te modul elastičnosti ploče iznosi  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ , a Poissonov faktor  $\nu = 0,3$ .

Analitički izračun maksimalnog progiba ploče se izvršio prema tablici na slici 4.9. preuzetoj iz *Inženjerskog priručnika* [21].

| SILE, MOMENTI I POMACI ZA SLOBODNO OŠLONJENE PRAVOKUTNE PLOČE<br>OPTEREĆENE KONSTANTNIM POVRŠINSKIM OPTEREĆENJEM        |                              |                    |                    |                  |                  |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|-------------------|
| <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"><math>\nu = 0,30</math></div> </div> |                              |                    |                    |                  |                  |                   |
| $a/b$                                                                                                                   | $w_1 / \frac{p_0 a^4}{Eh^3}$ | $M_{x1} / p_0 a^2$ | $M_{y1} / p_0 b^2$ | $R_{x2} / p_0 a$ | $R_{y3} / p_0 b$ | $R_{04} / p_0 ab$ |
| 1,00                                                                                                                    | -0,044 3                     | -0,047 8           | -0,047 8           | 0,420            | 0,420            | -0,065            |
| 1,10                                                                                                                    | -0,036 3                     | -0,040 8           | -0,055 3           | 0,399            | 0,440            | -0,064            |
| 1,20                                                                                                                    | -0,029 8                     | -0,034 8           | -0,062 6           | 0,377            | 0,455            | -0,063            |
| 1,30                                                                                                                    | -0,024 4                     | -0,029 8           | -0,069 3           | 0,357            | 0,468            | -0,062            |
| 1,40                                                                                                                    | -0,020 1                     | -0,025 8           | -0,075 3           | 0,337            | 0,478            | -0,059            |
| 1,50                                                                                                                    | -0,016 6                     | -0,022 2           | -0,081 2           | 0,320            | 0,486            | -0,057            |
| 1,60                                                                                                                    | -0,013 8                     | -0,019 3           | -0,086 2           | 0,303            | 0,491            | -0,055            |
| 1,70                                                                                                                    | -0,011 6                     | -0,016 8           | -0,090 8           | 0,287            | 0,496            | -0,053            |
| 1,80                                                                                                                    | -0,009 7                     | -0,014 8           | -0,094 8           | 0,273            | 0,499            | -0,050            |
| 1,90                                                                                                                    | -0,008 2                     | -0,013 0           | -0,098 5           | 0,260            | 0,502            | -0,048            |
| 2,00                                                                                                                    | -0,006 9                     | -0,011 6           | -0,101 7           | 0,248            | 0,503            | -0,046            |

Slika 4.9. Tablica za izračun progiba slobodno oslonjene pravokutne ploče opterećene konstantnim tlakom [21]

U tablici se nalaze podaci za progib  $w_1$  u središnjoj točki ploče, označenoj s brojem 1 na slici.

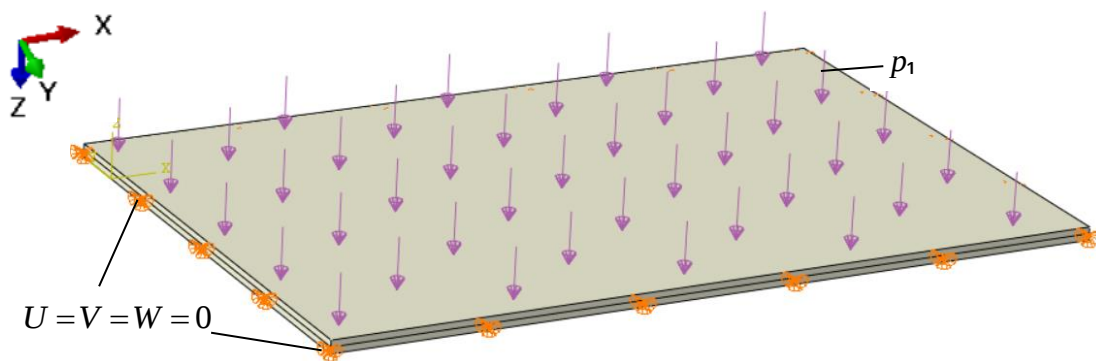
Odnos stranica ploče  $a/b$  iz verifikacijskog primjera je 300/200, tj. 1,50. Stoga očitana vrijednost iz tablice za taj odnos stranica jest:

$$w_1 / \frac{pa^4}{Eh^3} = -0,0166. \quad (4.1.)$$

Najveći progib koji se pojavljuje na sredini ploče prema (4.1.) iznosi:

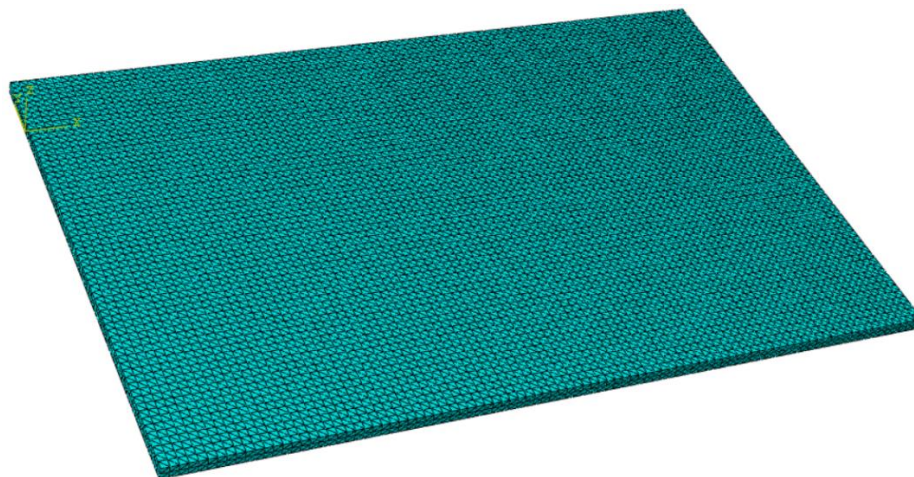
$$w_1 = -0,0166 \cdot \frac{p \cdot a^4}{E \cdot h^3} = -0,0166 \cdot \frac{0,05 \cdot 300^4}{210000 \cdot 5^3} = -0,256 \text{ mm}. \quad (4.2.)$$

Kao što je navedeno prije u radu, koristili su se tetraedarski konačni elementi 2. reda. Numerička analiza je provedena u programskom paketu *Abaqus* te se ti elementi u programu zovu C3D10. Verifikacijski model pravokutne ploče na kojoj je izvršen numerički izračun maksimalnog progiba s zadanim rubnim uvjetima prikazana je na slici 4.10.



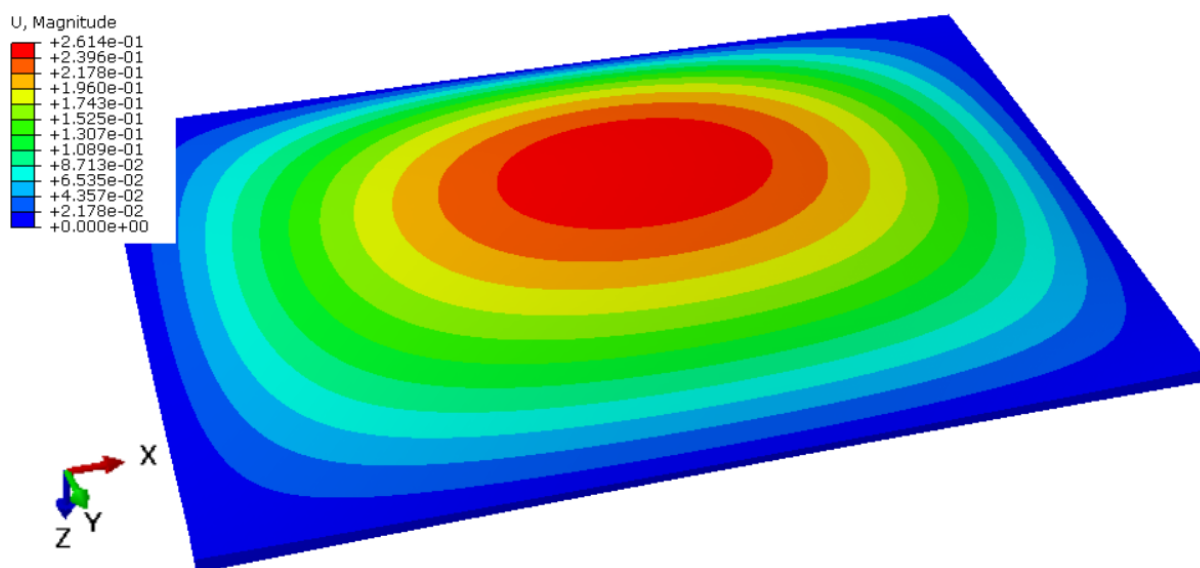
Slika 4.10. Verifikacijski model s rubnim uvjetima

Verifikacijski model diskretiziran s 142117 konačnih elemenata prikazan je na slici 4.11.



Slika 4.11. Diskretizirani verifikacijski model

Raspodjela pomaka po verifikacijskom modelu u mm s iznosom najvećeg progiba koji se nalazi na sredini modela prikazana je na slici 4.12.



Slika 4.12. Raspodjela pomaka po verifikacijskom modelu [mm]

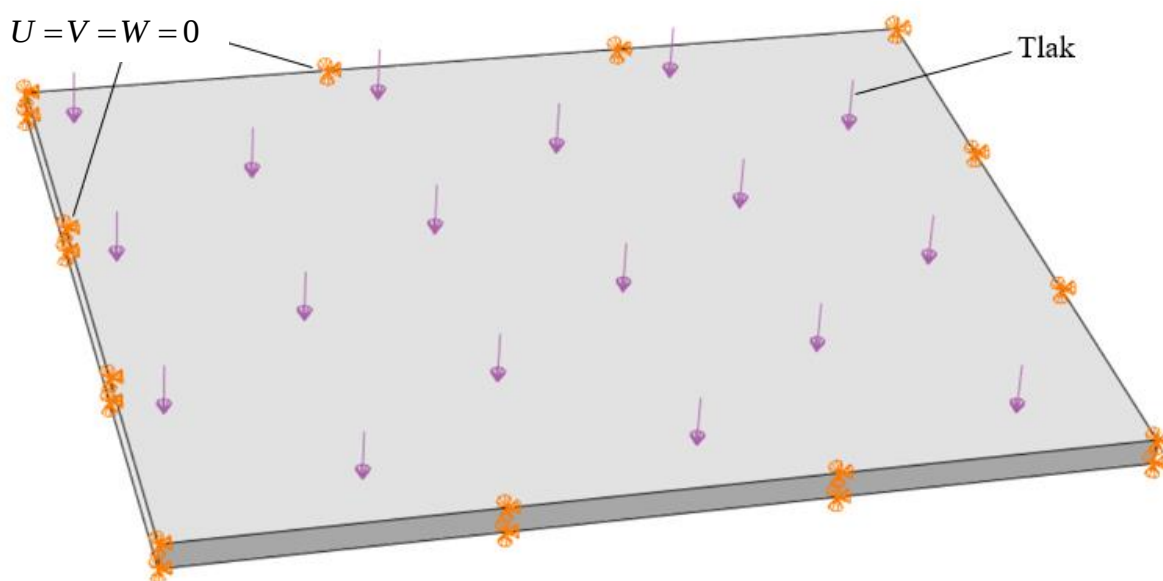
Maksimalni progib je u ovom slučaju ujedno i najveći pomak u smjeru osi z. Maksimalni progib koji se dobije numeričkim proračunom u programskom paketu iznosi  $w = 0,2614$  mm.

Razlika između numeričkog i analitičkog proračuna je 2,1 %, što je prihvatljivo odstupanje, stoga se tetraedarski konačni elementi 2. reda mogu koristiti za analize u ovom radu. Primjenom heksaedarskih konačnih elemenata bi se dobili precizniji rezultati i sa znatno manjim brojem elemenata no zbog komplicirane geometrije modela u kasnijim analizama takvi elementi se ne mogu koristiti.

## 5. KONCEPTI I RJEŠENJA

Analize su provedene na modelu koji predstavlja izrezani manji dio poklopca kućišta baterije uz zadane rubne uvjete prikazane na slici 5.1. Pomaci u svim smjerovima su ograničeni na krajevima ploče, a konstantni tlak djeluje na cijelu gornju plohu pločice. Materijal ploče je PAGF-13 definiran u poglavlju 2.2. *Materijal kućišta*. Materijal je modeliran kao plastičan stoga je analiza u nelinearnom području te je zbog toga u koraku *Step* unutar programskog paketa aktivirana opcija *NLGEOM*. Analizirali su se različiti dizajni oslabljenja te zatim uspoređivali kako bi se na kraju izabralo najbolje rješenje. Koristila su se dva različita tehnološka postupka pri izradi oslabljenja. Prvo su analizirani dizajni izrađeni tehnikom odvajanja čestica, a zatim i dizajni izrađeni injekcijskim prešanjem. U radu su prikazani i uspoređeni samo oni dizajni oslabljenja koji su pokazivali bolje rezultate od ostalih.

Vrijednosti naprezanja su očitana iz integracijskih točaka elemenata kao što je objašnjeno u poglavlju 4.4.1. o tetraedarskim konačnim elementima u programskom paketu *Abaqus*.

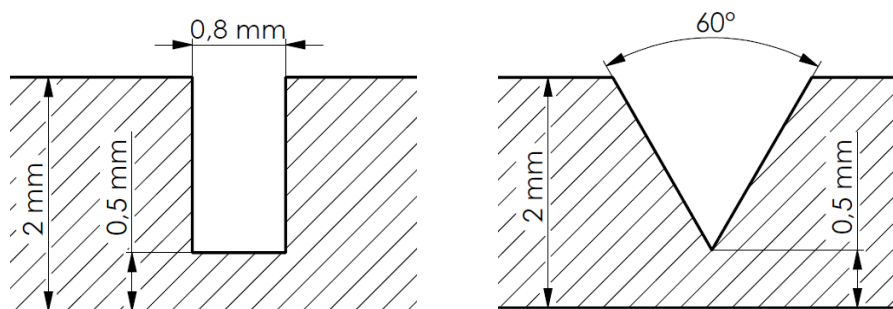


Slika 5.1. Rubni uvjeti

### 5.1. Dizajni izrađeni odvajanjem čestica

Svi dizajni su analizirani u istim uvjetima. Tlak kojim su opterećeni je 0,05 MPa, temperatura je 20°C, minimalna debljina stanjenog dijela je 0,5 mm te aproksimativna veličina konačnih

elementa na najkritičnijem području je 0,2 mm. Pri izradi tehnikom odvajanja čestica koristilo se svrdlo za glodanje promjera 0,8 mm i svrdlo s vrhom od  $60^\circ$ . Pritom su utori bili oblika i dimenzija prikazanim na slici 5.2. Utori su pojednostavljeni radi lakšeg promrežavanja konačnim elementima, kutovi utora su za potrebe ovih analiza i usporedbi bili oštri ili pod pravim kutom te su se tek kasnije nakon odabranog najboljeg rješenja dodijelili radijusi za konačnu analizu.

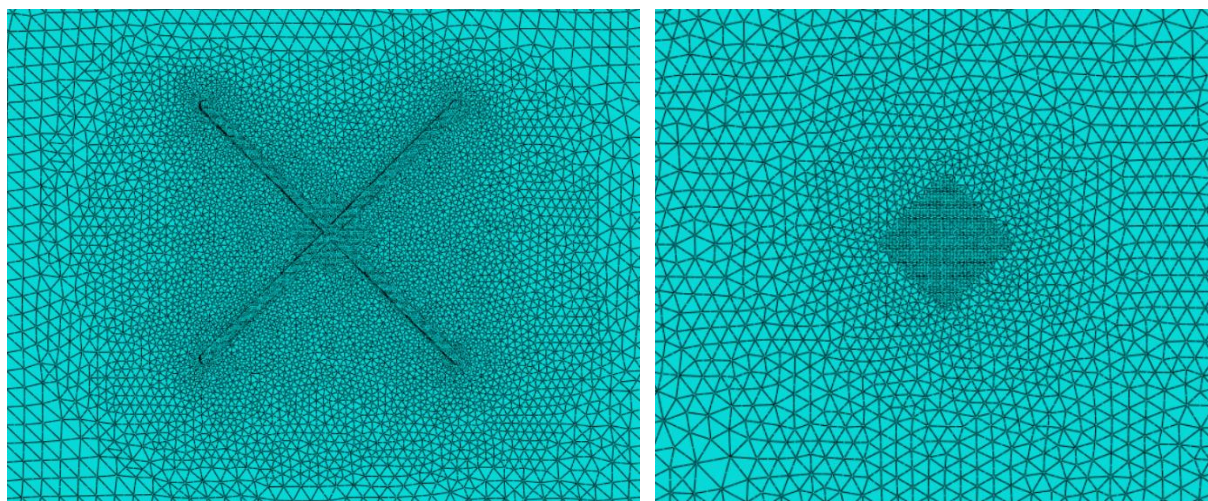


Slika 5.2. Utor izrađen svrdlom promjera 0,8 mm (lijevo) i svrdlom s vrhom od  $60^\circ$  (desno)

#### 5.1.1. Položaj oslabljenja

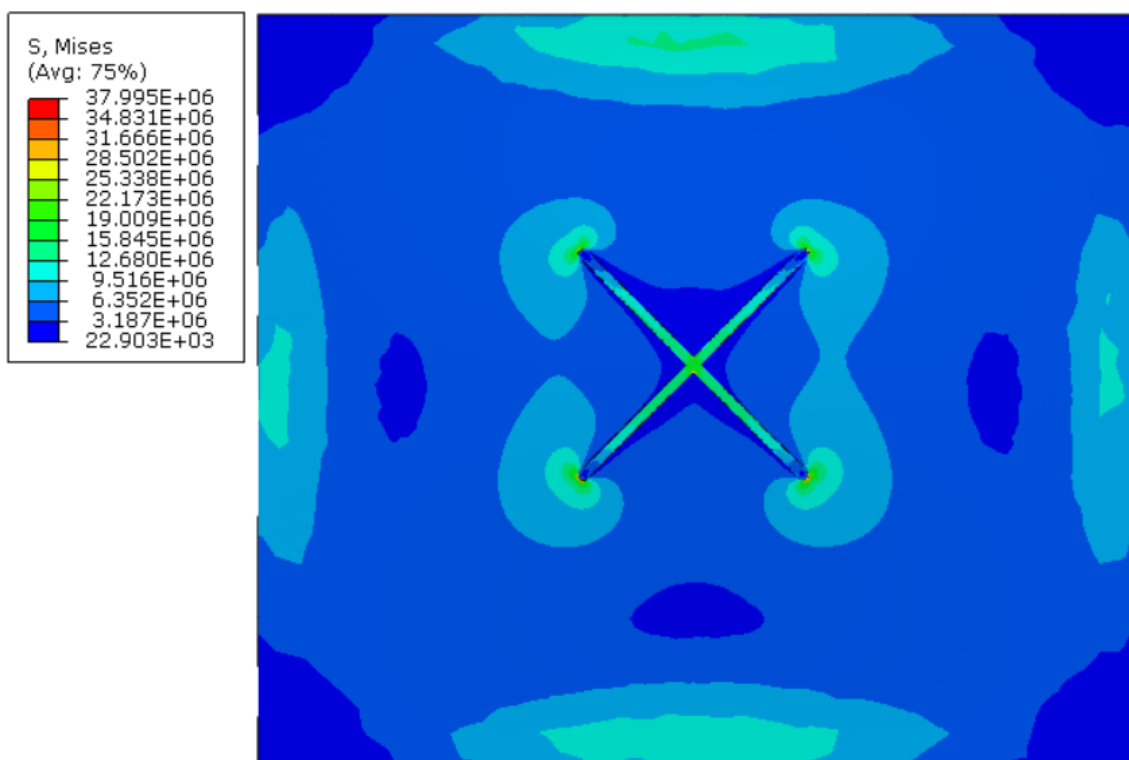
Ponajprije se odredio sami položaj oslabljenja, tj. hoće li oslabljenje biti s vanjske strane ili s unutarnje strane poklopca kućišta. Osnovni dizajn zareza s kojim je započela numerička analiza je dizajn u obliku križa. Križ je duljine 32 mm.

Mreža konačnih elemenata na najkritičnijem području s jedne i druge strane modela prikazana je na slici 5.3.

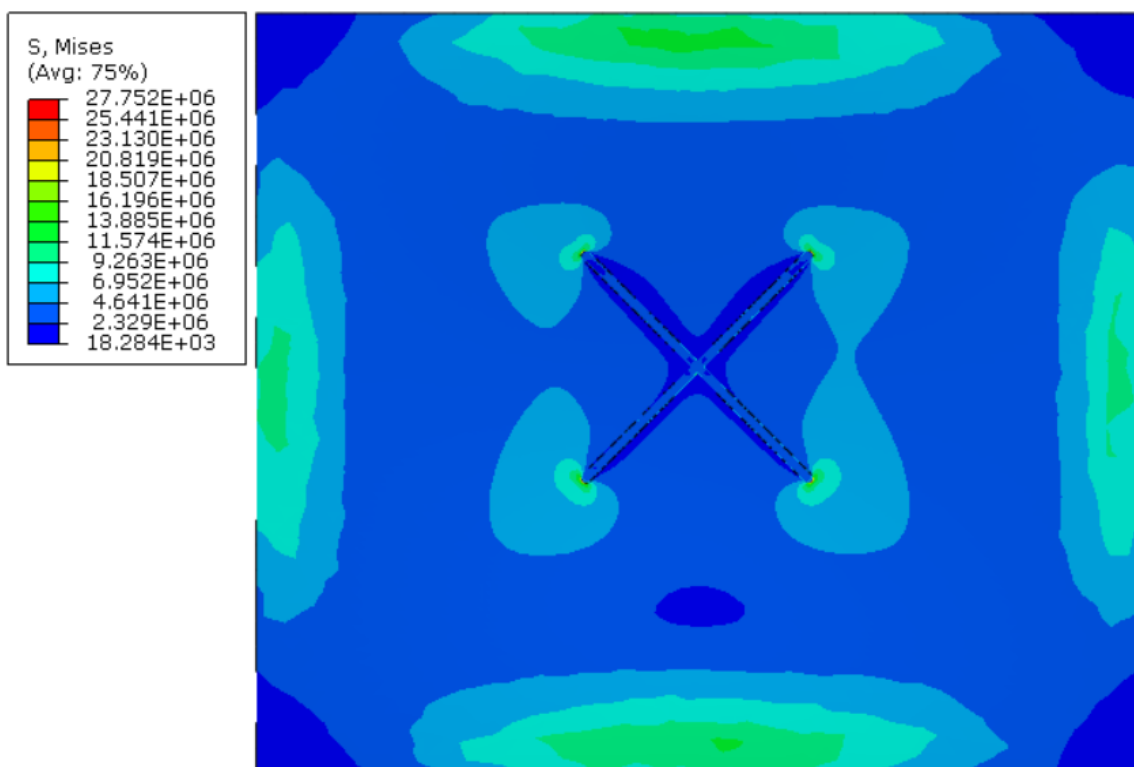


Slika 5.3. Mreža konačnih elemenata za dizajn u obliku križa

Na slikama 5.4. i 5.5. prikazane su raspodjele naprezanja po modelima sa zasebnim legendama u Pa.

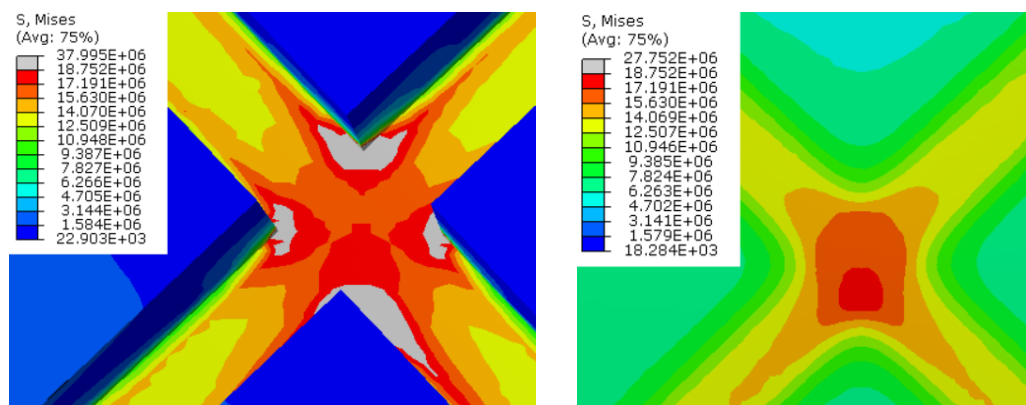


Slika 5.4. Dizajn s vanjske strane poklopca - raspodjela naprezanja po modelu u Pa



Slika 5.5. Dizajn s unutarnje strane poklopca - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

Najveće naprezanje za oba dizajna se pojavljuje na vanjskom radijusu na vrhu križa no to se događa zbog načina interpoliranja rezultata naprezanja u programskom paketu te to nije područje gdje će najvjerojatnije doći do pucanja dizajna stoga su se usporedile sredine križa oba dizajna s jednakim legendama na slici 5.6. Sredina križa je kritično područje te najpoželjnije mjesto za pojavljivanje pukotine. Kao što se vidi na slici 5.6. (desno), kada je dizajn s unutarnje strane poklopca najveća naprezanja se pojavljuju na stražnjoj strani zarezanog križa. Točnije iznose maksimalnih naprezanja u dizajnim isčitavamo iz integracijskih točaka stoga su ti iznosi uspoređeni u tablici 5.1.



Slika 5.6. Položaj najvećeg naprezanja za dizajn s vanjske (lijevo) i s unutarnje strane poklopca (desno) u Pa

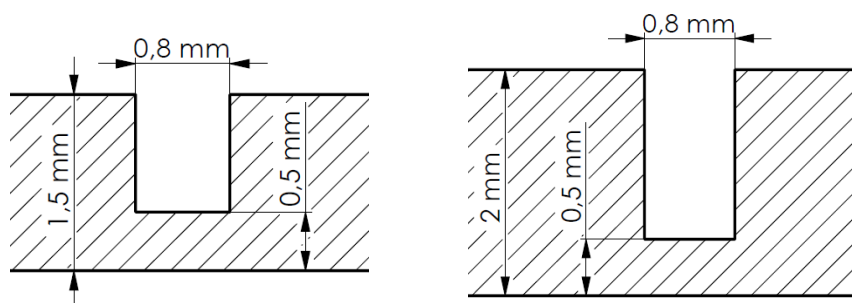
Tablica 5.1. Usporedba dizajna s vanjske i dizajna s unutarnje strane

|                                           | S vanjske strane | S unutarnje strane | Razlika [%] |
|-------------------------------------------|------------------|--------------------|-------------|
| Najveće naprezanje<br>$\sigma/\text{MPa}$ | 38,02            | 20,06              | 47,2        |
| Najveći pomak<br>$\delta/\text{mm}$       | 0,72             | 0,55               | 23,6        |

Tehnološki i estetski prihvatljivije bi bilo da je zarez s unutarnje strane poklopca. Međutim, značajna je razlika u najvećem naprezanju, dizajn s vanjske strane ima za 47,2 % veće naprezanje na najkritičnijem području, a to je na sredini križa. Na slici 5.6. (desno) se vidi da u slučaju dizajna s unutarnje strane poklopca najveća naprezanja se pojavljuju sa stražnje strane zarezanog križa te su značajno nižeg iznosa zbog manjeg zareznog djelovanja s te strane dizajna. Zatim, kao što se vidi na slici 5.4. i sama raspodjela naprezanja po cijelom modelu je bolja kada je zarez s vanjske strane poklopca, veća naprezanja se pojavljuju samo na području zarezanog križa. Najveći pomak je također bitno veći kod dizajna s vanjske strane što ukazuje da je dizajn s unutarnje strane ograničen i s mogućnošću deformiranja.

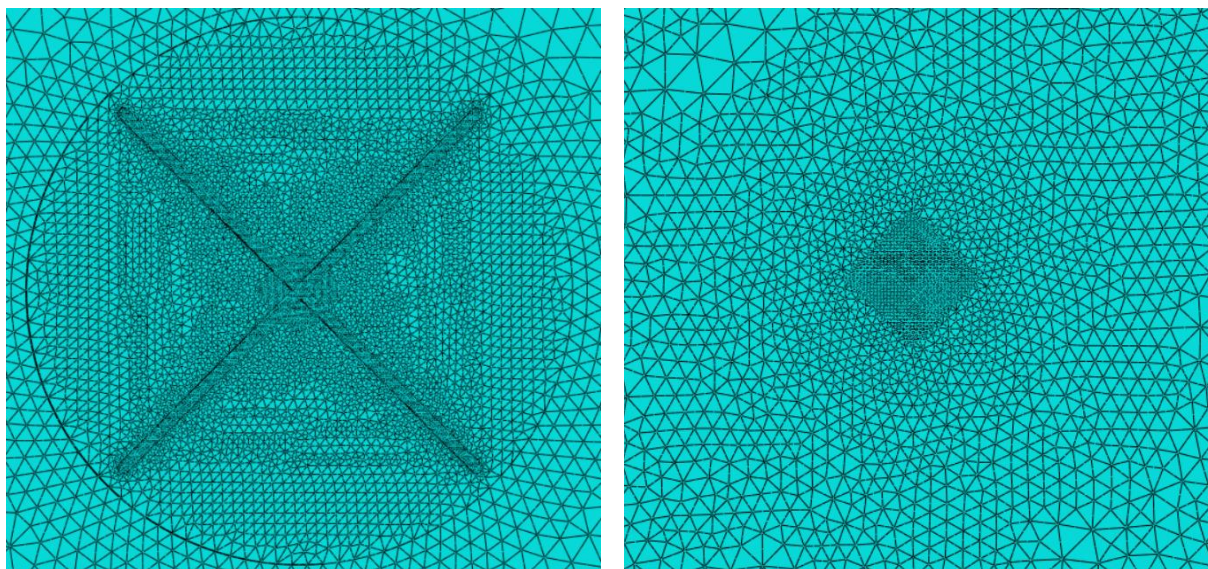
### 5.1.2. Kružno udubljenje na poklopcu oko zareza

Nakon što je odlučeno da će dizajn biti s vanjske strane poklopca, ispitala se potreba kružnog udubljenja na području oslabljenog dijela poklopca. Svrha ovog udubljenja je da koncentrira naprezanje na traženom dijelu poklopca, tj. na mjestu gdje se radilo „oslabljenje“, te se slična ideja pojavljuje u patentu US8193770B2 [14]. Kružno udubljenje je s iste strane poklopca kao i zarezi iz tehnoloških razloga. Udubljenje se izrađuje tehnikom odvajanja čestica kao i sami zarez. Udubljenje je promjera 35 mm i dubine 0,5 mm stoga je poklopac na tom dijelu debljine 1,5 mm pa je dubina zareza 1 mm prikazano na slici 5.7. (lijevo). Dok je na modelu bez udubljenja dubina zareza 1,5 mm kako bi se ostvarila ista minimalna debljina stanjenog dijela od 0,5 mm, prikazano na slici 5.7. (desno).



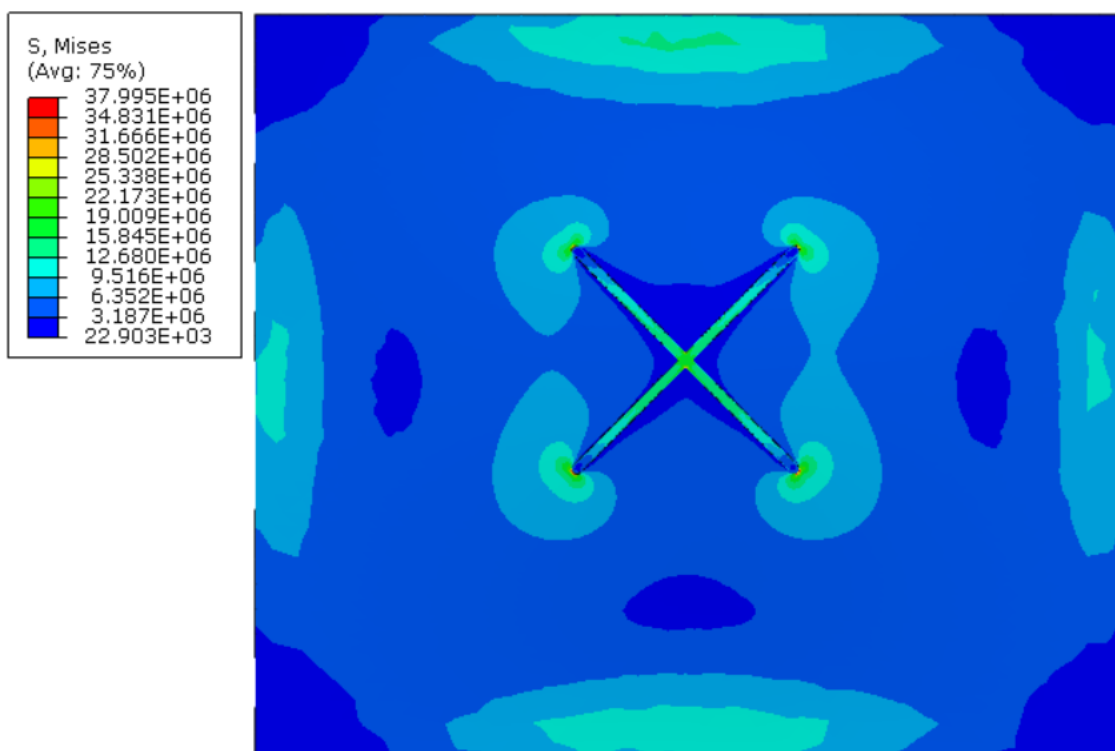
Slika 5.7. Utor zareza dizajna s udubljenjem (lijevo) i bez udubljenja (desno)

Mreža konačnih elemenata s prednje i sa stražnje strane modela za dizajn s kružnim udubljenjem na poklopcu oko zareza prikazana je na slici 5.8.

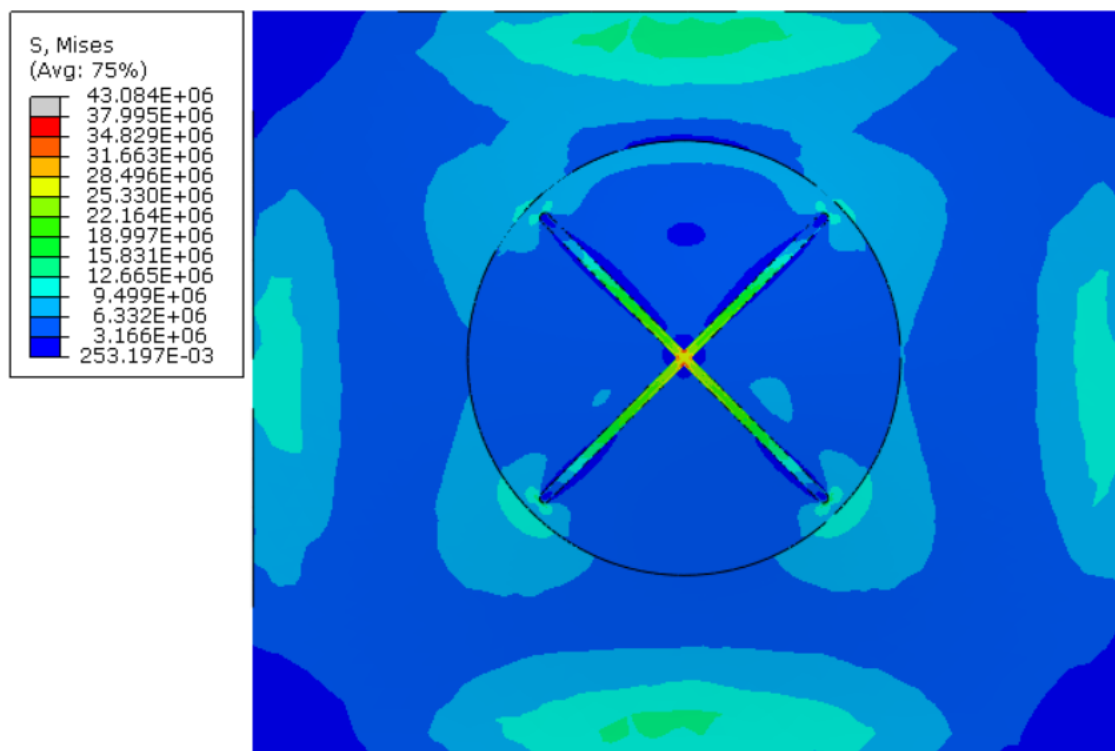


Slika 5.8. Mreža konačnih elemenata za dizajn s kružnim udubljenjem

Raspodjela naprezanja s jednakim legendama u Pa po modelu za oba dizajna prikazana je na slikama 5.9. i 5.10.

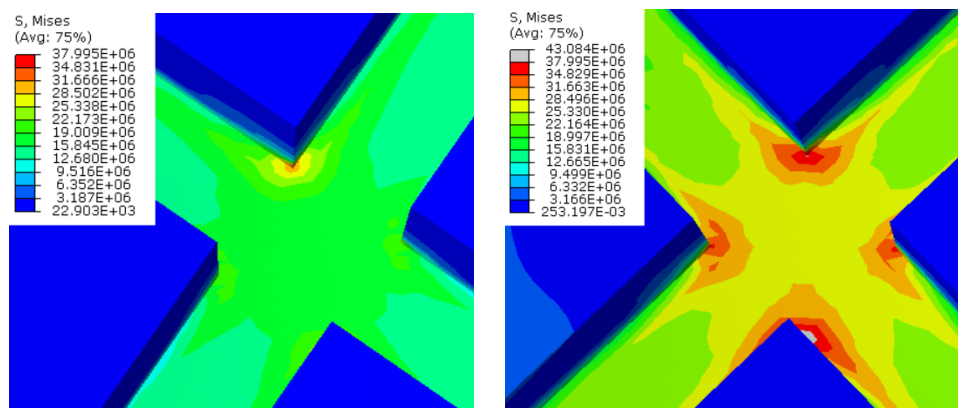


Slika 5.9. Dizajn bez udubljenja - raspodjela naprezanja po modelu u Pa



Slika 5.10. Dizajn s udubljenjem - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

Na slici 5.11. prikazane su sredine križa oba dizajna, što je traženo mjesto pucanja dizajna, s jednakim legendama. Za dizajn bez udubljenja najveće naprezanje prikazuje na vanjskom radijusu na vrhu križa zbog već spomenute programske pogreške pri izračunu rezultata, a za dizajn s udubljenjem najveće naprezanje je na sredini križa.



Slika 5.11. Sredina dizajna bez udubljenja (lijevo) i s udubljenjem (desno) u Pa

Tablica 5.2. Usporedba dizajna bez i s kružnim udubljenjem oko zareza

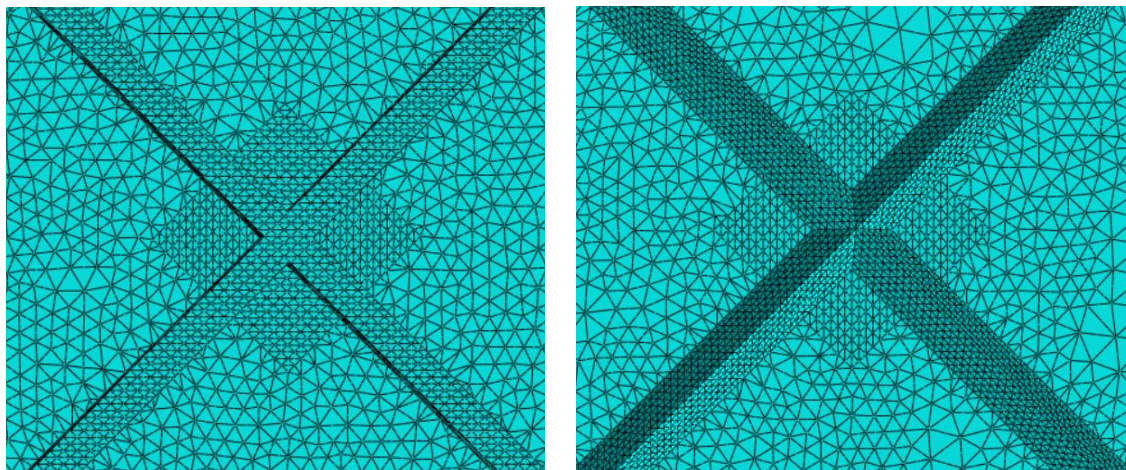
|                                           | Dizajn bez udubljenja | Dizajn s udubljenjem | Razlika [%] |
|-------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------|
| Najveće naprezanje<br>$\sigma/\text{MPa}$ | 38,02                 | 45,72                | 16,8        |
| Najveći pomak<br>$\delta/\text{mm}$       | 0,72                  | 0,96                 | 25          |

Na slikama 5.9. i 5.10. je vidljivo da kružno udubljenje povećava najveće naprezanje na području oslabljenja poklopca. Značajni je porast najvećeg naprezanja, točnije za 16,8 %, te također značajno povećava koncentraciju naprezanja na sredini križa gdje je i najpoželjnije da se pojavi pukotina, prikazano na slici 5.11. Zbog same preciznosti glodanja uvijek je bolje da je manja dubina glodanja stoga je i to jedna od prednosti kružnog udubljenja. Došlo je do značajnijeg skoka i kod najvećeg pomaka no to je posljedica stanjenja poklopca za 0,5 mm oko samog zareza. Dalje u analizu se išlo s dizajnom s kružnim udubljenjem oko zareza.

### 5.1.3. Odabir svrdla

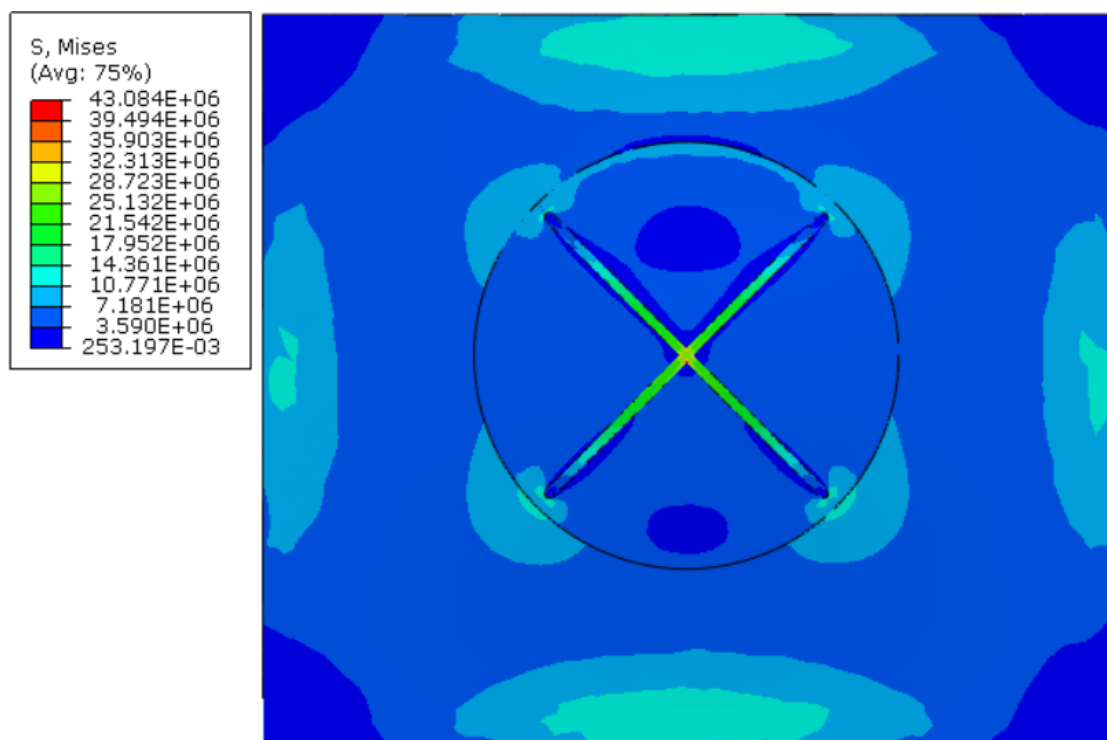
Odabir svrdla za glodanje se vršio između svrdla promjera 0,8 mm koji ostavlja ravno dno utora te svrdla s vrhom od 60°, a oblici utora oba svrdla prikazani su prije na slici 5.2. Pri ovoj

usporedbi nisu se dodijeljivali radijusi u kutovima utora zareza nego su se uzimali kao da su pravi ili oštri kutovi. Minimalna debljina stanjenjog dijela je i dalje 0,5 mm te će se uspoređivati na dizajnu u obliku križa. Detalj mreže konačnih elemenata na najkritičnijem području za oba modela prikazan je na slici 5.12.

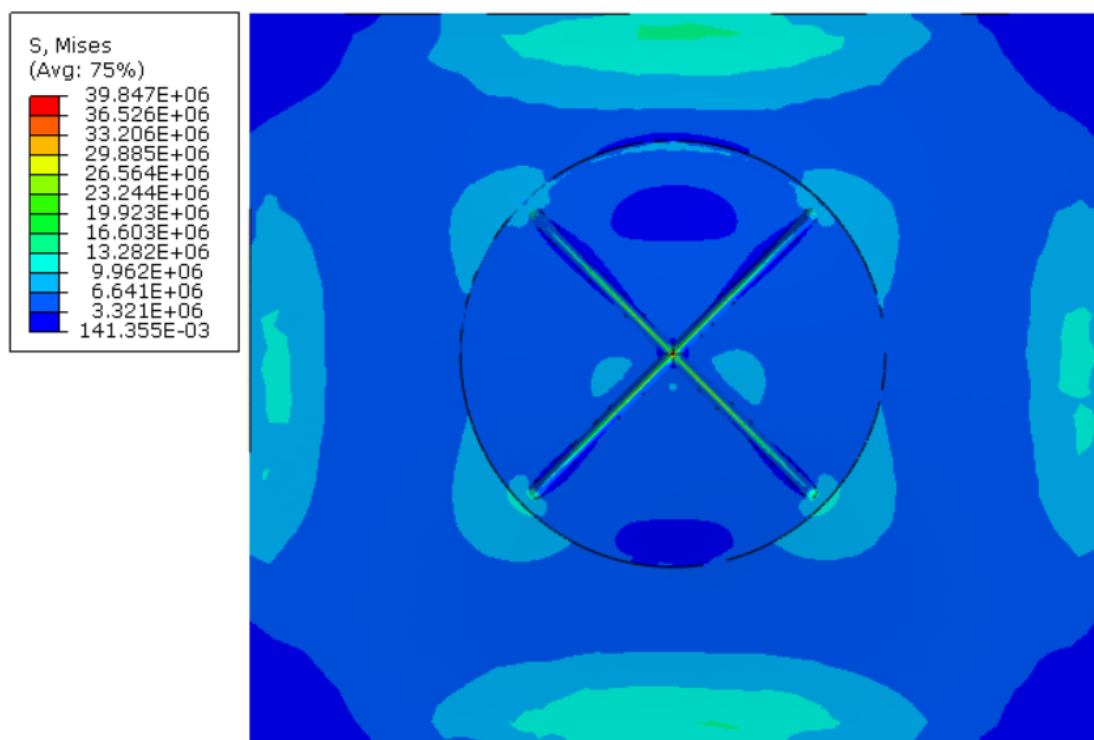


**Slika 5.12. Mreža konačnih elemenata za dizajn izrađen svrdlom promjera 0,8 mm (lijevo) i dizajn izrađen svrdlom s vrhom od 60 stupnjeva (desno)**

Raspodjele naprezanja po modelu sa zasebnim legendama u Pa za oba dizajna prikazane su na slikama 5.13. i 5.14.

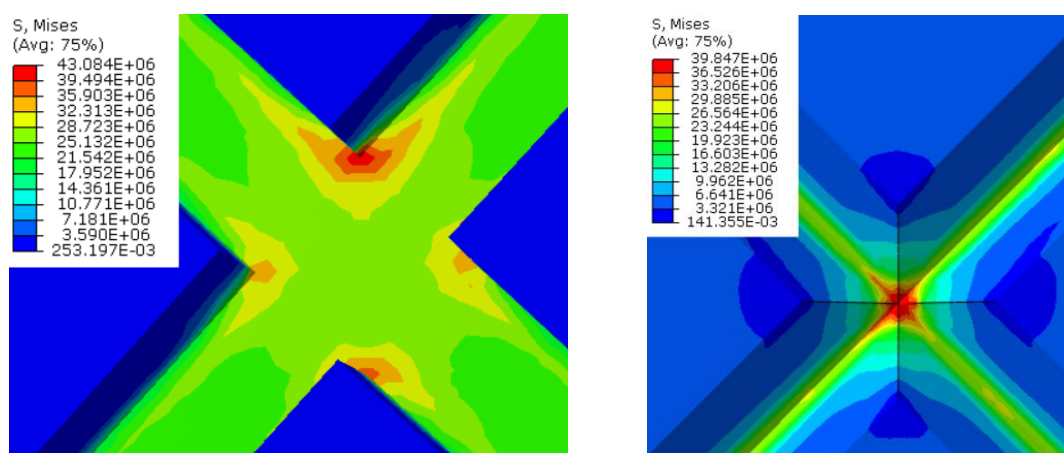


**Slika 5.13. Dizajn izrađen svrdlom promjera 0,8 mm - raspodjela naprezanja po modelu u Pa**



Slika 5.14. Dizajn izrađen svrdlom s vrhom od  $60^\circ$  - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

Na slici 5.15. prikazano je područje s najvećim naprezanjem za dizajn izrađen svrdlom promjera 0,8 mm (lijevo) i za dizajn izrađen svrdlom s vrhom od  $60^\circ$  (desno). Najveća naprezanja koja se pojavljuju u čvorovima konačnih elemenata te koja su prikazana u legendama na slikama se ne podudaraju s iznosima najvećih naprezanja u integracijskim točkama konačnih elemenata. Do te razlike dolazi zbog načina interpoliranja rezultata naprezanja u programskom paketu što je već objašnjeno u poglavlju 4.4.1. U radu se uspoređuju iznosi najvećih naprezanja u integracijskim točkama konačnih elemenata te su oni prikazani u tablici 5.3.



Slika 5.15. Položaj najvećeg naprezanja za dizajn izrađen svrdlom promjera 0,8 mm (lijevo) i s vrhom od  $60^\circ$  (desno) u Pa

**Tablica 5.3. Usporedba dizajna izrađenim sa svrdlom promjera 0,8 mm i s vrhom od 60°**

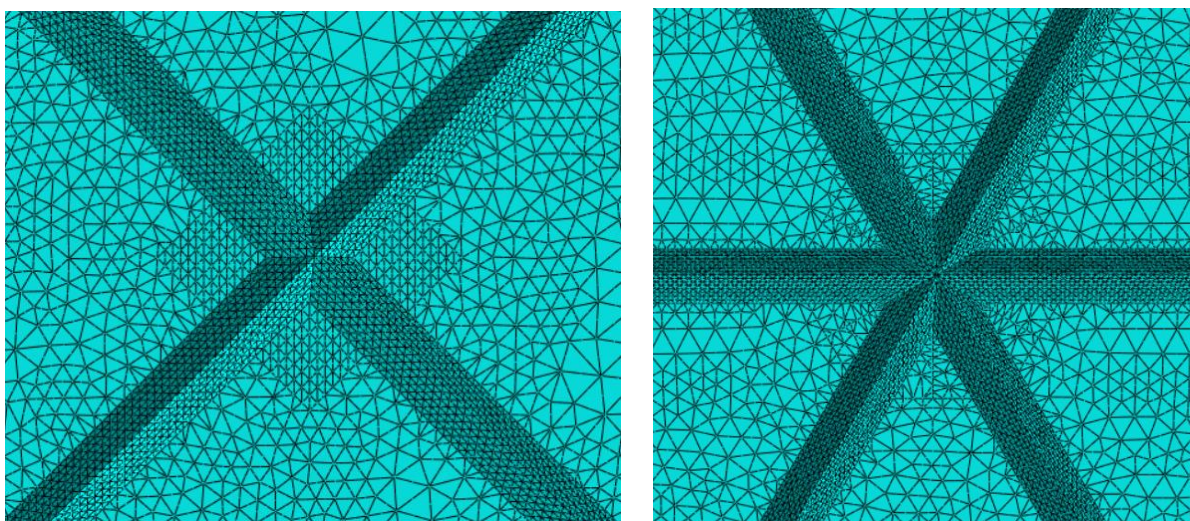
|                                     | 0,8 mm svrdlo | 60° svrdlo | Razlika [%] |
|-------------------------------------|---------------|------------|-------------|
| Najveće naprezanje<br>$\sigma$ /MPa | 45,72         | 47,22      | 3,2         |
| Najveći pomak<br>$\delta$ /mm       | 0,96          | 0,85       | 11,5        |

Odabir svrdla za glodanje s vrhom od 60° povećava najveće naprezanje za 3,2 % u odnosu na dizajn izrađen svrdlom promjera 0,8 mm s ravnim dnom. Povećanje nije značajno no ipak je porast naprezanja što ga čini boljim odabirom za daljnju analizu. Područje najvećeg naprezanja ostaje u sredini križa kao što se vidi na slici 5.15., ali se sada mogućnost pucanja svodi u samo jednu točku, točno na sredini dizajna. Nadalje, još jedna prednost dizajna izrađenog svrdlom s vrhom od 60° je i najveći pomak koji je za 11,5 % manji.

#### 5.1.4. Dizajn „zvijezda“

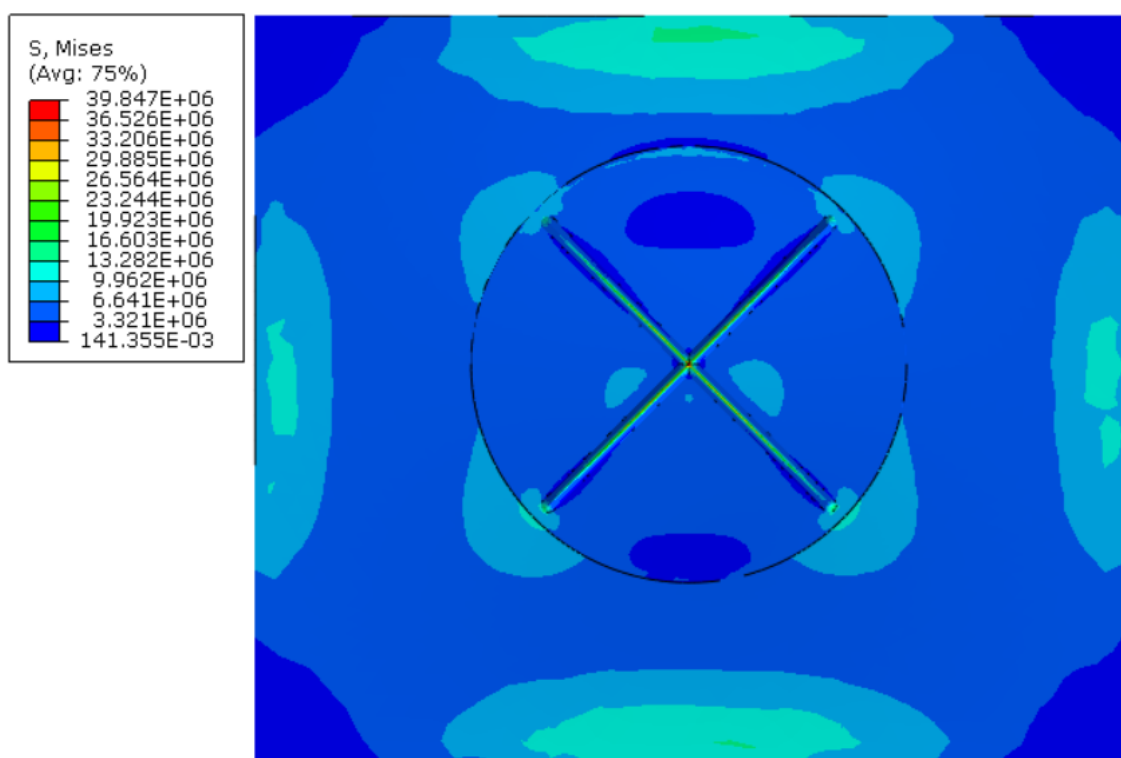
Nakon što je odabrano svrdlo za glodanje s vrhom od 60° slijedio je odabir najboljeg oblika oslabljenja. U radu su prikazani i međusobno uspoređeni samo oblici oslabljenja koji su davali bolje rezultate od drugih. Prvotno je uspoređen osnovni dizajn u obliku križa s dizajnom u obliku zvijezde.

Mreže konačnih elemenata na najkritičnijem području za oba dizajna prikazane su na slici 5.16.

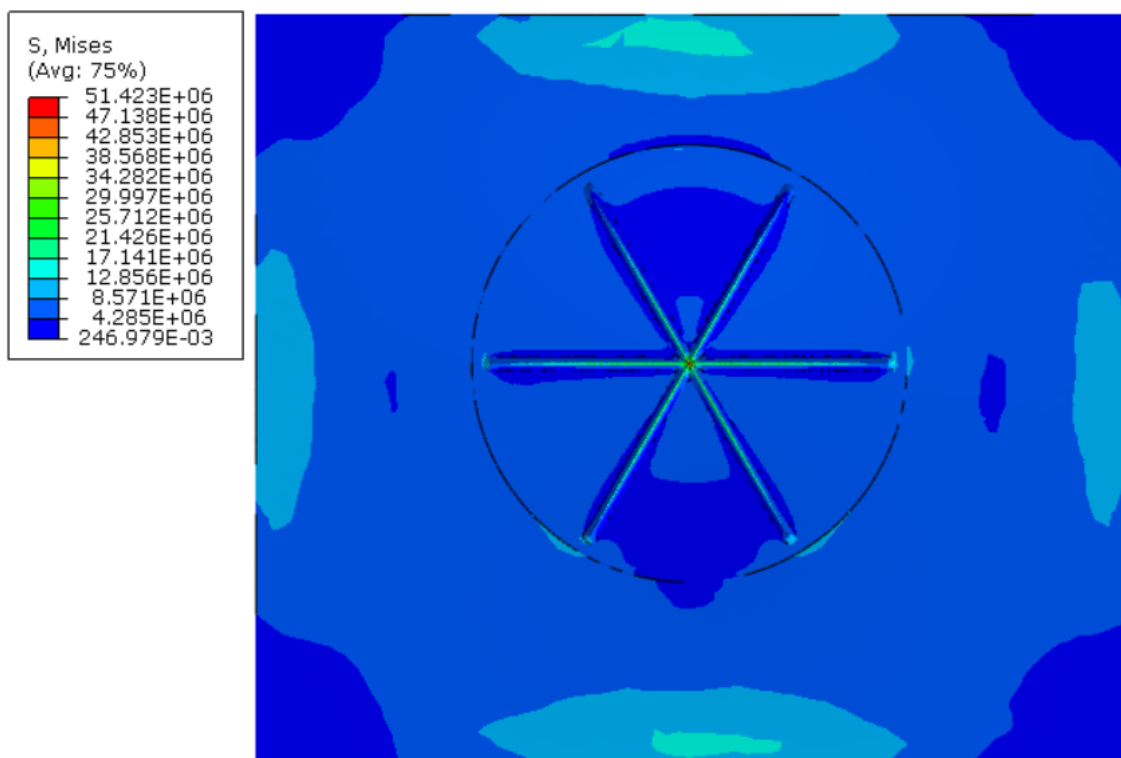


**Slika 5.16. Mreža konačnih elemenata za dizajn "križ" (lijevo) i dizajn "zvijezda" (desno)**

Raspodjela naprezanja po modelu za dizajn „križ“ u Pa prikazana je na slici 5.17., a raspodjela naprezanja po modelu u Pa za dizajn „zvijezda“ prikazana je na slici 5.18.

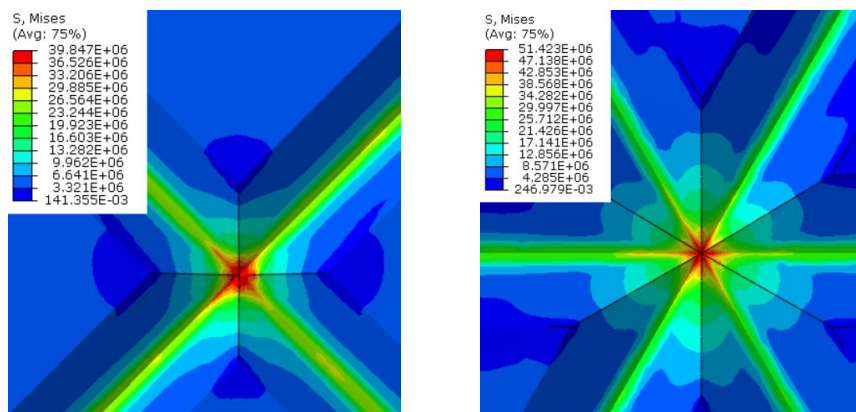


Slika 5.17. Dizajn "križ" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa



Slika 5.18. Dizajn "zvijezda" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

Detalji najopterećenijeg područja za oba dizajna prikazani su na slici 5.19. Zbog već spomenutog načina interpoliranja rezultata naprezanja u programskom paketu dizajn „križ“ na slici ima znatno manje najveće naprezanje nego u integracijskim točkama konačnih elemenata.



Slika 5.19. Položaj najvećeg naprezanja dizajna "križ" (lijevo) i dizajna "zvijezda" (desno) u Pa

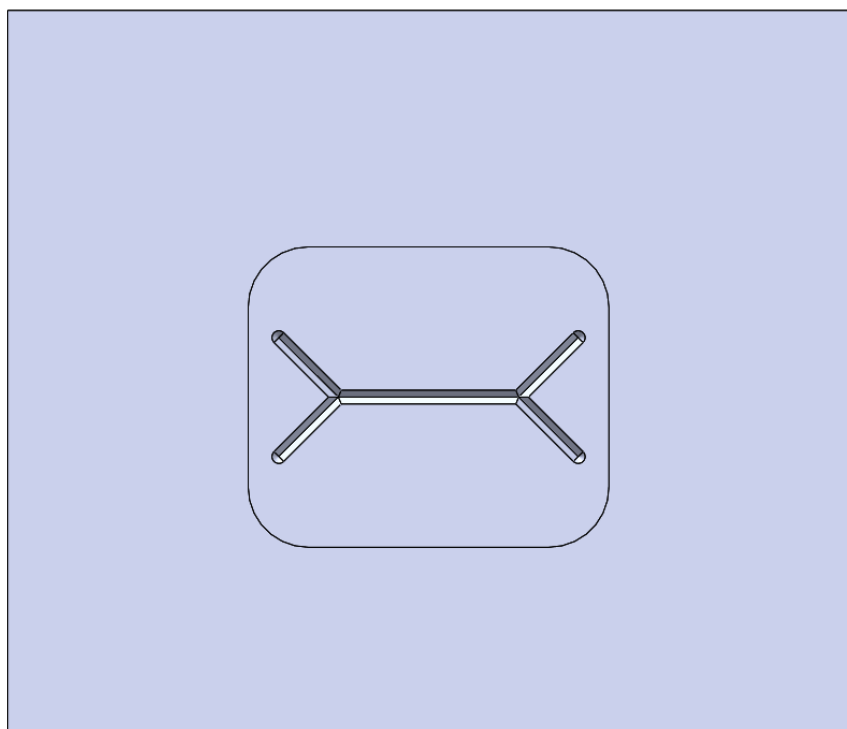
Tablica 5.4. Usporedba dizajna "križ" i dizajna "zvijezda"

|                                           | Dizajn „križ“ | Dizajn „zvijezda“ | Razlika [%] |
|-------------------------------------------|---------------|-------------------|-------------|
| Najveće naprezanje<br>$\sigma/\text{MPa}$ | 47,22         | 51,97             | 9,1         |
| Najveći pomak<br>$\delta/\text{mm}$       | 0,85          | 0,92              | 7,6         |

Dizajn „zvijezda“ povećava najveće naprezanje za 9,1 % u odnosu na dizajn „križ“. To je već značajnija razlika u naprezanju koja može pokriti isplativost izrade dizajna „zvijezde“ jer taj dizajn dovodi do većeg utroška materijala i više utrošenog vremena. Najveći pomak se povećao za 7,6 %, što nije značajni porast ukupnog pomaka te je prihvatljiv. Najopterećenija točka dizajna ostaje ista, a raspodjela naprezanja po cijelom modelu je nešto bolja za dizajn „zvijezda“ stoga se nakon analize i usporedbe u daljnju analizu nastavilo s dizajnom „zvijezda“.

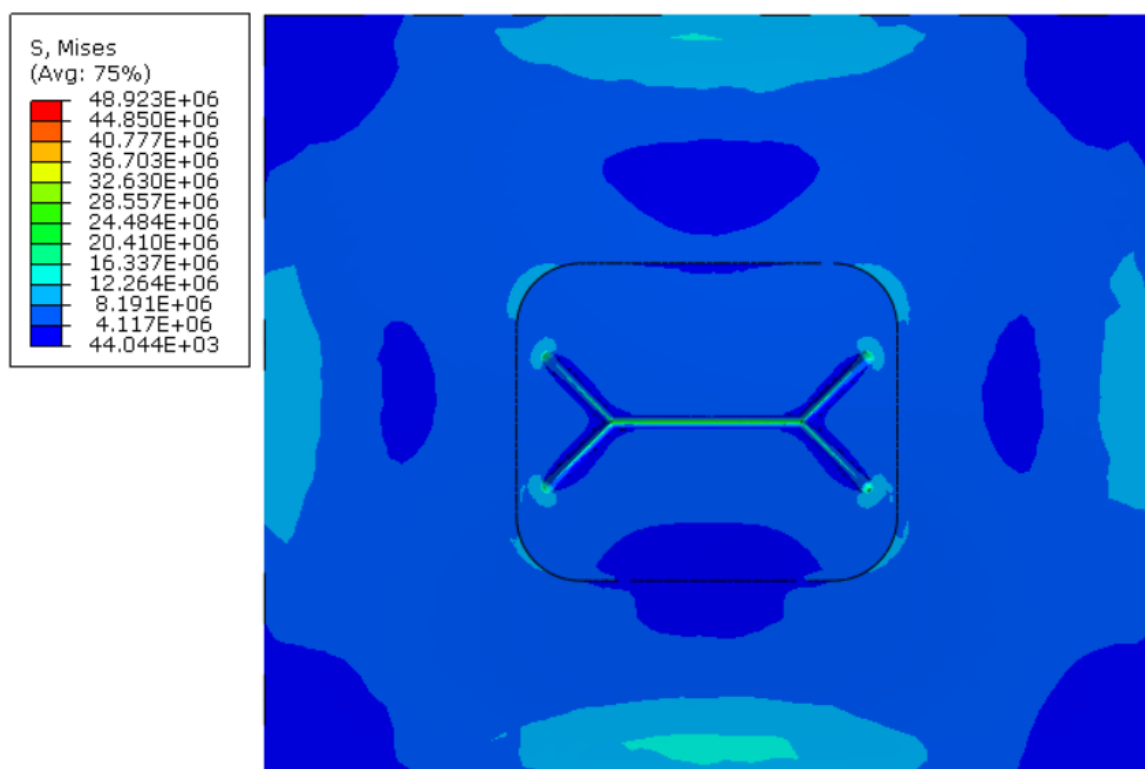
#### 5.1.5. Dizajn „I“

Nadalje se usporedio dizajn „zvijezda“ s dizajnom „I“. Dizajn „I“, prikazan na slici 5.20., je nešto drugačijeg oblika nego dosadašnji primjeri. Dizajn je sličan ideji oslabljenja iz patenta US8193770B2 [14] pa će se također moći vidjeti i je li ideja patenta dobra. Udubljenje oko dizajna ovdje neće biti kružnog oblika nego u obliku pravokutnika sa zaobljenim vrhovima dimenzija 30x25 mm, a dubina udubljenja je 0,5 mm kao i u prijašnjim slučajevima.



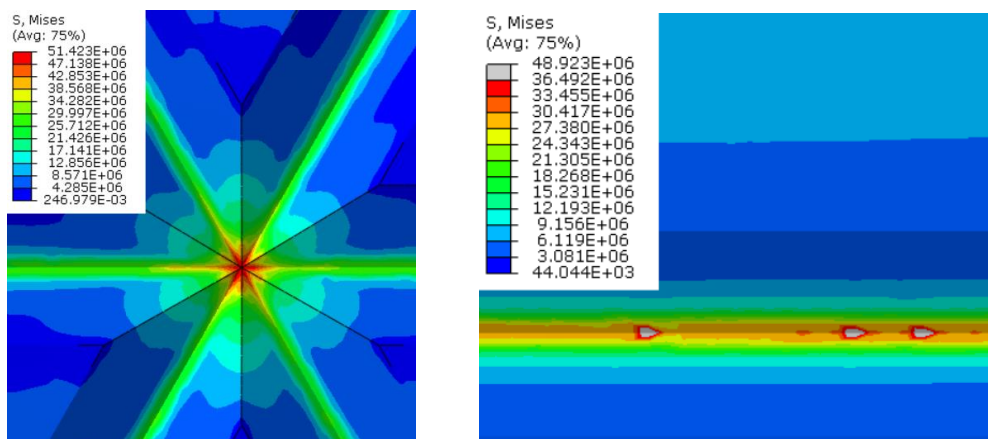
Slika 5.20. Model dizajna "I" u Solidworks-u

Na slici 5.21. prikazana je raspodjela naprezanja po modelu dizajna „I“ u Pa.



Slika 5.21. Dizajn "I" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

Na slici 5.22. prikazani su detalji područja s najvećim naprežanjem za dizajn „zvijezda“ (lijevo) i dizajn „I“ (desno), sa zasebnim legendama. Slika 5.22. (desno) ne pokazuje najbolje raspodjelu naprežanja te položaj maksimalnog naprežanja zbog programske pogreške pri izračunu naprežanja no da se zaključiti gdje je kritično područje.



Slika 5.22. Položaj najvećeg naprežanja dizajna "zvijezda" (lijevo) i dizajna "I" (desno) u Pa

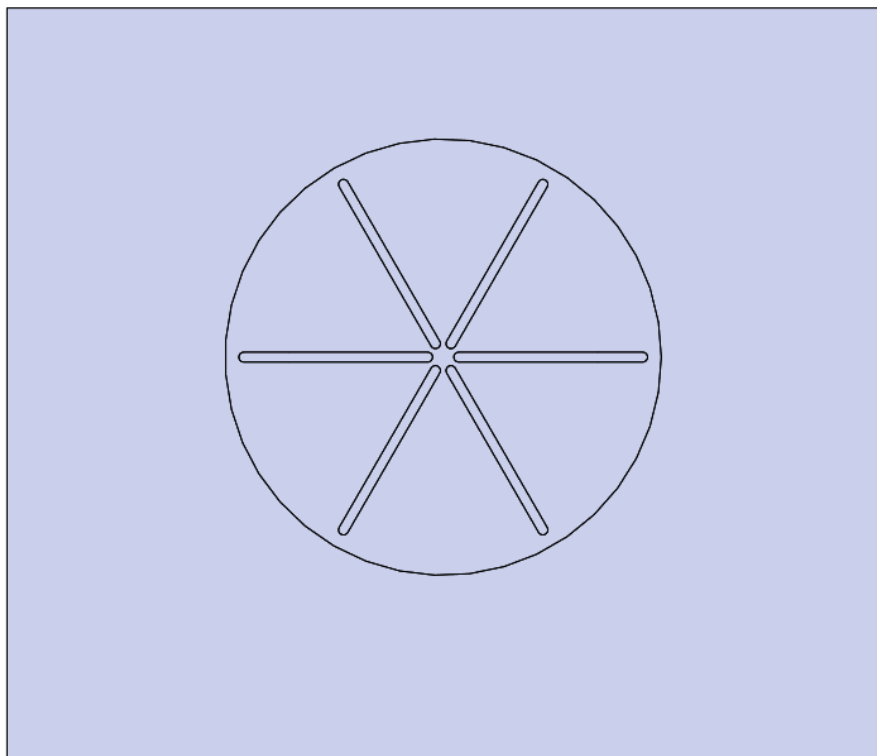
Tablica 5.5. Usporedba dizajna "zvijezda" i dizajna "I"

|                                           | Dizajn „zvijezda“ | Dizajn „I“ | Razlika [%] |
|-------------------------------------------|-------------------|------------|-------------|
| Najveće naprežanje<br>$\sigma/\text{MPa}$ | 51,97             | 36,49      | 29,8        |
| Najveći pomak<br>$\delta/\text{mm}$       | 0,92              | 0,75       | 18,5        |

Dizajn „I“ ipak nije dobar odabir te ima znatno lošije rezultate od dizajna „zvijezda“. Osim značajne razlike u najvećem naprežanju od 29,8 %, položaj najvećeg naprežanja je također povoljniji i očitiji kod dizajna „zvijezda“. Najveće vrijednosti naprežanja dizajna „I“ se pojavljuju duž cijele središnje linije te su znatno manjeg iznosa od maksimalne vrijednosti prikazane na slici 5.22. (desno), tj. od vrijednosti u čvorovima konačnih elemenata.

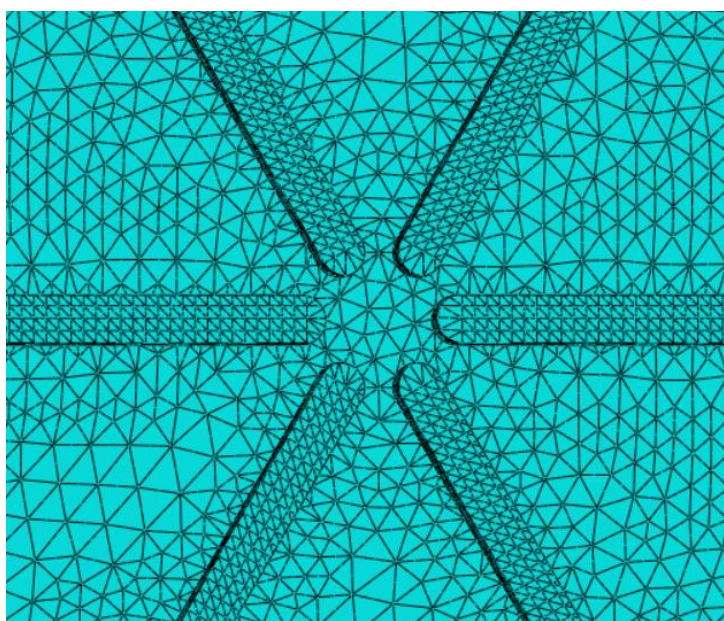
#### 5.1.6. Dizajn „zvijezda bez sjecišta“

Dizajn „zvijezda bez sjecišta“, prikazan na slici 5.23., je nešto drugačija ideja koja se može vidjeti na već postojećim „rupture disk“ i „eksplozijski otvor“ proizvodima gdje se zarezi ne sijeku u središnjoj točki. Ovaj dizajn se ipak izradio svrdlom za glodanje promjera 0,8 mm, a ne svrdlom s vrhom od 60° s kojim dizajn ne ostvaruje dovoljno dobre rezultate.



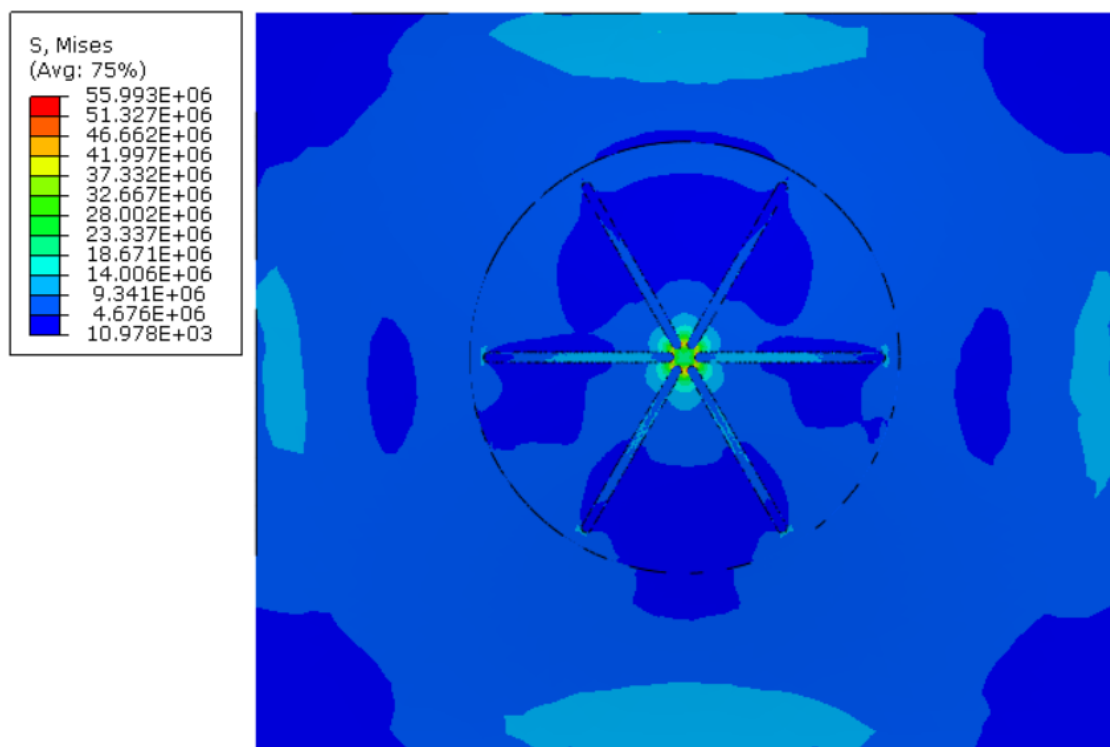
**Slika 5.23. Model dizajna "zvijezda bez sjecišta" u Solidworks-u**

Mreža konačnih elemenata na najkritičnijem području za model dizajna „zvijezda bez sjecišta“ prikazana je na slici 5.24. Na područjima gdje se pojavljuju najveća naprezanja, tj. gdje će najvjerojatnije doći do početka pukotine, konačni elementi su još uvijek aproksimativne veličine od 0,2 mm, ali mreža elemenata nije baš pravilna kao prijašnjim primjerima.



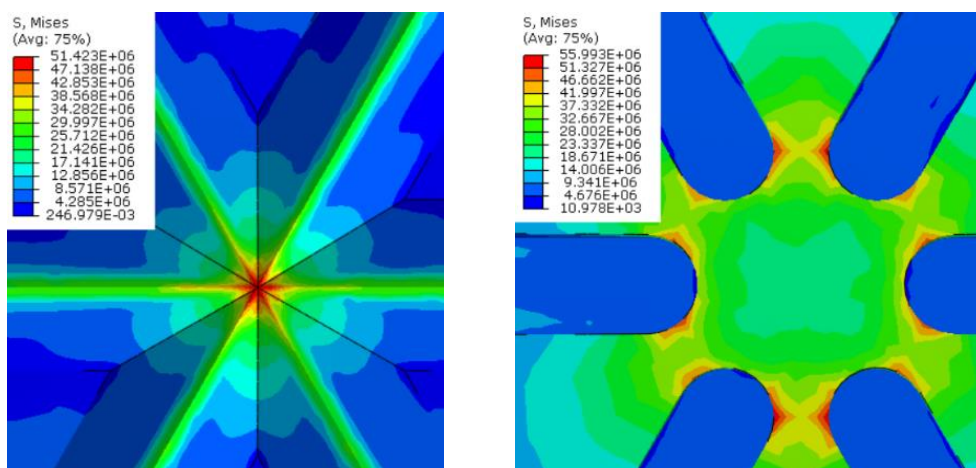
**Slika 5.24. Mreža konačnih elemenata za dizajn "zvijezda bez sjecišta"**

Raspodjela naprezanja po modelu u Pa za dizajn „zvijezda bez sjecišta“ izrađen svrdlom za glodanje promjera 0,8 mm prikazana je na slici 5.25.



Slika 5.25. Dizajn "zvijezda bez sjecišta" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

Na slici 5.26. prikazani su detalj najvećeg naprezanja za dizajn „zvijezda“ (lijevo) i detalj najvećeg naprezanja za dizajn „zvijezda bez sjecišta“ (desno). Na slici 5.26. (desno) se opet u legendi pojavljuju nešto veći iznosi maksimalnog naprezanja nego u integracijskim točkama, ali je zorno prikazan položaj maksimalnog naprezanja, tj. položaj mogućeg početka pukotine.



Slika 5.26. Položaj najvećeg naprezanja dizajna "zvijezda" (lijevo) i dizajna "zvijezda bez sjecišta" (desno) u Pa

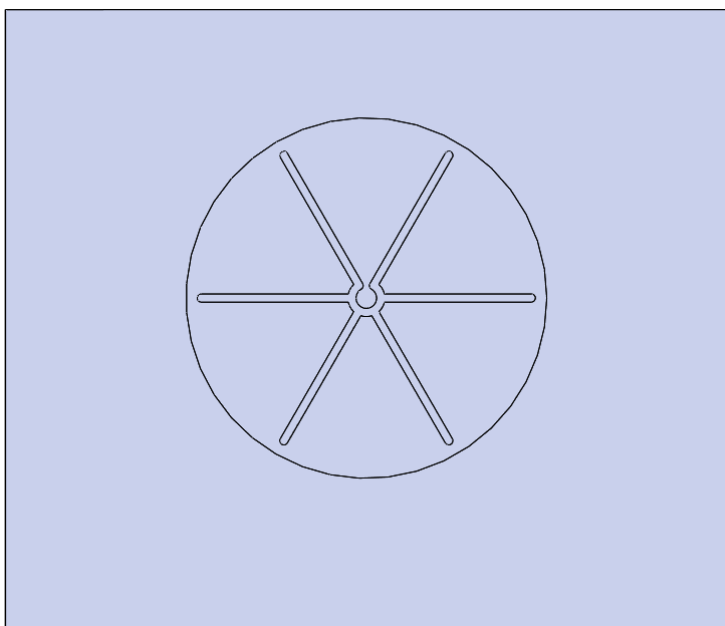
**Tablica 5.6. Usporedba dizajna "zvijezda" i dizajna "zvijezda bez sjecišta"**

|                                           | Dizajn „zvijezda“ | Dizajn „zvijezda bez sjecišta“ | Razlika [%] |
|-------------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------|
| Najveće naprezanje<br>$\sigma/\text{MPa}$ | 51,97             | 51,68                          | 0,05        |
| Najveći pomak<br>$\delta/\text{mm}$       | 0,92              | 0,85                           | 7,6         |

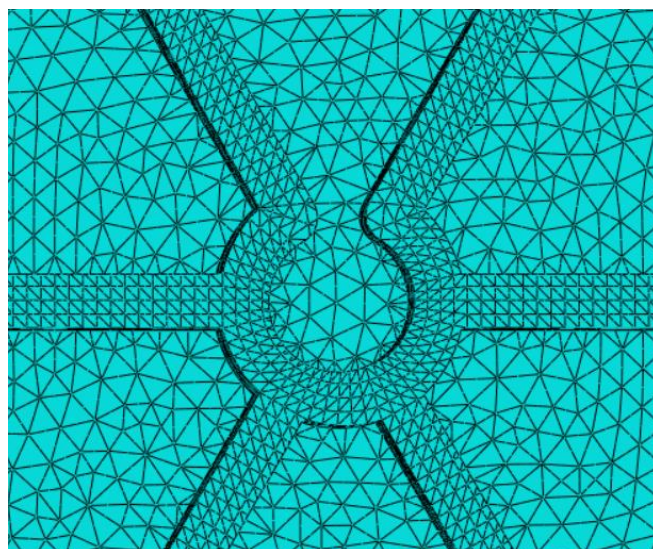
Dizajn „zvijezda bez sjecišta“ daje gotovo jednake vrijednosti najvećeg naprezanja kao i dizajn „zvijezda“. Na slici 5.26. (desno) se može primjetiti da se najveća naprezanja sada nalaze na vanjskim radijusima između dva zareza što je također dobro mjesto za početak pukotine jer se može pretpostaviti daljnji smjer propagacije pukotine, a to je prema sljedećem zarezu te tako u krug. Također daje za 7,6 % manji pomak što je poboljšanje u odnosu na dizajn „zvijezda“, ali ništa značajno. Dizajni su podjednako dobri, ali zbog lakšeg i kvalitetnijeg promrežavanja kritičnog područja modela u kasnijoj analizi te lakšeg predviđanja položaja početka pukotine ipak je odabran dizajn „zvijezda“.

#### 5.1.7. Dizajn „zvijezda s polukružnim središtem“

Dizajn „zvijezda s kružnim središtem“ je još jedan dizajn zvijezde s drugačijim spojem zareza u sredini dizajna, prikazan na slici 5.27.

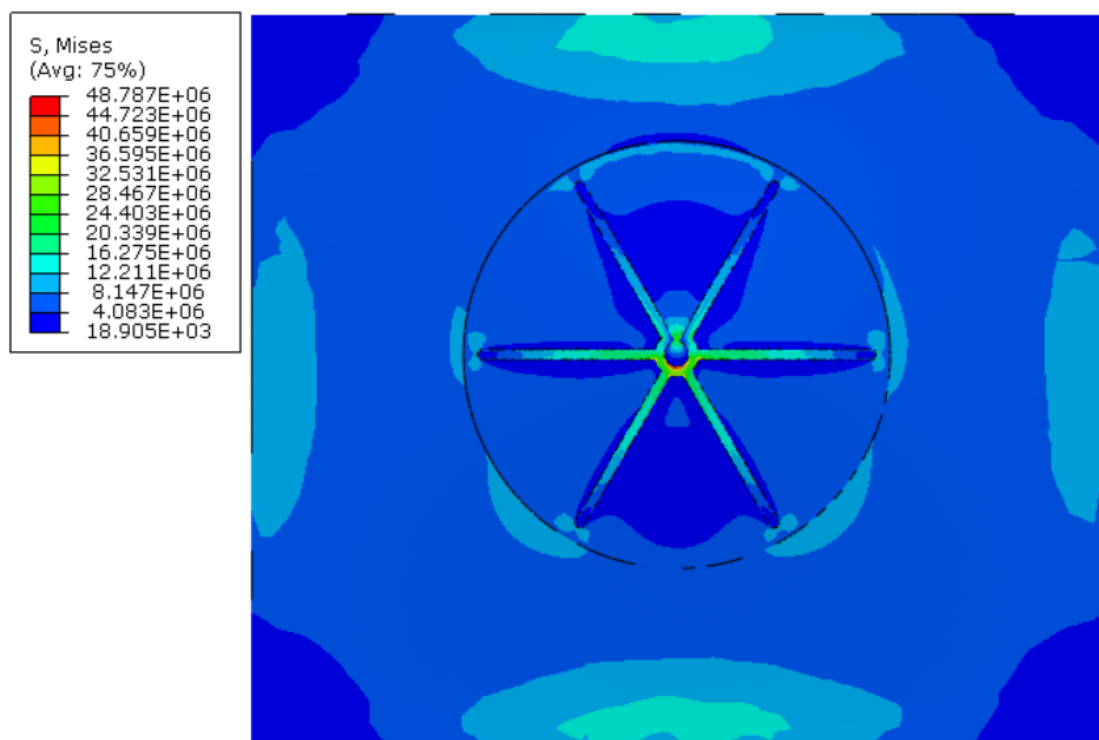
**Slika 5.27. Model dizajna "zvijezda s polukružnim središtem" u Solidworks-u**

Ovaj put zarezi se spajaju u polukružnicu na sredini te bi se prilikom pucanja središnji kružni dio zadržao na jednom od krakova dizajna. Ovaj dizajn se također izrađuje svrdlom za glodanje promjera 0,8 mm. Mreža konačnih elemenata za najkritičnije područje modela prikazana je na slici 5.28.



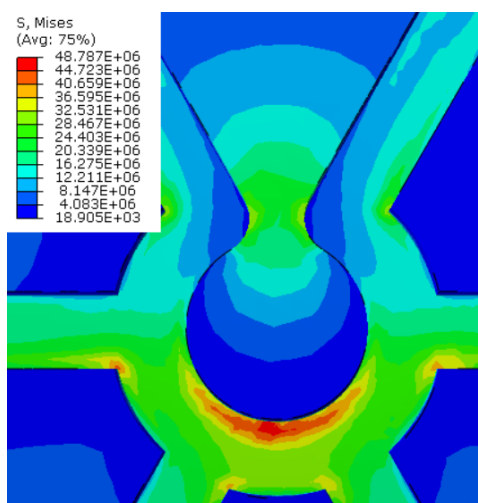
Slika 5.28. Mreža konačnih elemenata za dizajn "zvijezda s polukružnim središtem"

Raspodjela naprezanja po modelu u Pa za dizajn „zvijezda s polukružnim središtem“ prikazana je na slici 5.29.



Slika 5.29. Dizajn "zvijezda s polukružnim središtem" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

Detalj područja najvećeg naprezanja za dizajn „zvijezda s polukružnim središtem“ prikazan je na slici 5.30.



Slika 5.30. Položaj najvećeg naprezanja dizajna "zvijezda s polukružnim središtem" u Pa

Tablica 5.7. Usporedba dizajna "zvijezda" i dizajna "zvijezda s polukružnim središtem"

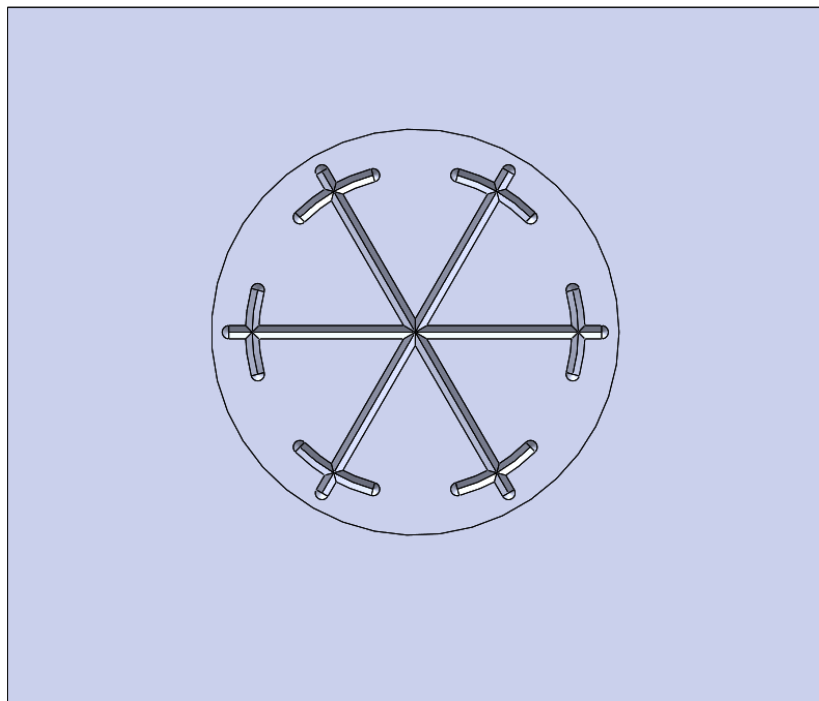
|                                     | Dizajn „zvijezda“ | Dizajn „zvijezda s polukružnim središtem“ | Razlika [%] |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|-------------|
| Najveće naprezanje<br>$\sigma$ /MPa | 51,97             | 47,33                                     | 8,9         |
| Najveći pomak<br>$\delta$ /mm       | 0,92              | 1,01                                      | 8,9         |

Dizajn „zvijezda s polukružnim središtem“ ipak daje za 8,9 % manje najveće naprezanje od dizajna „zvijezda“. Raspodjela naprezanja po modelu je dobra, a detalj položaja najvećeg naprezanja točno otkriva na kojem mjestu će doći do pucanja dizajna. Najveći pomak dizajna je također za 8,9 % veći od dizajna „zvijezda“ stoga ovaj dizajn nije dovoljno dobar.

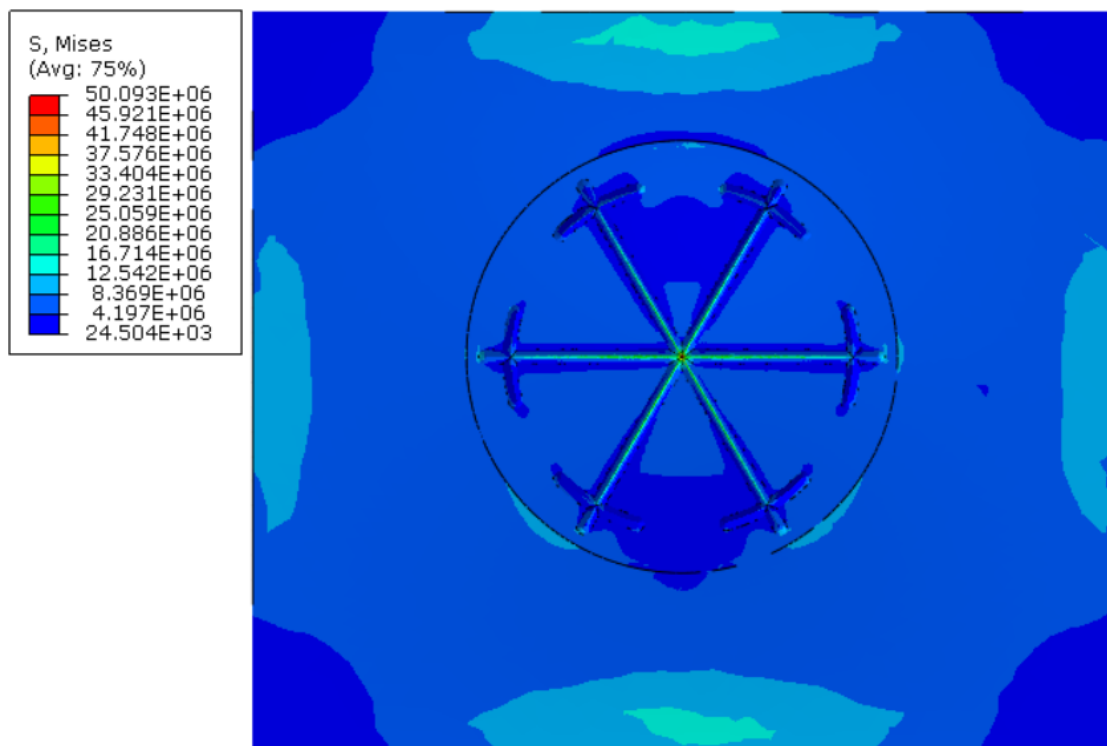
#### 5.1.8. Dizajn s kružnim zarezima

Naposljetku, analizirao se još jedan dizajn gdje se dodaju zarezi koji sijeku vrhove zvijezde na promjeru od 28 mm. Kružni zarezi su varijacija ideje iz patenta US3826412A [13] prikazanog na slici 3.2. Ideja je da pomognu pri lakšem deformiranju prilikom savijanja materijala prema van u trenutku pucanja te da spriječe širenje pukotine na ostatak poklopca.

Model dizajna prikazan je na slici 5.31., a raspodjela naprezanja po modelu u Pa na slici 5.32. Mreža konačnih elemenata na najkritičnijem području je identična mreži konačnih elemenata kod dizajna „zvijezda“.



Slika 5.31. Model dizajna "zvijezda s kružnim zarezima" u Solidworks-u



Slika 5.32. Dizajn "zvijezda s kružnim zarezima" - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

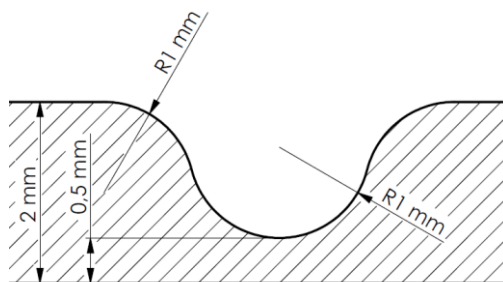
Tablica 5.8. Usporedba dizajna "zvijezda" i dizajna "zvijezda s kružnim zarezima"

|                                           | Dizajn „zvijezda“ | Dizajn „zvijezda s kružnim zarezima“ | Razlika [%] |
|-------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------|
| Najveće naprezanje<br>$\sigma/\text{MPa}$ | 51,97             | 52,75                                | 1,4         |
| Najveći pomak<br>$\delta/\text{mm}$       | 0,92              | 0,93                                 | 1           |

Dizajn s kružnim zarezima daje malu razliku u najvećem naprezanju od 1,4 %, ali ne daje razliku u raspodjeli naprezanja po modelu u odnosu na dizajn „zvijezda“. Navedena funkcija kružnih zarezima za lakše deformiranje i sprječavanje širenja pukotine te povećanje naprezanja od 1,4 % nisu dostatni za isplativost dodatno utrošenog materijala i rada. Prilikom naglog ispuštanja velikog pretlaka iz kućišta pukotina možda propagira na ostatak poklopca no bez analize propagacije pukotine ne možemo točno znati koliko ovi zarezima pomažu pri sprječavanju toga. To zahtjeva dodatnu analizu koja nije tema ovog rada stoga se odabrao dizajn „zvijezda“.

## 5.2. Dizajni izrađeni injekcijskim prešanjem

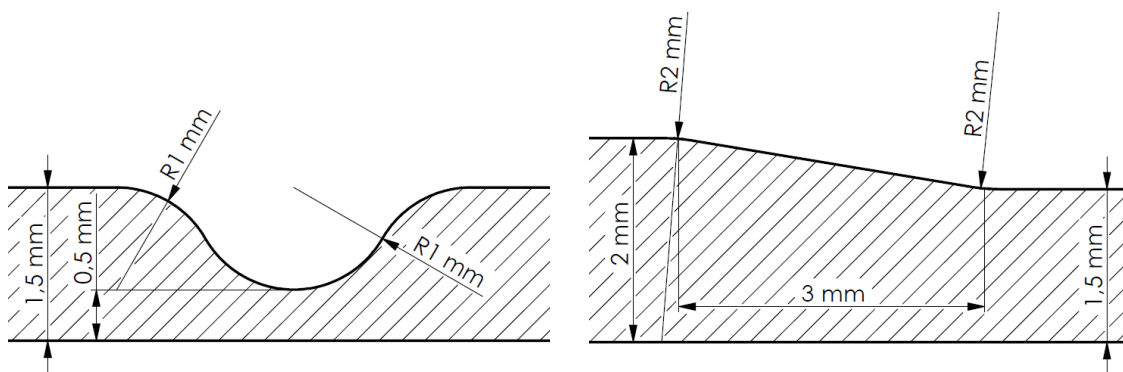
Poklopac kućišta se izrađuje injekcijskim prešanjem stoga je tehnološki i ekonomski isplativije da se i sami dizajn oslabljenja poklopca izradi zajedno s kućištem. Dakako i zarez onda mora biti po pravilima za prešanje što će povećati maksimalni mogući pretlak u kućištu. Minimalan radijus zarezima je 1 mm, nagib vertikalnih bridova mora biti veći od  $2^\circ$ , a minimalna debljina stanjenog dijela je 0,5 mm. Geometrija i dimenzije zarezima prikazane su na slici 5.33. Svi dizajni su analizirani u istim uvjetima. Tlak kojim su opterećeni je 0,1 MPa, temperatura je  $20^\circ\text{C}$  te aproksimativna veličina konačnih elementa na najkritičnijem području je 0,2 mm. Oslabljenje se izrađivalo s vanjske strane poklopca kućišta kao i u slučaju oslabljenja izrađenim odvajanjem čestica.



Slika 5.33. Dimenzije zarezima dizajna za injekcijsko prešanje

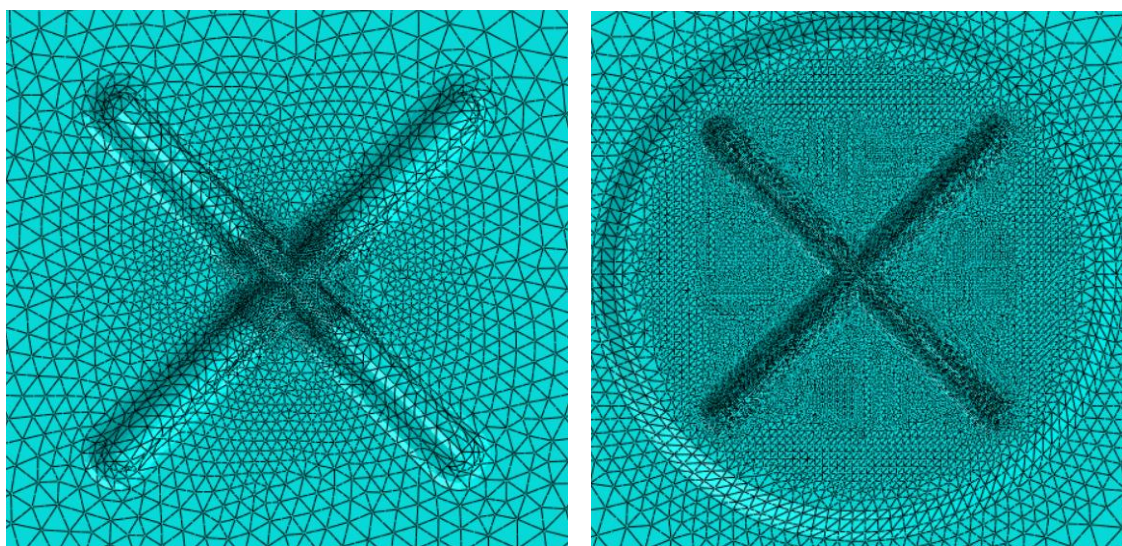
### 5.2.1. Kružno udubljenje na poklopcu oko zareza

Kod dizajna izrađenim injekcijskim prešanjem, kao i kod dizajna izrađenim odvajanjem čestica, prvotno se provjeravalo pomaže li kružno udubljenje koncentriranju naprezanja na traženom području. Kružno udubljenje ovdje mora biti također izrađeno injekcijskim prešanjem zajedno s poklopcem stoga mora poštivati pravila izrade prešanjem. Dimenzije i izvedba prijelaza na udubljenje prikazani su na slici 5.34 (desno). Nagib mora biti minimalno duljine 3 puta veće od visine te na krajevima nagiba moraju biti radijusi. Kružno udubljenje je promjera 35 mm i dubine 0,5 mm. Dimenzije novog zareza kod dizajna s kružnim udubljenjem prikazan je na slici 5.34 (lijevo). Minimalni radijus od 1 mm je očuvan te minimalna debljina stanjenog dijela ostaje 0,5 mm.



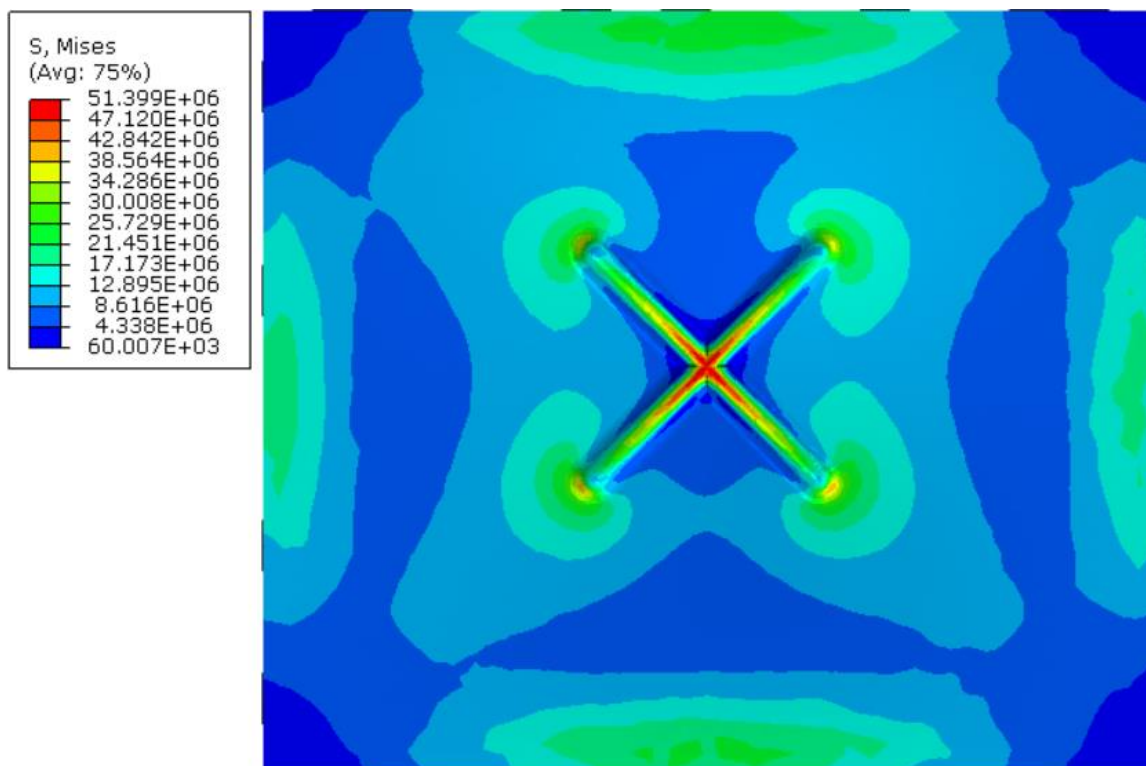
Slika 5.34. Dimenzije i oblik zareza (lijevo); presjek prijelaza s poklopca na udubljenje po pravilima injekcijskog prešanja (desno)

Mreža konačnih elemenata za model s udubljenjem i za model bez udubljenja prikazani su na slici 5.35.

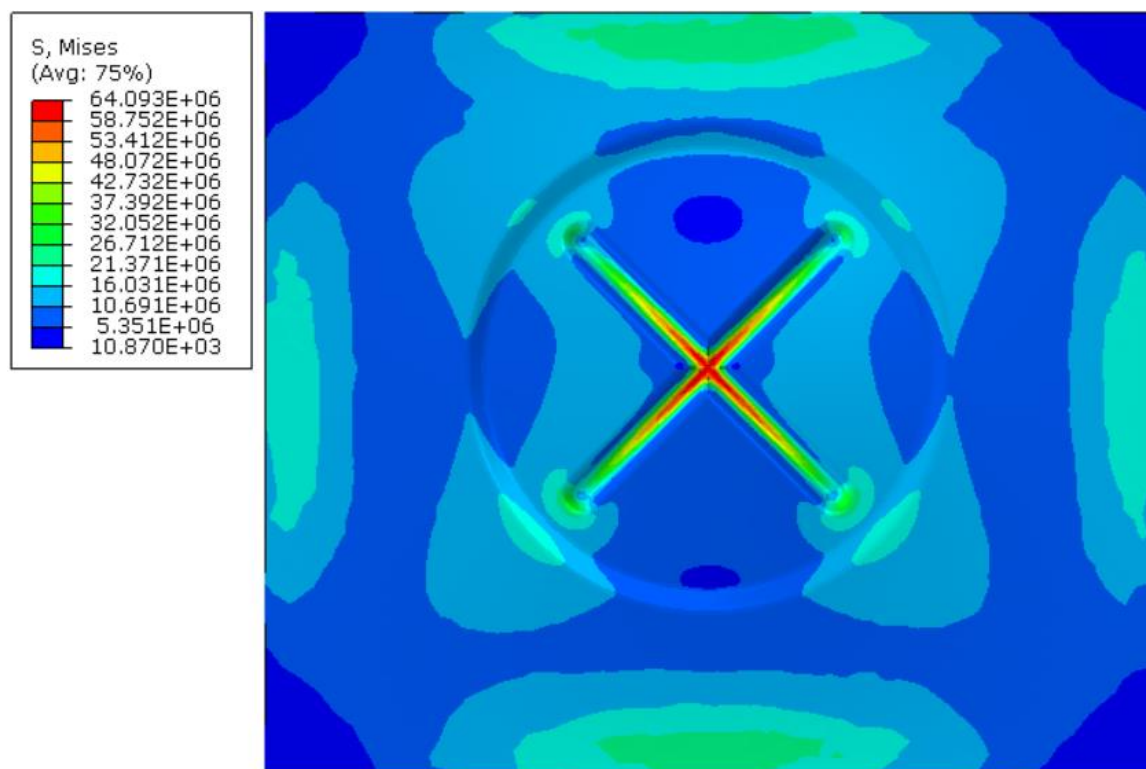


Slika 5.35. Mreža konačnih elemenata za dizajn bez udubljenja (lijevo) i dizajn s udubljenjem (desno)

Na slici 5.36. prikazane su raspodjele naprezanja po modelu sa zasebnim legendama u Pa za dizajn „križ“ bez udubljenja, a na slici 5.37. za dizajn „križ“ s udubljenjem.



Slika 5.36. Dizajn bez udubljenja za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa



Slika 5.37. Dizajn s udubljenjem za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

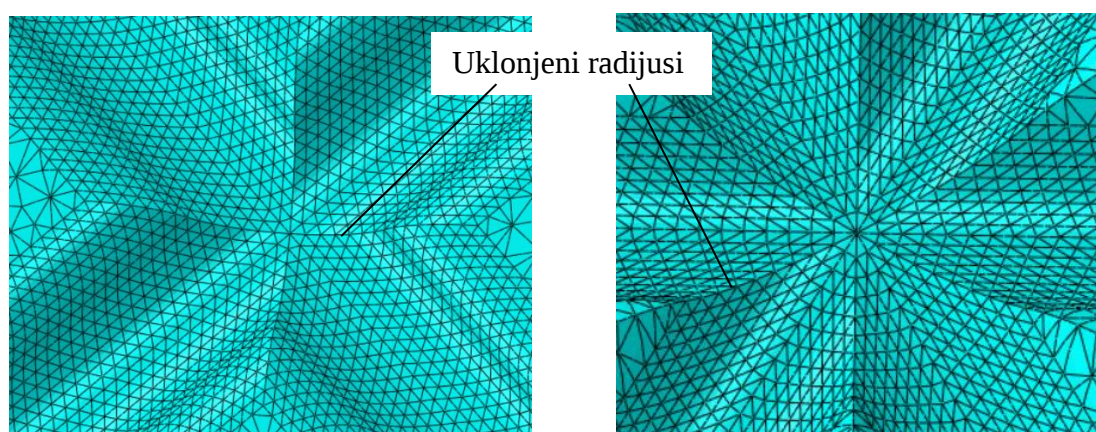
**Tablica 5.9. Usporedba dizajna bez udubljenja i s udubljenjem izrađeni injekcijskim prešanjem**

|                                           | Dizajn bez udubljenja | Dizajn s udubljenjem | Razlika [%] |
|-------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------|
| Najveće naprezanje<br>$\sigma/\text{MPa}$ | 47,14                 | 60,87                | 22,5        |
| Najveći pomak<br>$\delta/\text{mm}$       | 1,54                  | 1,85                 | 16,8        |

Dizajn s kružnim udubljenjem, kao i kod primjera izrađenog odvajanjem čestica, daje znatno bolje rezultate nego dizajn bez kružnog udubljenja. Najveće naprezanje je veće za 22,5 % te raspodjela naprezanja po modelu je znatno povoljnija jer smanjuje opterećenje ostatka poklopca. Najveći pomak je također veći 16,8 % što je posljedica stanjivanja poklopca oko samog zareza za 0,5 mm.

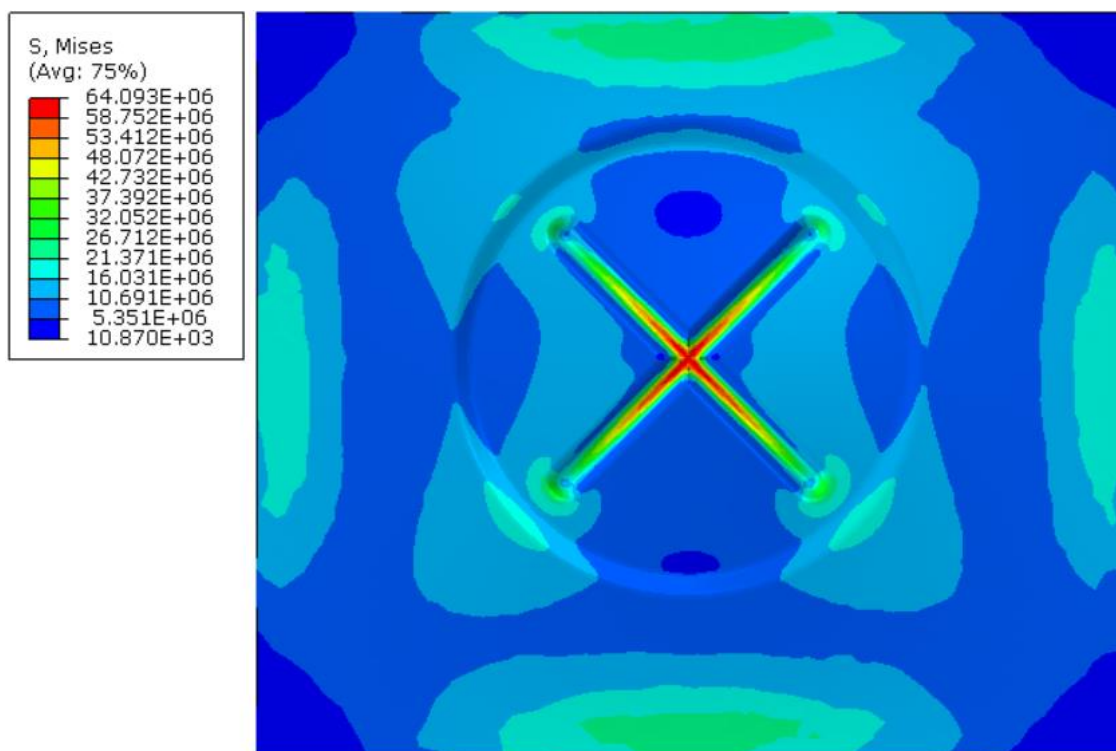
### 5.2.2. Dizajn „zvijezda“

Sljedeći dizajn je dizajn „zvijezda“ koji se usporedio s dizajnom „križ“. Veličina zvijezde i veličina križa su jednake te je kružno udubljenje također jednakih dimenzija kao i u prethodnom primjeru. Zbog lakšeg i kvalitetnijeg promreživanja najopterećenijeg dijela, radijusi na sredini križa i zvijezde su uklonjeni. Mreža konačnih elemenata na sredini, tj. na najopterećenijem dijelu, te spomenuti uklonjeni radijusi prikazani su na slici 5.38.

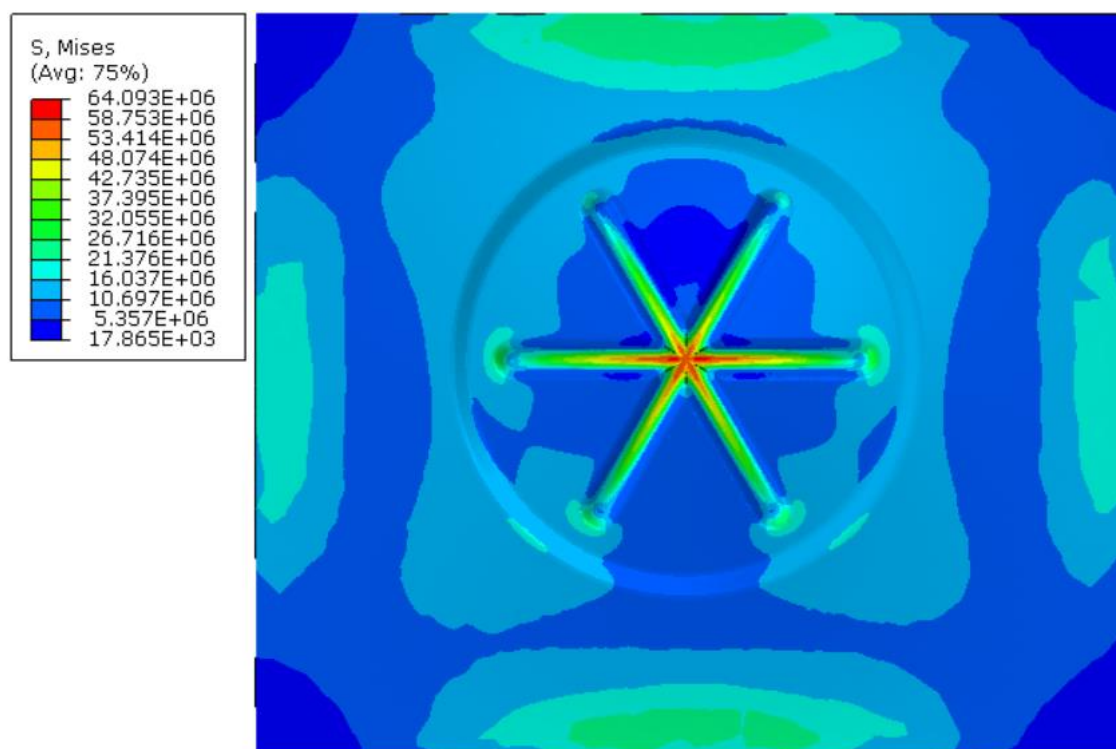


**Slika 5.38. Mreža konačnih elemenata na najopterećenijem području za dizajn "križ" (lijevo) i dizajn "zvijezda" (desno)**

Raspodjela naprezanja po modelu u Pa za dizajn „križ“ prikazana je na slici 5.39., za dizajn „zvijezda“ na slici 5.40., s jednakim legendama.

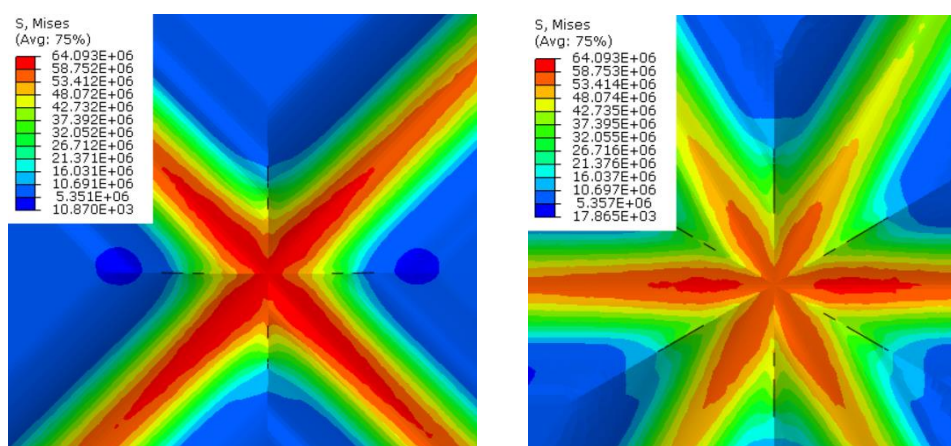


Slika 5.39. Dizajn "križ" za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa



Slika 5.40. Dizajn "zvijezda" za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

Položaji najvećeg naprezanja za oba dizajna s jednakim legendama prikazani su na slici 5.41.



Slika 5.41. Položaj najvećeg naprezanja za dizajn "križ" (lijevo) i dizajn "zvijezda" (desno) izrađeni injekcijskim prešanjem u Pa

Tablica 5.10. Usporedba dizajna "križ" i dizajna "zvijezda" izrađeni injekcijskim prešanjem

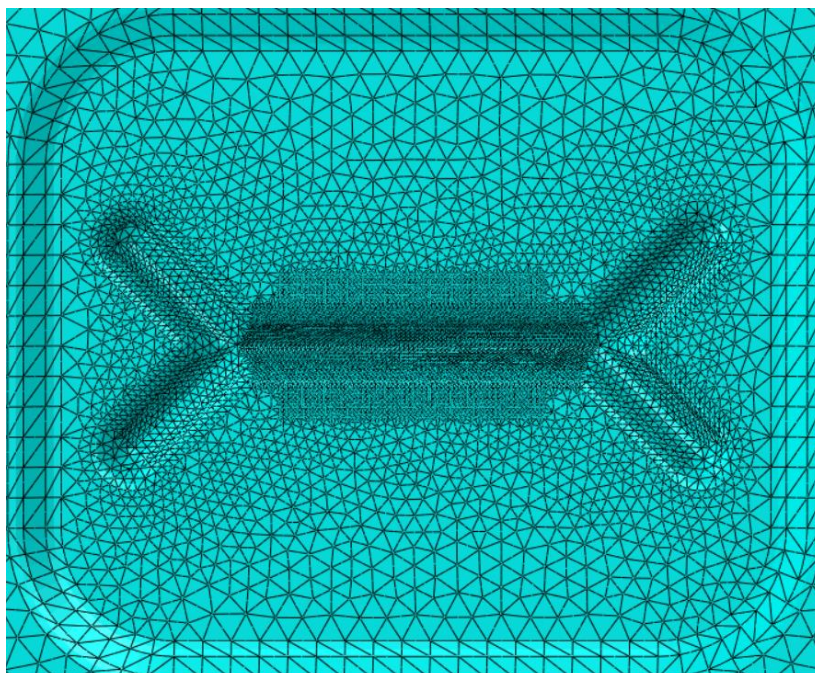
|                                           | Dizajn „križ“ | Dizajn „zvijezda“ | Razlika [%] |
|-------------------------------------------|---------------|-------------------|-------------|
| Najveće naprezanje<br>$\sigma/\text{MPa}$ | 60,87         | 57,36             | 5,8         |
| Najveći pomak<br>$\delta/\text{mm}$       | 1,85          | 1,96              | 5,6         |

Raspodjela naprezanja po modelu je slična za oba dizajna. Dizajn „križ“ daje najveće naprezanje za 5,8 % veće od dizajna „zvijezda“ što nije značajna razlika, ali dizajn „križ“ je i tehnološki jednostavniji za izraditi te tako i isplativiji. Na slici 5.41. se vidi da je za dizajn „križ“ zona najvećeg naprezanja bliža središtu križa što može biti zbog pravilnijeg oblika elemenata u središtu jer se tu manje bridova siječe. Također, daje i manji najveći pomak, za 5,6 %, što je još jedna prednost pred dizajnom „zvijezda“ stoga je odabran dizajn „križ“.

### 5.2.3. Dizajn „I“

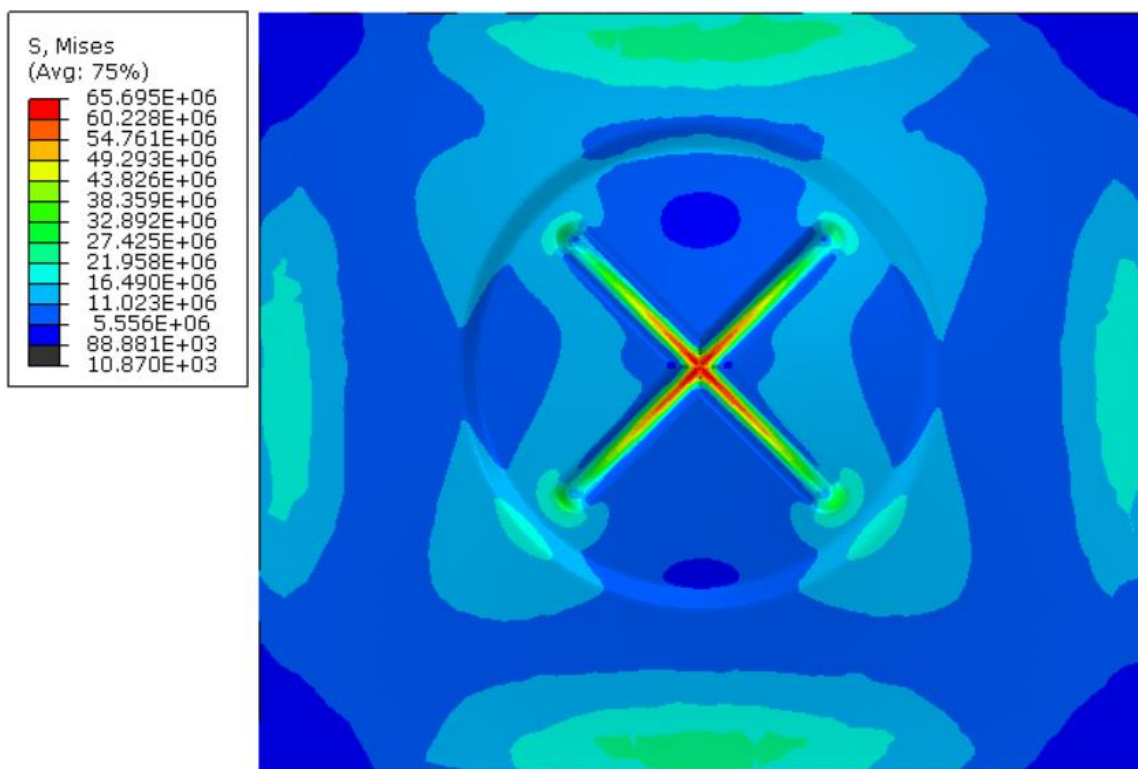
Naposljetku, provjerio se još dizajn „I“ izveden injekcijskim prešanjem i usporediti će se s dizajnom „križ“. Dizajn „I“ kod primjera izrađenim odvajanjem čestica nije dao dobre rezultate, no na prethodnom primjeru dizajna „zvijezda“ moglo se vidjeti da se nisu ponovili isti rezultati kao i kod dizajna izrađenim odvajanjem čestica. Udubljenje oko zareza kod dizajna „I“ je pravokutnog oblika sa zaobljenim vrhovima, dimenzija 30x25 mm i dubine 0,5 mm.

Mreža konačnih elemenata za model dizajna „I“ prikazan je na slici 5.42.

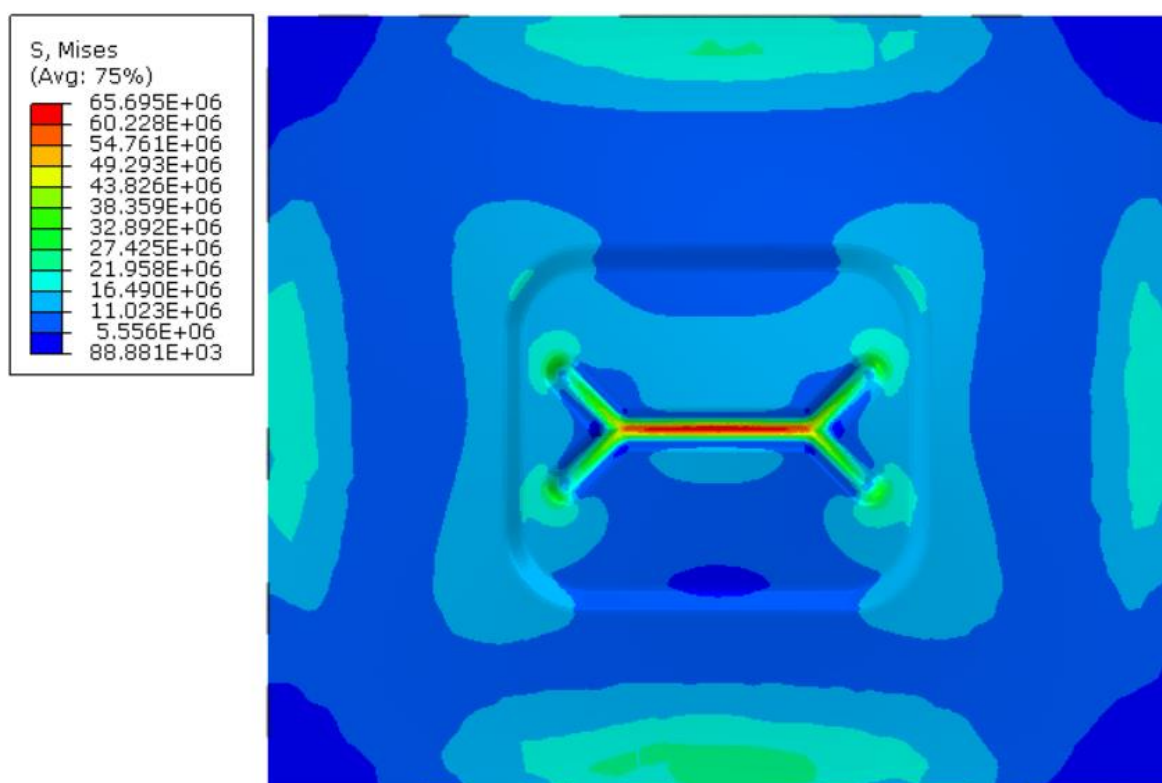


Slika 5.42. Mreža konačnih elemenata za model dizajna "I"

Na slikama 5.43. i 5.44. prikazane se raspodjele naprezanja po modelu s jednakim legendama u Pa za oba dizajna.

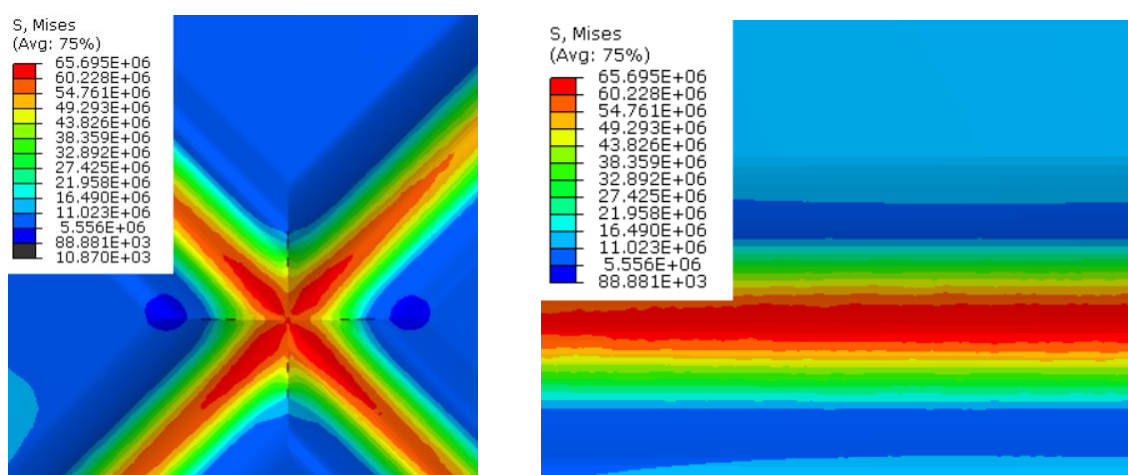


Slika 5.43. Dizajn "križ" za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa



Slika 5.44. Dizajn "I" za injekcijsko prešanje - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

Položaji najvećeg naprezanja s jednakim legendama za oba dizajna su prikazani na slici 5.45. Najveće naprezanje kod dizajna „I“ se pojavljuje duž središnjeg zarez a te je to područje dosta veće nego kod dizajna „križ“.



Slika 5.45. Položaj najvećeg naprezanja za dizajn "križ" (lijevo) i dizajn "zvijezda" (desno) izrađeni injekcijskim prešanjem u Pa

**Tablica 5.11. Usporedba dizajna "križ" i dizajna "I" izrađeni injekcijskim prešanjem**

|                                     | Dizajn „križ“ | Dizajn „I“ | Razlika [%] |
|-------------------------------------|---------------|------------|-------------|
| Najveće naprezanje<br>$\sigma$ /MPa | 60,87         | 61,03      | 0,26        |
| Najveći pomak<br>$\delta$ /mm       | 1,85          | 1,61       | 12,9        |

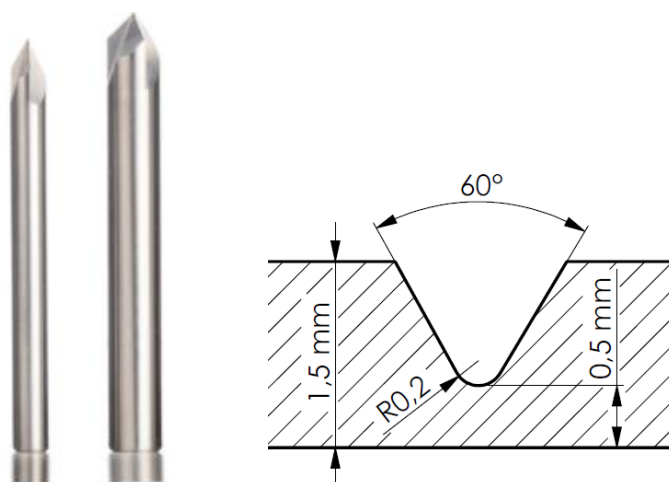
Dizajn „I“ daje gotovo jednako najveće naprezanje kao dizajn „križ“. Najveći pomak je 12,9 % manji kod dizajna „I“ nego kod dizajna „križ“ stoga dizajn „I“ tu ima prednost. Položaji najvećeg naprezanja na dizajnovima su dosta različiti. Iako u ovim analizama i usporedbama gledamo materijal kao izotropan, treba uzeti u obzir da je položaj mogućeg loma kod dizajna „I“ bolji s obzirom na tok staklenih vlakana u materijalu jer će pukotina propagirati linijski, a ne u četiri različite strane. Zbog oblika i veličine područja mogućeg nastanka pukotine oslabljenje će jednoličnije pucati kod dizajna „I“ nego kod dizajna „križ“. Jednostavnost izrade i raspodjela naprezanja po modelu su također slični za oba dizajna stoga je mala prednost dizajna „I“ u najvećem naprezanju, pomaku i položaju mogućeg loma ipak bila presudna pri odabiru konačnog dizajna.

## 6. NUMERIČKA ANALIZA ODABRANIH RJEŠENJA

Za konačnu analizu odabrana su dva rješenja, jedno izrađeno injekcijskim prešanjem kao i sami poklopac kućišta, a drugo izrađeno odvajanjem čestica. Odabrana su dva rješenja zbog razlike u vrijednostima maksimalnog pretlaka unutar kućišta te zbog razlike u troškovima izrade. Za oba rješenja određen je pretlak pucanja za temperaturu 20°C i uvjete mirnog opterećenja te je za oba rješenja provedena i numerička analiza čvrstoće pri radnom pretlaku za temperaturu 75°C i uvjete kvaziperiodičnog opterećenja. Za kvaziperiodično opterećenje uzima se da maksimalno naprezanje koje se smije dostići je 50 % od vrijednosti lomne čvrstoće materijala za zadanu temperaturu.

### 6.1. Odabrani dizajn izrađen odvajanjem čestica

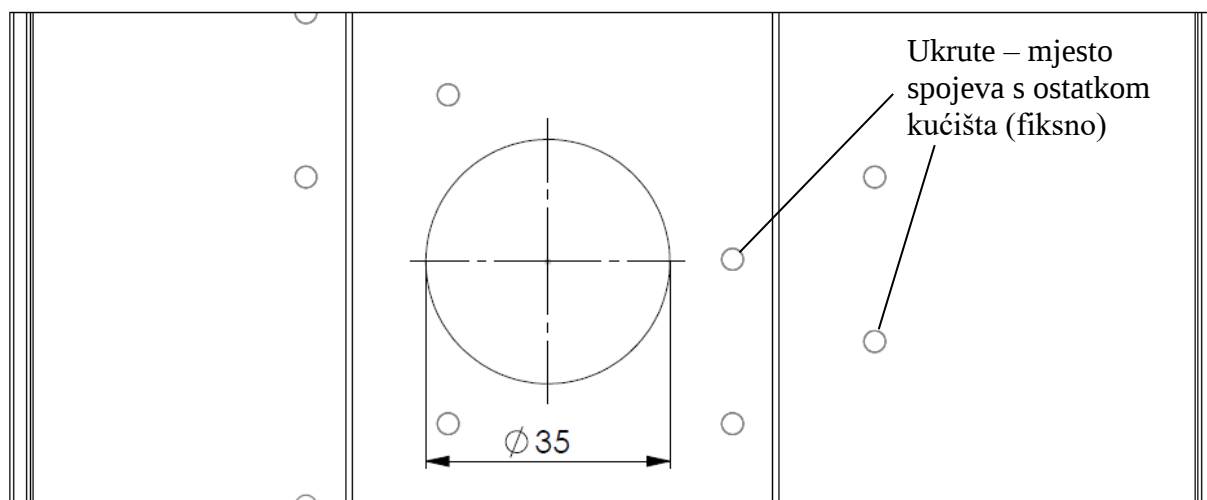
Dizajn izrađen odvajanjem čestica postiže bolje rezultate te niži pretlak pucanja nego dizajn izrađen injekcijskim prešanjem, ali su mu zato troškovi izrade veći. Poklopac kućišta nakon injekcijskog prešanja mora ići na dodatnu obradu da bi se izradilo ovo oslabljenje. No zato sami dizajn nije kompliciran za izvesti na stroju za glodanje. Alat koji se koristi za izradu je svrdlo za glodanje s vrhom od 60° prikazan na slici 6.1. (lijevo), a oblik i dimenzije utora su prikazani na slici 6.1. (desno).



Slika 6.1. Alat za izradu zareza odvajanjem čestica [22] (lijevo) i dimenzije utora (desno)

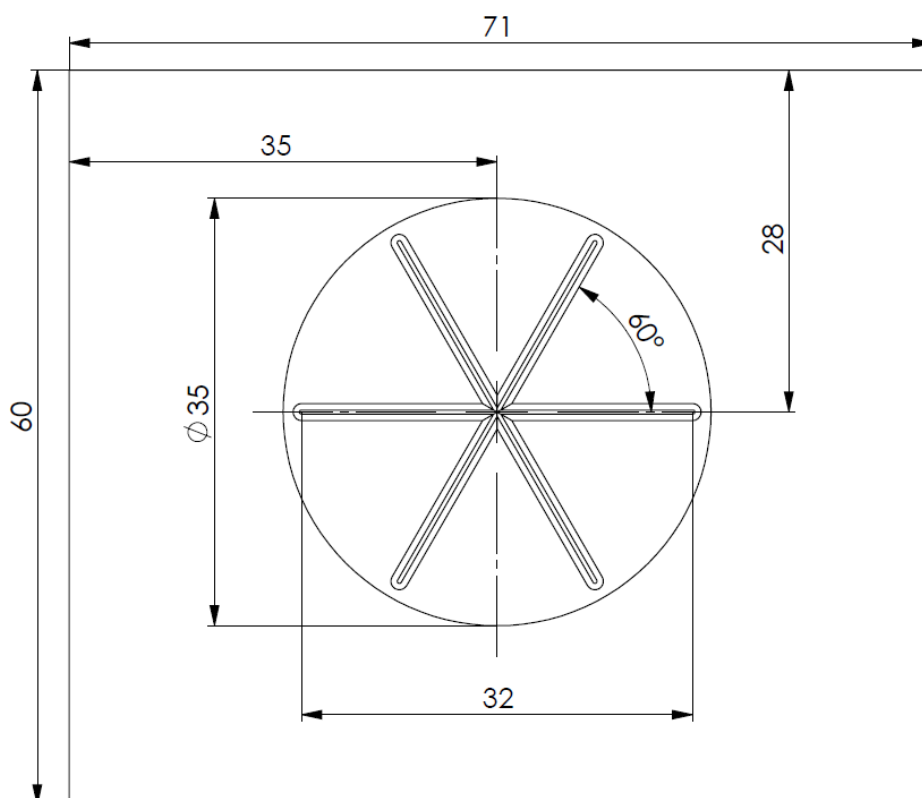
Model je pločica debljine 2 mm, izrezana iz modela poklopca kućišta električne baterije prikazanog na slici 2.1. u poglavlju 2. *Model kućišta baterije*, sa sredine poklopca između dva rebra. Na slici 6.2. prikazani su poklopac kućišta električne baterije te prijedlog položaja

oslabljenja na poklopcu bez pripadajućih dimenzija zbog autorskih prava. Također prikazana su i mjesta spojeva s ostatkom kućišta, koji služe kao dodatne ukrute poklopca uz zavare na krajevima.



**Slika 6.2. Poklopac kućišta baterije s prijedlogom za položaj oslabljenja**

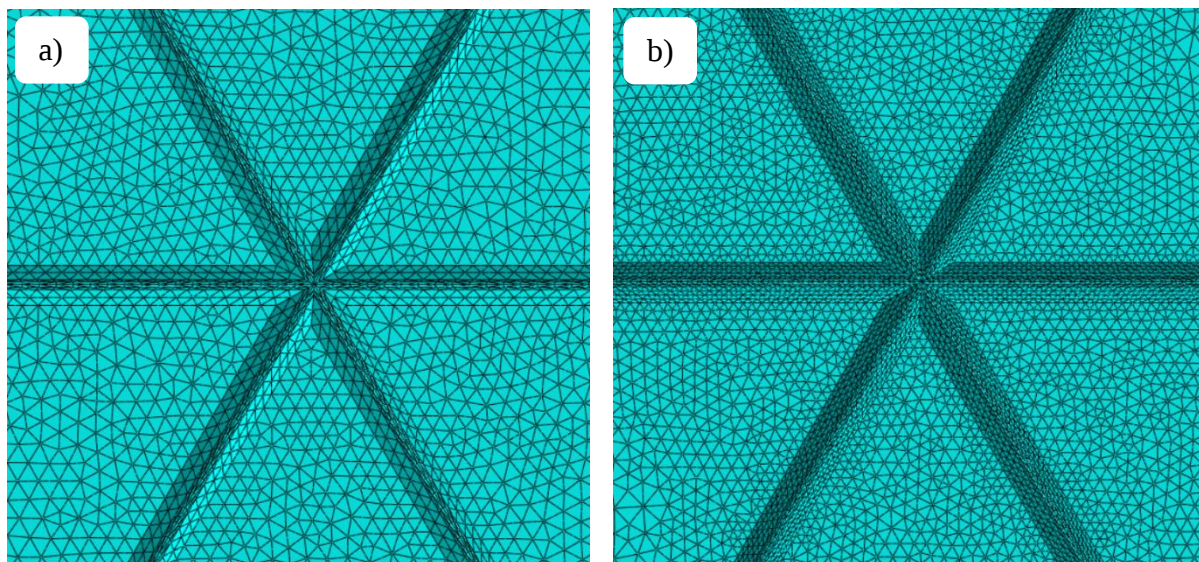
Dimenzije modela i odabranog dizajna oslabljenja na modelu prikazane su na slici 6.3. Kružno udubljenje oko zareza je dubine 0,5 mm.



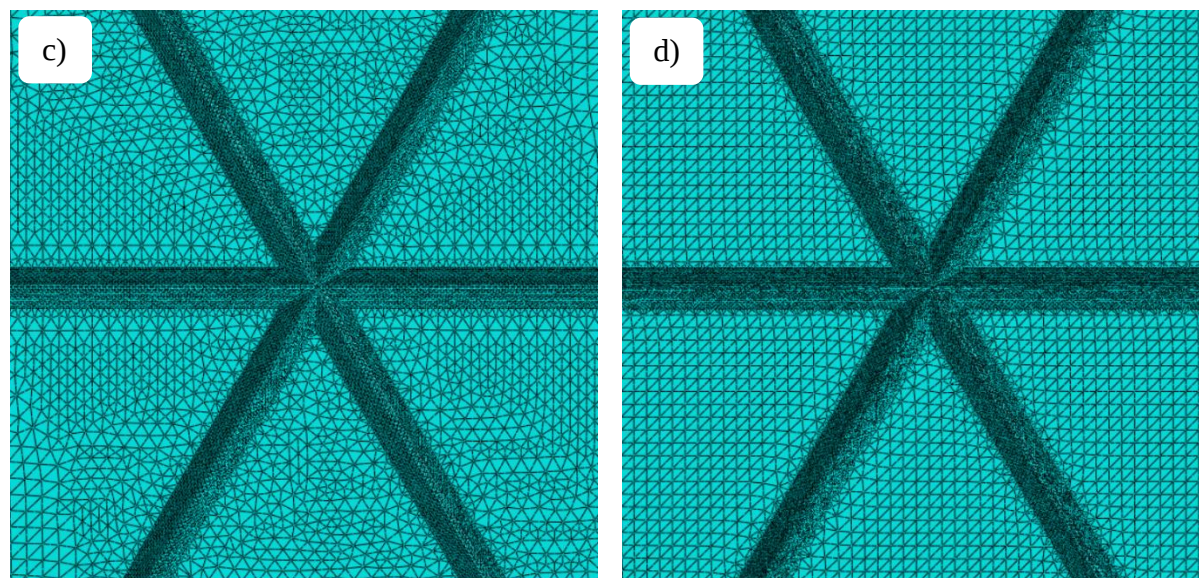
**Slika 6.3. Dimenzije i geometrija modela oslabljenja izrađenog odvajanjem čestica**

### 6.1.1. Konvergencija

Prije konačne analize potrebno je provesti provjeru konvergencije rezultata. Diskretizacija modela s različitim brojem tetraedarskih konačnih elemenata 2. reda prikazana je na slikama 6.4. i 6.5. te će se dalje modeli s različitim brojem konačnih elemenata označavati s a), b) i sl.



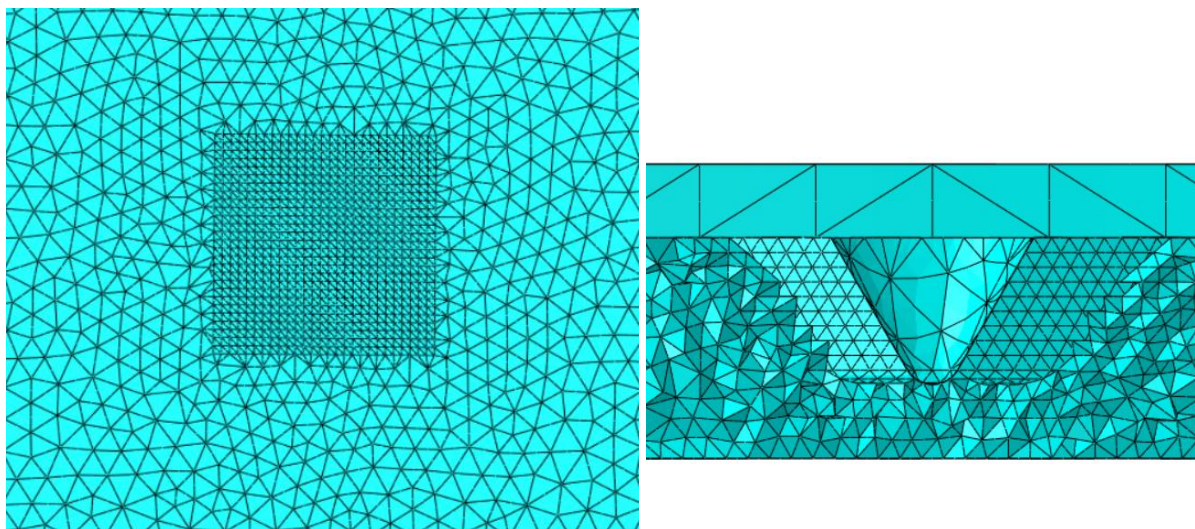
**Slika 6.4. Diskretizacija s a) 45211 elementa - aproksimativna veličina elementa je 0,6 mm i b) 74734 elementa – aproksimativna veličina elementa je 0,33 mm**



**Slika 6.5. Diskretizacija s c) 127799 elementa - aproksimativna veličina elementa je 0,2 mm i d) 185795 elementa – aproksimativna veličina elementa je 0,15 mm**

Na slikama 6.4. i 6.5. prikazani su detalji diskretiziranog modela na najopterećenijem dijelu, a to su zarezi, tj. sredina zarezane zvijezde. S obzirom da je to najopterećeniji dio modela, gustoća

mreže, tj. aproksimativna veličina elementa, se mijenjala samo za taj dio modela dok je mreža ostatka modela ostajala nepromijenjena. Na slici 6.6. (lijevo) prikazana je diskretizirana stražnja strana modela na najopterećenijem području. Na stražnjoj strani se također mijenjala gustoća mreže samo na najopterećenijem području modela, a ostatak mreže je ostajao nepromijenjen. Poprečni presjek mreže na tom istom području za slučaj s 185795 konačnih elemenata prikazan je na slici 6.6. (desno).



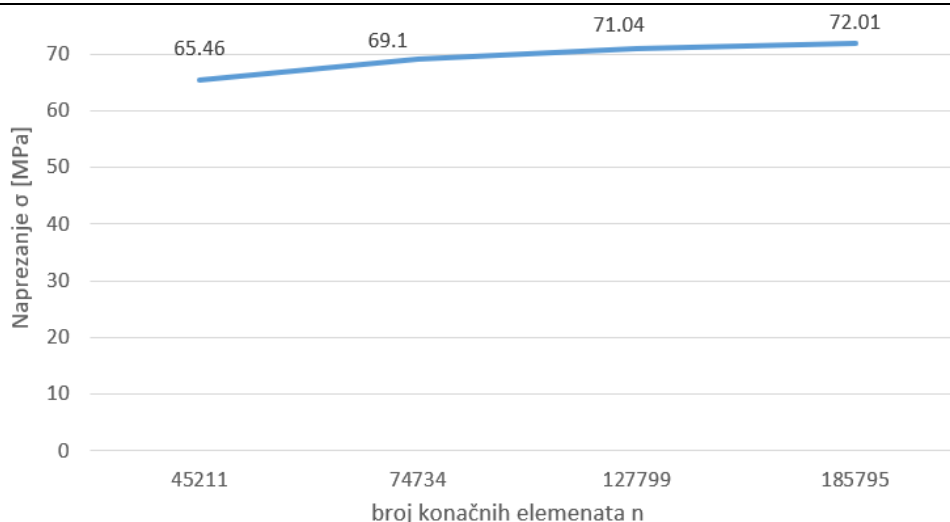
**Slika 6.6. Diskretizirana stražnja strana modela na najopterećenijem području (lijevo); poprečni presjek mreže na najopterećenijem području (desno)**

U tablici 6.1. prikazani su rezultati različito diskretiziranih modela.

**Tablica 6.1. Konvergencija rezultata naprezanja dizajna izrađenog odvajanjem čestica**

| OZNAKA MODELA | Broj konačnih elemenata | Najveće naprezanje $\sigma$ /MPa |
|---------------|-------------------------|----------------------------------|
| a)            | 45211                   | 65,46                            |
| b)            | 74734                   | 69,1                             |
| c)            | 127799                  | 71,04                            |
| d)            | 185795                  | 72,01                            |

Na slici 6.7. grafički je prikazana konvergencija ekvivalentnog naprezanja prema Von Mises-u u najopterećenijoj točki modela.

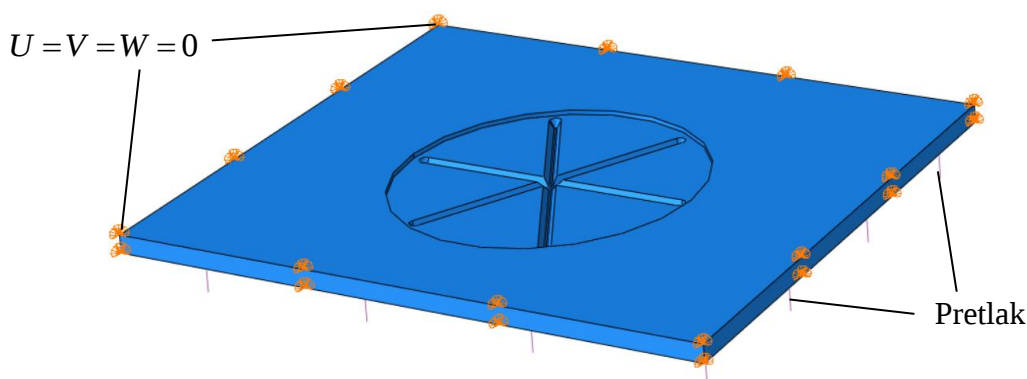


**Slika 6.7. Grafički prikaz konvergencije rezultata dizajna izrađenog odvajanjem čestica**

Kao što je vidljivo iz grafičkog prikaza, s povećanjem broja konačnih elemenata vrijednost naprezanja konvergira. Između zadnje dvije točke razlika u broju elemenata je čak 31,2 %, a porast iznosa naprezanja je samo 1,3 %. S obzirom na preporuku mentora i ograničenim mogućnostima oko kompleksnosti analize, konačna analiza dizajna izrađenog odvajanjem čestica se vršila na modelu diskretiziranom s 185795 konačnih elemenata.

#### 6.1.2. Analiza dizajna izrađenog odvajanjem čestica

Konačna analiza za dizajn izrađen odvajanjem čestica se izvršila za 2 slučaja različitih uvjeta za zadani materijal PAGF-13 definiran u poglavlju 2.2. *Materijal kućišta*. Materijal je plastičnog karaktera stoga je analiza u nelinearnom području te je radi toga u koraku *Step* unutar programskog paketa aktivirana opcija *NLGEOM*. Model na kojem su se izvršile analize, uz zadane rubne uvjete, prikazan je na slici 6.8. Diskretizacija najopterećenijeg dijela modela je prikazana u prethodnom poglavlju 6.1.1. *Konvergencija* na slikama 6.5. d) i 6.6.



**Slika 6.8. Model dizajna oslabljenja izrađenog odvajanjem čestica s zadanim rubnim uvjetima**

1. slučaj - Pretlak pucanja pri normalnim uvjetima

U prvom slučaju uvjeti su:

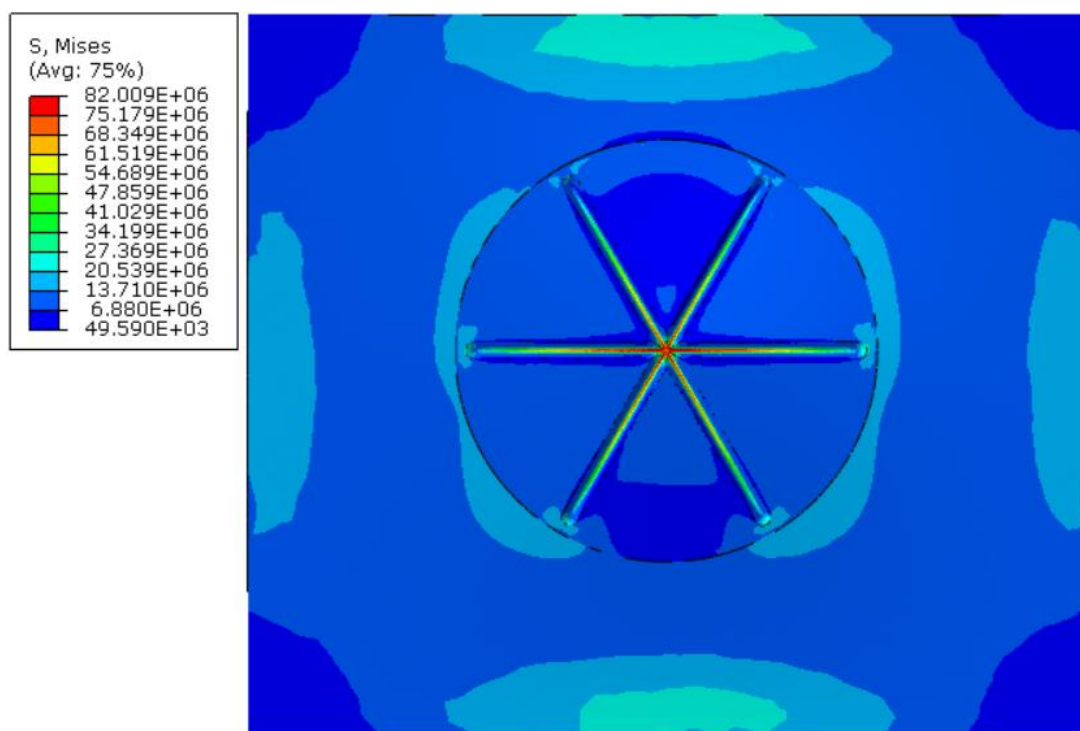
- Temperatura: 20°C,
- Mirno opterećenje.

Za slučaj mirnog opterećenja iz karakteristike materijala za vrijednost naprezanja pri kojoj dolazi do loma materijala uzima se lomna čvrstoća materijala za odabranu temperaturu. Za temperaturu 20°C ta vrijednost se mora linearno interpolirati između vrijednosti lomne čvrstoće za temperaturu 0°C i za temperaturu 23°C.

Izraz za izračun vrijednosti lomne čvrstoće za temperaturu 20°C glasi:

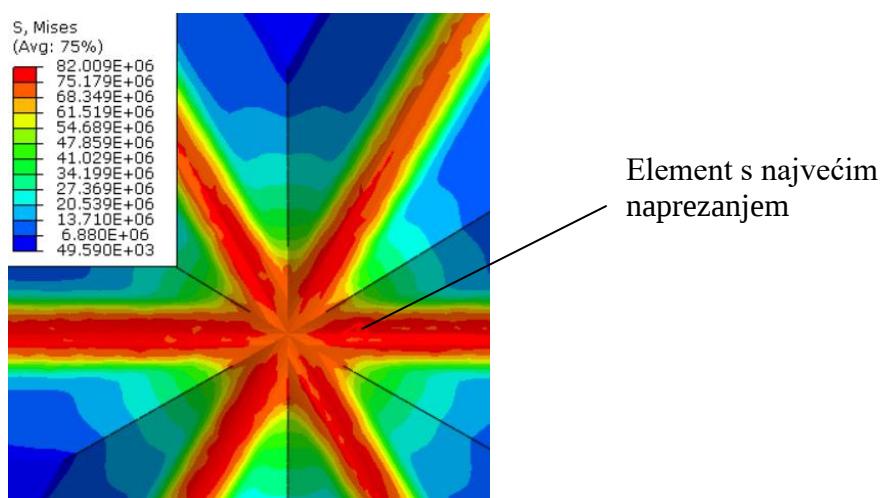
$$\begin{aligned}\sigma_{M,20^{\circ}\text{C}} &= \sigma_{M,0^{\circ}\text{C}} + (T_{20^{\circ}\text{C}} - T_{0^{\circ}\text{C}}) \frac{\sigma_{M,23^{\circ}\text{C}} - \sigma_{M,0^{\circ}\text{C}}}{T_{23^{\circ}\text{C}} - T_{0^{\circ}\text{C}}} \\ &= 107,48 + (20 - 0) \frac{69,34 - 107,48}{23 - 0} = 74,31 \text{ MPa}.\end{aligned}\quad (6.1.)$$

Za zadane uvjete, iznos pretlaka kod kojeg dolazi do pucanja jest 0,1 MPa (1 bar). Raspodjela naprezanja po modelu u Pa za zadane uvjete i iznos pretlaka od 0,1 MPa prikazana je na slici 6.9.



**Slika 6.9. Dizajn izrađen odvajanjem čestica za 1. slučaj - raspodjela naprezanja po modelu u Pa**

Detalj najvećeg naprezanja, tj. mjesta gdje dolazi do pucanja dizajna prikazan je na slici 6.10.



Slika 6.10. Položaj najvećeg naprezanja - 1. slučaj dizajna izrađenog odvajanjem čestica u Pa

Tablica 6.2. Dizajn oslabljenja izrađen odvajanjem čestica - 1. slučaj

|                                              | Pretlak $p$ /MPa | Najveće naprezanje $\sigma$ /MPa | Najveći pomak $\delta$ /mm |
|----------------------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------|
| $T: 20^{\circ}\text{C}$<br>Mirno opterećenje | 0,1              | 74,31                            | 1,86                       |

Pri standardnim radnim uvjetima, temperaturi od  $20^{\circ}\text{C}$  te mirnom opterećenju, do pucanja dizajna dolazi pri pretlaku od 0,1 MPa (1 bar). To je ujedno i najveći pretlak koji ovaj dizajn izrađen odvajanjem čestica može izdržati. Raspodjela naprezanja po modelu je veoma povoljna, velika naprezanja se pojavljuju samo na području oslabljenja, a ostatak poklopca ne trpi velika opterećenja. Najveće naprezanje se ne pojavljuje točno u sredini oslabljenja, nego u jednom od zareza u neposrednoj blizini središta što je vidljivo na slici 6.10. Razlog tomu može biti i zato što se bridovi zareza sijeku u sredini te konačni element tu ne može biti najpravilnijeg oblika. Najveći pomak je 1,86 mm što je unutar granica dozvoljenog pomaka od 5 mm.

## 2. slučaj - Radni pretlak pri najnepovoljnijim uvjetima

U drugom slučaju uvjeti su:

- Temperatura:  $75^{\circ}\text{C}$ ,
- Kvaziperiodično opterećenje.

U ovom slučaju se kontrolira čvrstoća dizajna pri radnom pretlaku od 0,015 MPa (0,15 bara). Vrijednost naprezanja kod kojeg dolazi do loma u uvjetima mirnog opterećenja je lomna čvrstoća materijala za zadanu temperaturu. Za temperaturu 75°C ta vrijednost se mora linearno interpolirati između vrijednosti lomne čvrstoće za temperaturu 60°C i za temperaturu 80°C. Izraz za izračun vrijednosti lomne čvrstoće za temperaturu 75°C glasi:

$$\begin{aligned}\sigma_{M,75^{\circ}\text{C}} &= \sigma_{M,60^{\circ}\text{C}} + (T_{75^{\circ}\text{C}} - T_{60^{\circ}\text{C}}) \frac{\sigma_{M,80^{\circ}\text{C}} - \sigma_{M,60^{\circ}\text{C}}}{T_{80^{\circ}\text{C}} - T_{60^{\circ}\text{C}}} \\ &= 55,31 + (75 - 60) \frac{47,57 - 55,31}{80 - 60} = 49,5 \text{ MPa} .\end{aligned}\quad (6.2.)$$

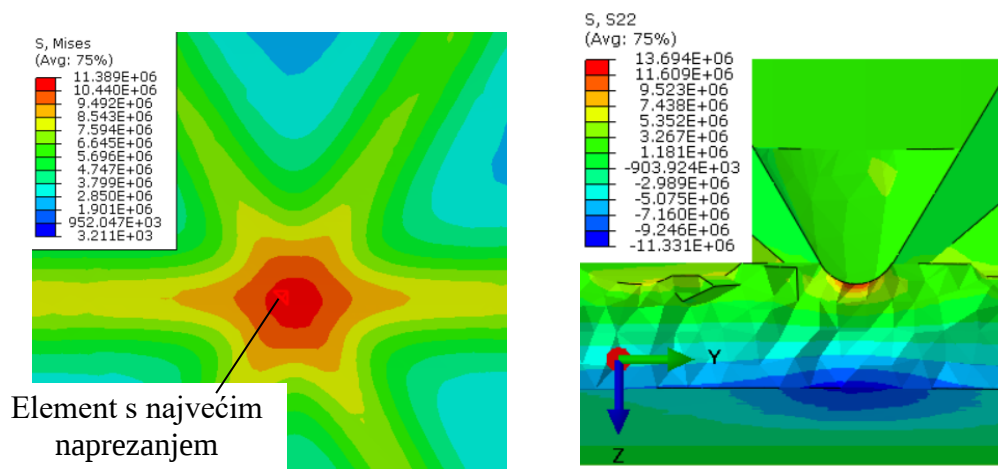
Za kvaziperiodično opterećenje uzimamo 50 % od lomne čvrstoće materijala za zadanu temperaturu te tražena vrijednost naprezanja iznosi:

$$\sigma_{p,75^{\circ}\text{C}} = 0,5 \cdot \sigma_{M,75^{\circ}\text{C}} = 0,5 \cdot 49,5 = 24,75 \text{ MPa} . \quad (6.3.)$$

Iznos najvećeg naprezanja pri radnom pretlaku od 0,015 MPa jest  $\sigma_{\text{radni}} = 10,5 \text{ MPa}$ . Traženi faktor sigurnosti za vrijeme normalnog rada je 2.

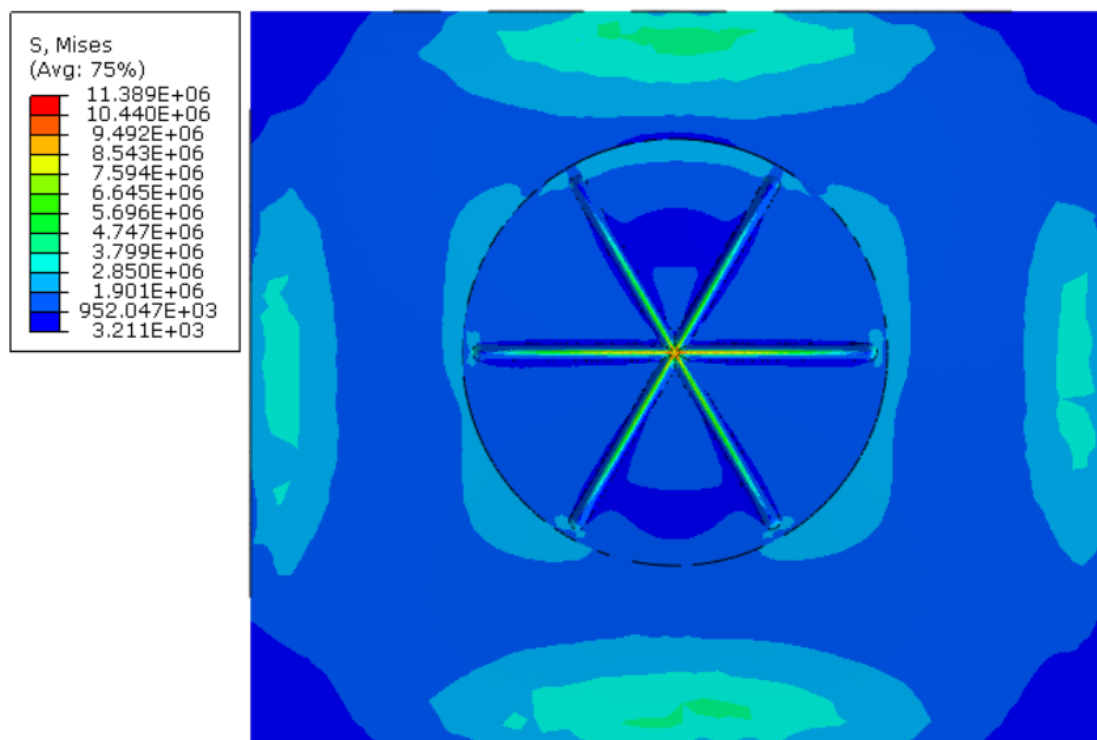
$$S = \frac{\sigma_{p,75^{\circ}\text{C}}}{\sigma_{\text{radni}}} = \frac{24,75}{10,5} = 2,36 > 2. \quad \text{Dizajn zadovoljava traženi faktor sigurnosti.} \quad (6.4.)$$

Detalj područja najvećeg naprezanja s naznačenim elementom najvećeg naprezanja iznosa 10,5 MPa prikazan je na slici 6.11 (lijevo), a raspodjela glavne komponente naprezanja u smjeru osi y po kritičnom presjeku na slici 6.11 (desno).



**Slika 6.11. Položaj najvećeg naprezanja dizajna izrađenog odvajanjem čestica - radni pretlak (lijevo) i raspodjela glavne komponente naprezanja u smjeru osi y po presjeku (desno) u Pa**

Raspodjela naprezanja po modelu u Pa za zadane uvjete i iznos pretlaka od 0,015 MPa prikazana je na slici 6.12.



Slika 6.12. Dizajn izrađen odvajanjem čestica - radni pretlak - raspodjela naprezanja po modelu u Pa

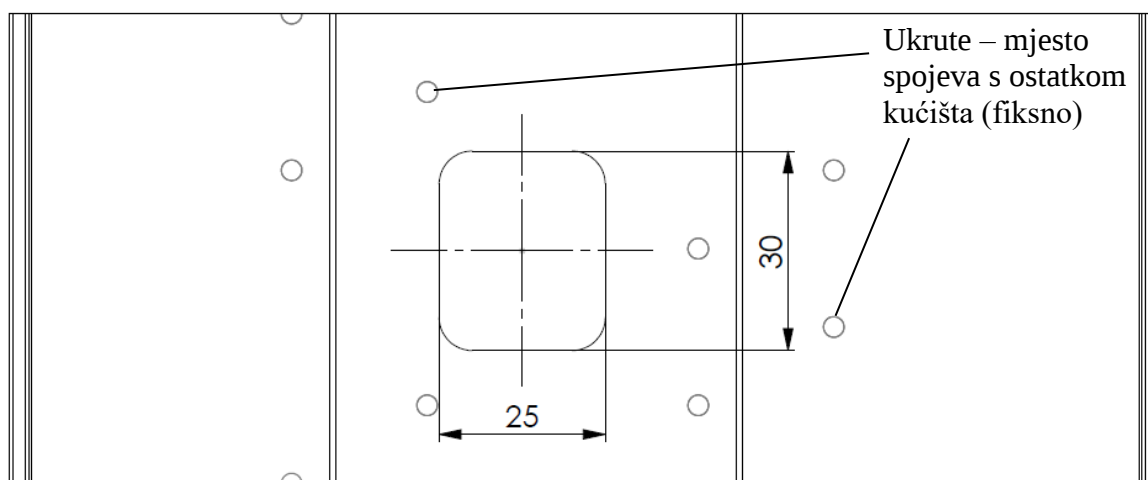
Tablica 6.3. Dizajn oslabljenja izrađen odvajanjem čestica - radni pretlak

|                                        | Pretlak $p$ /MPa | Najveće naprezanje $\sigma$ /MPa | Najveći pomak $\delta$ /mm |
|----------------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------|
| T: 75°C<br>Kvaziperiodično opterećenje | 0,015            | 10,5                             | 0,44                       |

Materijal je veoma osjetljiv na povišenje temperature što se vidi i u samom grafu materijala no dizajn oslabljenja ipak zadovoljava uvjet čvrstoće. Pri radnom pretlaku od 0,015 MPa (0,15 bara) najveće naprezanje se pojavljuje sa stražnje strane modela odnosno s unutarnje strane poklopca kućišta. Zanimljiva je raspodjela glavne komponente naprezanja u smjeru osi y na slici 6.11. (desno). Vidljivo je da je na modelu najveće naprezanje u tlačnom području što znači da je deformacija još uvijek dovoljno mala pa je kritično tlačno naprezanje s unutarnje strane poklopca. Kada se pretlak povećava dolazi do izražaja i lokalno savijanje te se kritično područje prebacuje na vanjsku stranu poklopca i to u vlačno područje. Najveći pomak je 0,44 mm što je veoma zadovoljavajuće s obzirom na ograničen prostor oko kućišta električne baterije.

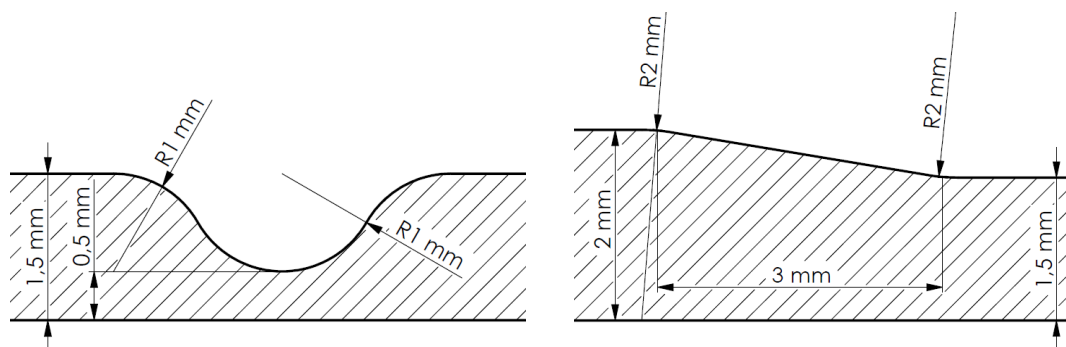
## 6.2. Odabrani dizajn izrađen injekcijskim prešanjem

Dizajn izrađen injekcijskim prešanjem je funkcionalno nešto lošiji od dizajna izrađenog odvajanjem čestica no tehnološki, ekonomski i vremenski znatno je isplativiji kod proizvodnje velikih serija proizvoda. Izrađuje se injekcijskim prešanjem zajedno s poklopcem u istom kalupu te je u već postojećoj proizvodnji poklopca potrebno samo jednu stranu kalupa izmijeniti da bi se dizajn izradio. Nije potrebna dodatna obrada nakon prešanja. Međutim, da bi se mogao injekcijski prešati postoje neka geometrijska ograničenja koja dizajn mora poštivati. Ta ograničenja su već navedena i objašnjena u poglavlju 6.2.1. Prijedlog položaja oslabljenja na poklopcu, koji je bez dimenzija zbog autorskih prava, prikazan je na slici 6.13. Orijentacija oslabljenja treba ovisiti o usmjerenju staklenih vlakana u materijalu. Prikazana su i mjesta spojeva s ostatkom kućišta, koji služe kao dodatne ukrute poklopca uz zavare na krajevima.



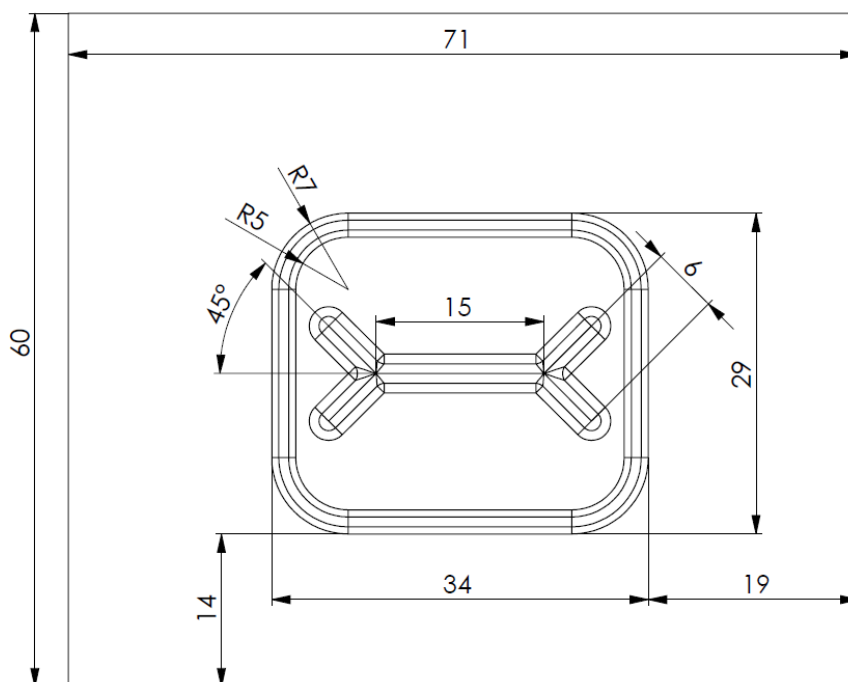
Slika 6.13. Poklopac kućišta baterije s prijedlogom za položaj oslabljenja dizajna „I“

Presjek utora s pripadajućim dimenzijama prikazan je na slici 6.14. (lijevo), a presjek prijelaza s poklopcem na udubljenje s pripadajućim dimenzijama na slici 6.14. (desno).



Slika 6.14. Dimenzije utora (lijevo) i presjek prijelaza s poklopcem na udubljenje (desno) za dizajn izrađen injekcijskim prešanjem

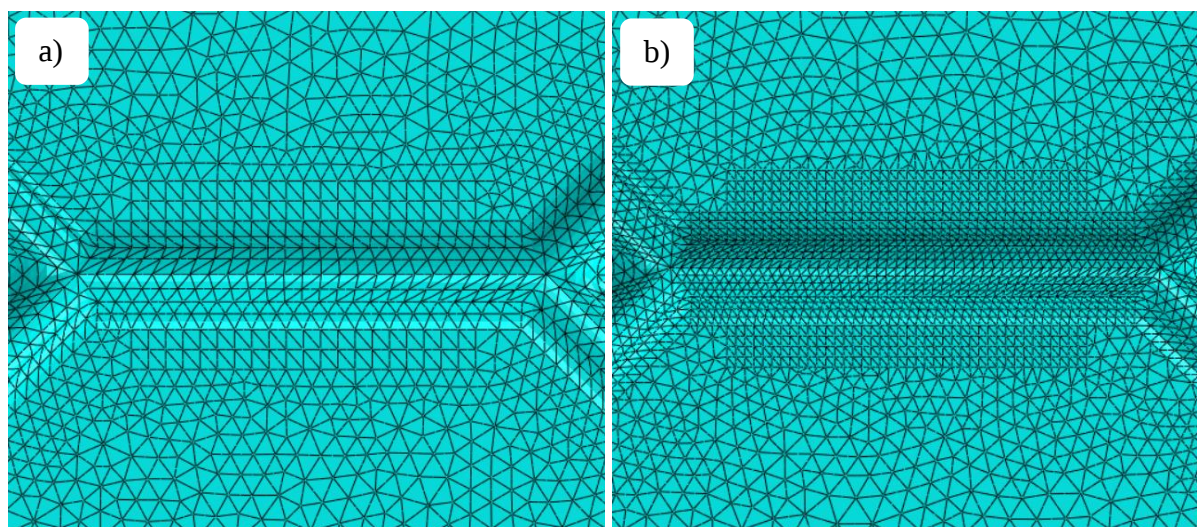
Model na kojem su se radile analize, s dizajnom i pripadajućim dimenzijama, prikazan je na slici 6.15. Debljina modela je 2 mm, a udubljenje oko zareza je dubine 0,5 mm.



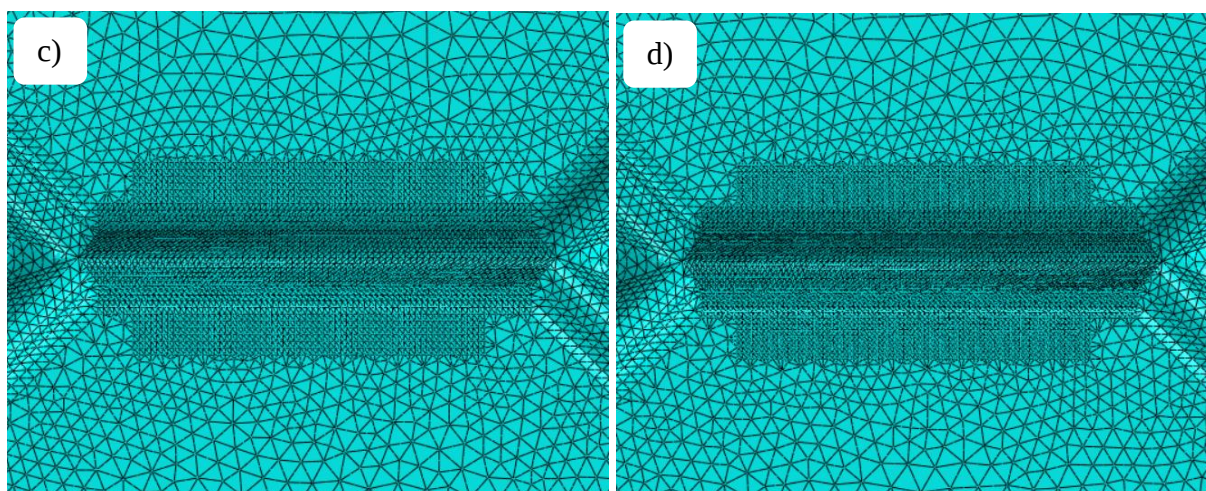
Slika 6.15. Dimenzije i geometrija modela oslabljenja izrađenog injekcijskim prešanjem

### 6.2.1. Konvergencija

Prije analize potrebno je provjeriti konvergiraju li rezultati. Diskretizacija modela s različitim brojem tetraedarskih konačnih elemenata 2. reda prikazana je na slikama 6.16. i 6.17. te će se dalje modeli s različitim brojem konačnih elemenata označavati s a), b) i sl.

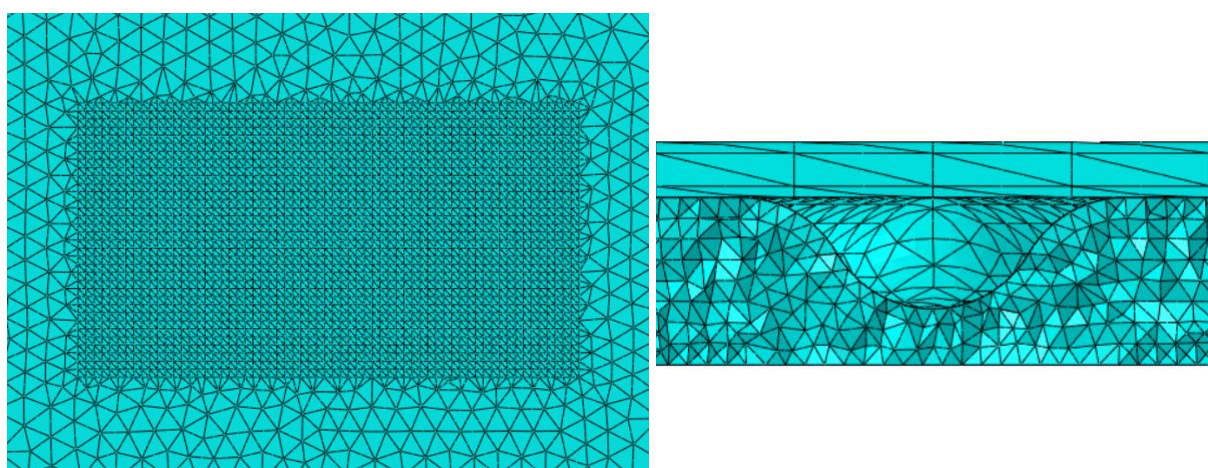


Slika 6.16. Diskretizacija s a) 25807 elementa - aproksimativna veličina elementa je 0,6 mm i b) 54517 elementa – aproksimativna veličina elementa je 0,3 mm



**Slika 6.17. Diskretizacija s c) 103035 elementa - aproksimativna veličina elementa je 0,2 mm i d) 136405 elementa – aproksimativna veličina elementa je 0,175 mm**

Prikazani su detalji diskretiziranog modela na najopterećenijem dijelu, a to je na središnjem zarezu. Gustoća mreže, tj. aproksimativna veličina elementa, se mijenjala samo za najopterećeniji dio modela dok je mreža ostatka modela ostajala nepromijenjena. Na slici 6.18. (lijevo) prikazana je diskretizirana stražnja strana modela na najopterećenijem području. Na tom istom području se također mijenjala gustoća mreže zajedno s najopterećenijem području na prednjoj strani dok je ostatak mreže na stražnjoj strani modela ostajao nepromijenjen. Poprečni presjek mreže na najkritičnijem području za slučaj d) diskretiziran s 136405 konačnih elemenata prikazan je na slici 6.18. (desno).



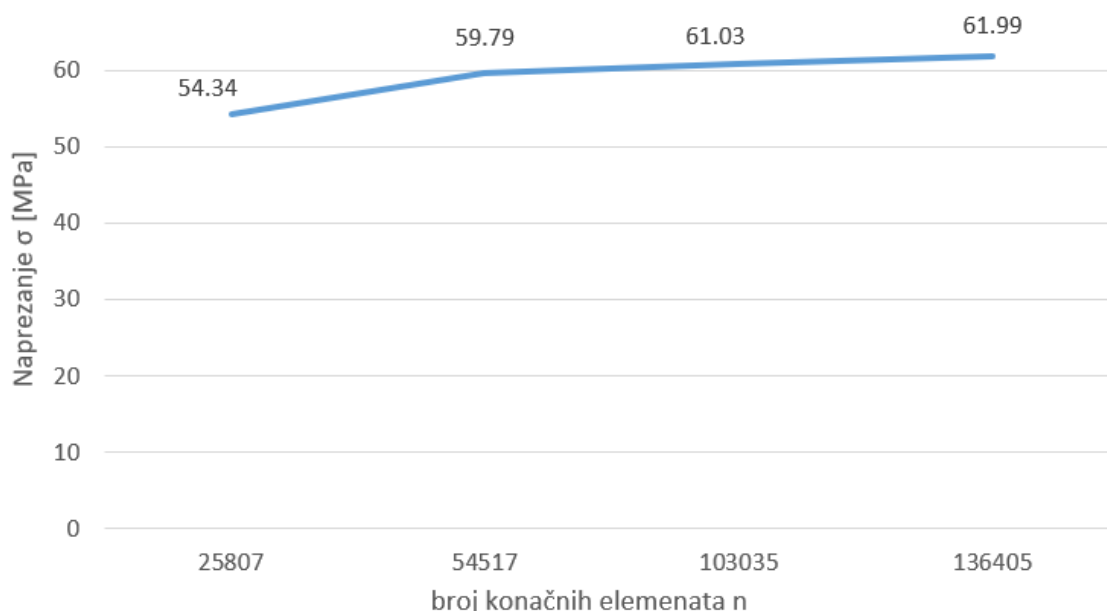
**Slika 6.18. Diskretizirana stražnja strana modela na najopterećenijem području (lijevo); Poprečni presjek mreže na najopterećenijem dijelu (desno)**

U tablici 6.4. prikazani su rezultati različito diskretiziranih modela.

**Tablica 6.4. Konvergencija rezultata naprezanja dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem**

| OZNAKA MODELA | Broj konačnih elemenata | Najveće naprezanje $\sigma$ /MPa |
|---------------|-------------------------|----------------------------------|
| a)            | 25807                   | 54,34                            |
| b)            | 54517                   | 59,79                            |
| c)            | 103035                  | 61,03                            |
| d)            | 136405                  | 61,99                            |

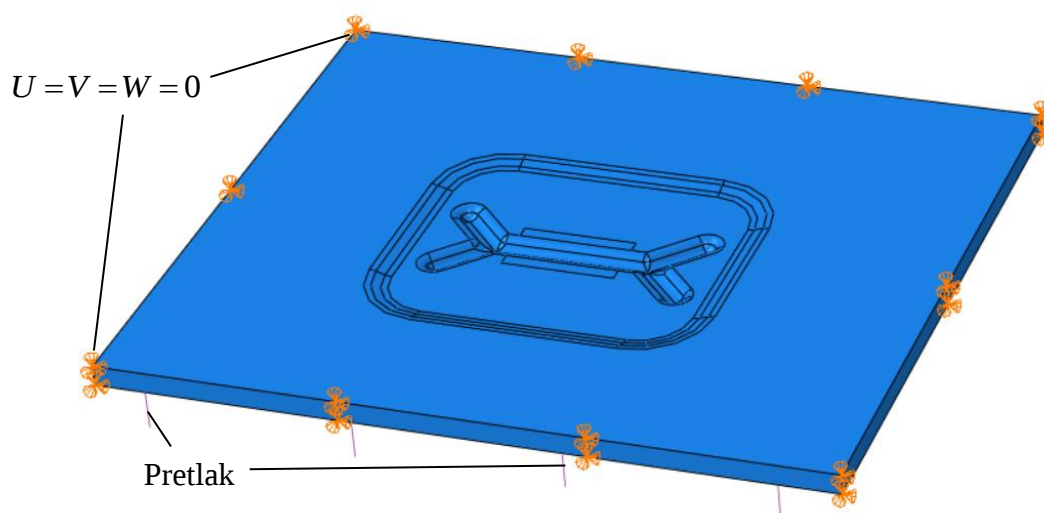
Na slici 6.19. grafički je prikazana konvergencija ekvivalentnog naprezanja prema Von Mises-u u u najopterećenijoj točki modela.

**Slika 6.19. Grafički prikaz konvergencije rezultata dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem**

Grafički prikaz zorno prikazuje konvergenciju rezultata, nagib krivulje između zadnje dvije mreže je sličan nagibu između prethodne dvije mreže, ali je ipak nešto manji po iznosu što znači da rezultati konvergiraju. Razlika u rezultatima između zadnje dvije vrijednosti naprezanja je samo 1,5 % te nije potrebno daljnje proglašavanje mreže. S obzirom na ograničene mogućnosti u vezi kompliciranosti analize te uz preporuku mentora, konačna analiza dizajna oslabljenja izrađenog injekcijskim prešanjem se izvršila na modelu diskretiziranom s 136405 konačnih elemenata.

### 6.2.2. Analiza dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem

Konačna analiza dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem se izvršila također za 2 različita slučaja uvjeta. Materijal je isti, PAGF-13, definiran u poglavlju 2.2. *Materijal kućišta*. Materijal je modeliran kao plastičan te je u tom slučaju analiza nelinearna pa je u koraku *Step* unutar programskog paketa aktivirana opcija *NLGEOM*. Cilj analize je pronaći iznos pretlaka pri kojem dizajn puca za zadani materijal pri temperaturi 20°C i uvjetima mirnog opterećenja te numerička analiza čvrstoće pri radnom pretlaku za temperaturu 75°C i uvjete kvaziperiodičnog opterećenja. Model na kojem su se izvršile analize, uz zadane rubne uvjete, prikazan je na slici 6.20. Diskretizacija najopterećenijeg dijela modela je prikazana u prethodnom poglavlju 6.2.1. *Konvergencija* na slikama 6.17. d) i 6.18.



**Slika 6.20. Model dizajna oslabljenja izrađenog injekcijskim prešanjem s zadanim rubnim uvjetima**

#### 1. slučaj - Pretlak pucanja dizajna pri normalnim uvjetima

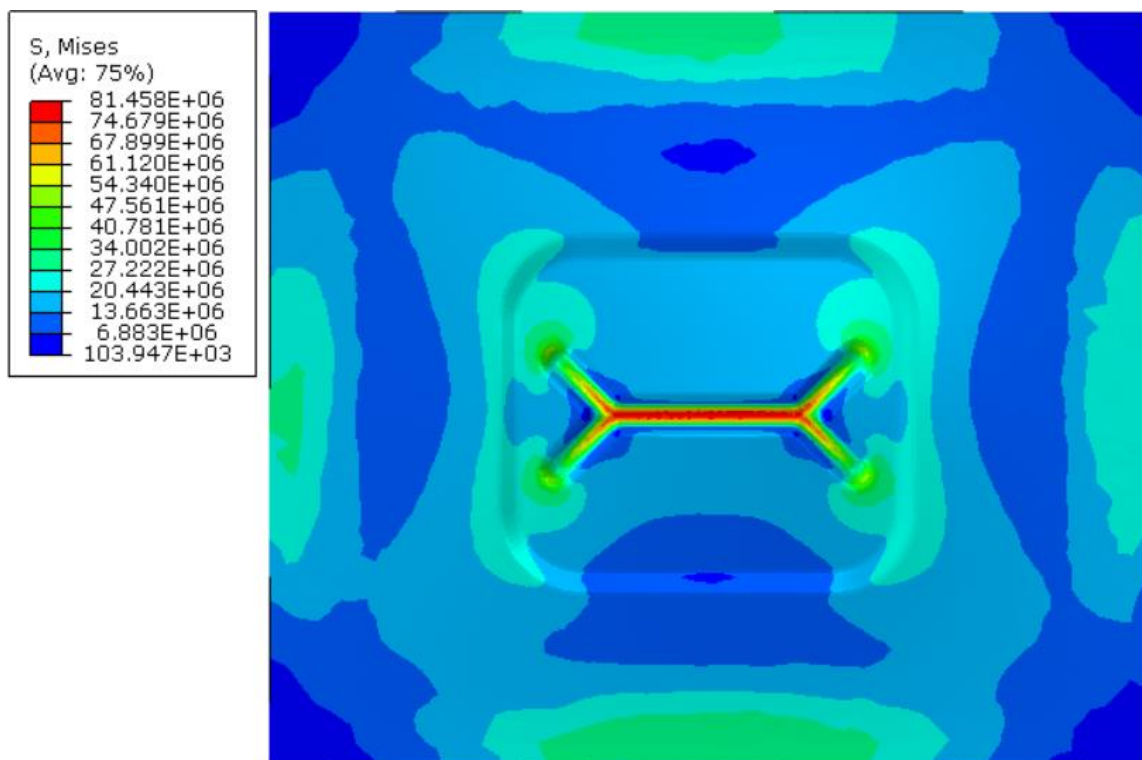
U prvom slučaju uvjeti su:

- Temperatura: 20°C,
- Mirno opterećenje.

Za slučaj mirnog opterećenja iz karakteristike materijala za vrijednost naprezanja pri kojoj dolazi do loma materijala uzima se lomna čvrstoća materijala za odabranu temperaturu. Za temperaturu 20°C ta vrijednost je već izračunata u izrazu (6.1.) te iznosi:

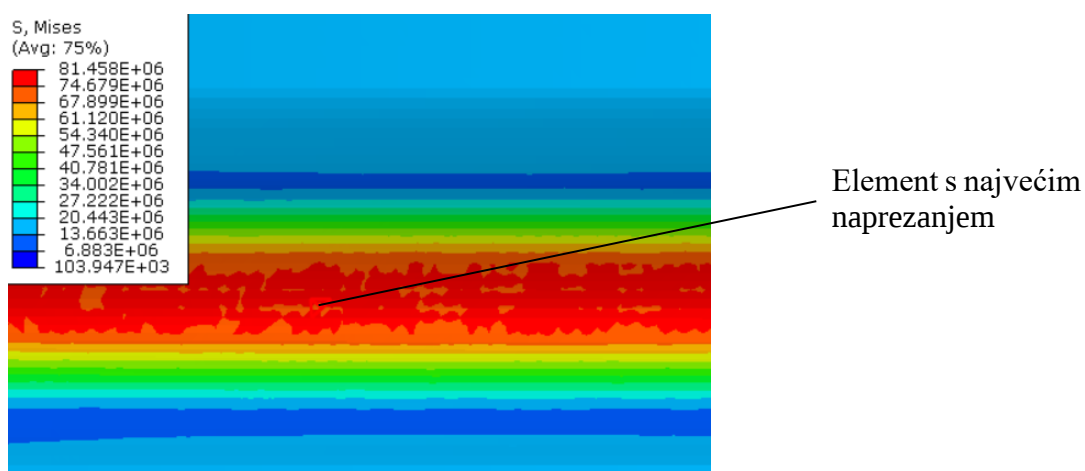
$$\sigma_{M,20^{\circ}\text{C}} = 74,31 \text{ MPa} . \quad (6.5.)$$

Za zadane uvjete, iznos pretlaka kod kojeg dolazi do pucanja jest 0,18 MPa (1,8 bar). Raspodjela naprezanja po modelu u Pa za zadane uvjete i iznos pretlaka od 0,18 MPa prikazana je na slici 6.21.



**Slika 6.21. Dizajn izrađen injekcijskim prešanjem - 1. slučaj - raspodjela naprezanja po modelu u Pa**

Položaj najvećeg naprezanja s istaknutim elementom u kojem se to naprezanje ostvarilo prikazan je na slici 6.22.



**Slika 6.22. Položaj najvećeg naprezanja dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem za 1. slučaj u Pa**

Tablica 6.5. Dizajn oslabljenja izrađen injekcijskim prešanjem - 1. slučaj

|                                              | Pretlak $p$ /MPa | Najveće naprezanje $\sigma$ /MPa | Najveći pomak $\delta$ /mm |
|----------------------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------|
| $T: 20^{\circ}\text{C}$<br>Mirno opterećenje | 0,18             | 74,31                            | 2,37                       |

Pri temperaturi  $20^{\circ}\text{C}$  te uvjetima mirnog opterećenja, dolazi do pucanja dizajna pri pretlaku od 0,18 MPa (1,8 bara). To je ujedno i najveći pretlak koji ovaj dizajn izrađen injekcijskim prešanjem može izdržati. Raspodjela naprezanja po modelu je dobra, ipak nepovoljnija je nego kod dizajna izrađenog odvajanjem čestica, ali razlog tomu je što je sada model opterećen znatno većim iznosom pretlaka. Najveće naprezanje se pojavljuje duž središnjeg zareza. Iako je u ovoj analizi materijal izotropnog karaktera, treba uzeti u obzir da ovakav položaj mogućeg loma je povoljan zbog toka staklenih vlakana koja se nalaze u materijalu. Oblik ovog dizajna oslabljenja ne ometa drastično kontinuiranost staklenih vlakana. Najveći pomak je 2,37 mm što je unutar granica dozvoljenog pomaka od 5 mm.

## 2. slučaj - Radni pretlak u najnepovoljnijim uvjetima

U drugom slučaju uvjeti su:

- Temperatura:  $75^{\circ}\text{C}$ ,
- Kvaziperiodično opterećenje.

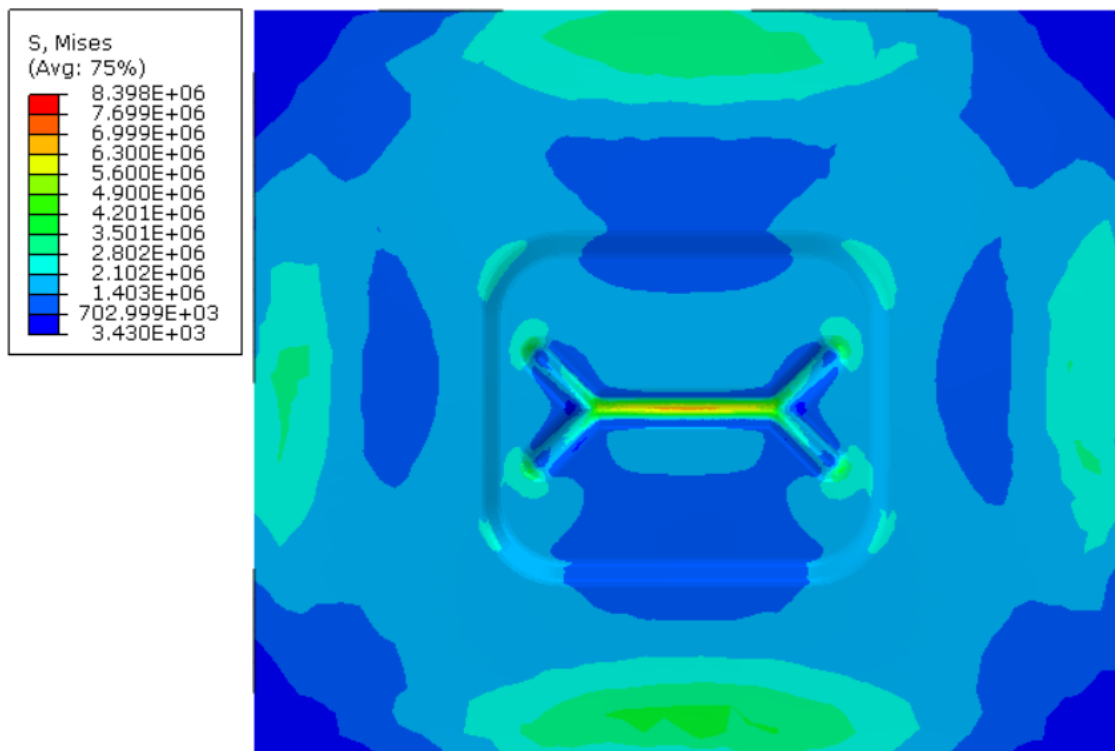
Na redu je provjera čvrstoće oslabljenja pri radnom pretlaku od 0,015 MPa (0,15 bara) u navedenim uvjetima. Za kvaziperiodično opterećenje ponovo se uzima za traženo naprezanje 50 % od lomne čvrstoće materijala za zadanu temperaturu te prema (6.3.) iznosi:

$$\sigma_{p,75^{\circ}\text{C}} = 24,75 \text{ MPa} . \quad (6.6.)$$

Iznos najvećeg naprezanja pri radnom pretlaku od 0,015 MPa za dizajn izrađen injekcijskim prešanjem jest  $\sigma_{\text{radni}} = 7,98 \text{ MPa}$ . Traženi faktor sigurnosti za vrijeme normalnog rada je 2.

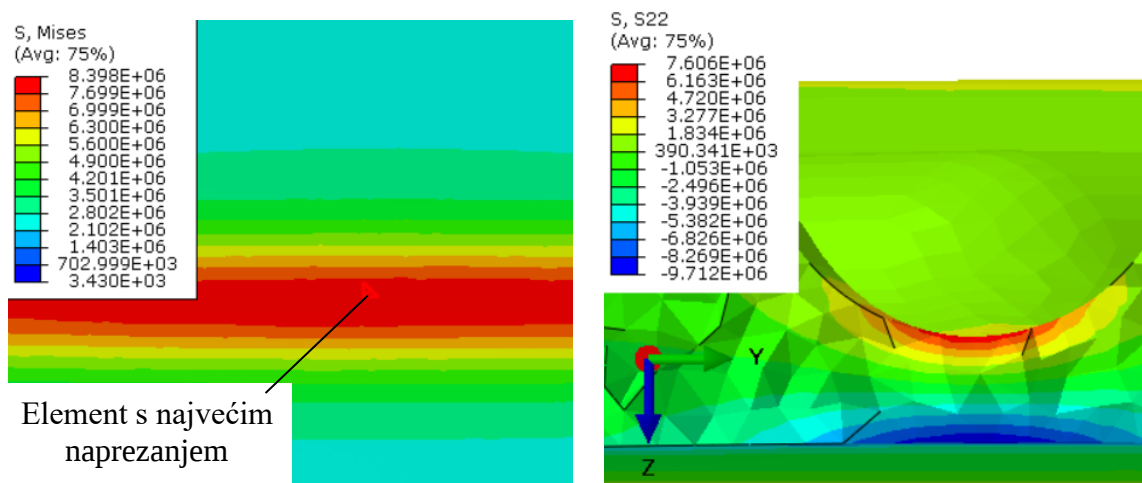
$$S = \frac{\sigma_{p,75^{\circ}\text{C}}}{\sigma_{\text{radni}}} = \frac{24,75}{7,98} = 3,1 > 2 . \quad \text{Dizajn zadovoljava traženi faktor sigurnosti.} \quad (6.7.)$$

Raspodjela naprezanja po modelu u Pa za zadane uvjete i iznos pretlaka od 0,015 MPa prikazana je na slici 6.23.



**Slika 6.23. Dizajn izrađen injekcijskim prešanjem - radni pretlak - raspodjela naprezanja po modelu u Pa**

Detalj područja najvećeg naprezanja s naznačenim elementom najvećeg naprezanja iznosa 7,98 MPa prikazan je na slici 6.24 (lijevo), a raspodjela glavne komponente naprezanja u smjeru osi y po kritičnom presjeku na slici 6.24 (desno).



**Slika 6.24. Položaj najvećeg naprezanja dizajna izrađenog injekcijskim prešanjem - radni pretlak (lijevo); raspodjela glavne komponente naprezanja u smjeru osi y po presjeku (desno) u Pa**

**Tablica 6.6. Dizajn oslabljenja izrađen injekcijskim prešanjem - radni pretlak**

|                                                        | Pretlak $p$ /MPa | Najveće naprežanje $\sigma$ /MPa | Najveći pomak $\delta$ /mm |
|--------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------|
| $T: 75^{\circ}\text{C}$<br>Kvaziperiodično opterećenje | 0,015            | 7,98                             | 0,38                       |

Lomna čvrstoća materijala značajno pada pri povećanju temperature što značajno utječe i na same mogućnosti dizajna no oslabljenje ipak zadovoljava uvjet čvrstoće. U ovim uvjetima dizajn izrađen injekcijskim prešanjem daje bolje rezultate od dizajna izrađenog odvajanjem čestica. Pri radnom pretlaku od 0,015 MPa (0,15 bara) najveće naprežanje se pojavljuje s unutarnje strane poklopca kućišta kao i kod dizajna izrađenom odvajanjem čestica. To ukazuje da je kritično naprežanje i ovaj put u tlačnom području za razliku od očekivanog da će biti u vlačnom području. Kao i kod dizajna izrađenog odvajanjem čestica, s povećanjem pretlaka dolazi do veće deformacije te kritično naprežanje prelazi na vanjsku stranu poklopca, u dno zareza, te tu prelazi u vlačno područje. Najveći pomak je 0,38 mm što je veoma zadovoljavajuće s obzirom na ograničen prostor oko kućišta električne baterije.

### 6.3. Usporedba odabranih rješenja

Usporedba konačnih dizajna za zadane uvjete i pretlak kojim su opterećeni prikazana je u tablici 6.7.

**Tablica 6.7. Usporedba odabranih rješenja**

| MODEL                                 | Uvjeti                                                 | Pretlak $p$ /MPa | Najveće naprežanje $\sigma$ /MPa | Najveći pomak $\delta$ /mm |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Dizajn „zvijezda“ – odvajanje čestica | $T: 20^{\circ}\text{C}$<br>Mirno opterećenje           | 0,1              | 74,31                            | 1,86                       |
| Dizajn „zvijezda“ – odvajanje čestica | $T: 75^{\circ}\text{C}$<br>Kvaziperiodično opterećenje | 0,015            | 10,5                             | 0,44                       |
| Dizajn „I“ – injekcijsko prešanje     | $T: 20^{\circ}\text{C}$<br>Mirno opterećenje           | 0,18             | 74,31                            | 2,37                       |
| Dizajn „I“ – injekcijsko prešanje     | $T: 75^{\circ}\text{C}$<br>Kvaziperiodično opterećenje | 0,015            | 7,98                             | 0,38                       |

Dizajn „zvijezda“ izrađen odvajanjem čestica daje znatno niži iznos pretlaka koji je potreban za pucanje pri standardnim uvjetima (temperatura 20°C i mirno opterećenje) od dizajna „I“ izrađenog injekcijskim prešanjem. Razlika je 44,4 %, a razlog tako velike razlike je puno veće zarezno djelovanje kod dizajna izrađenog odvajanjem čestica. Porast temperature znatno utječe na pretlak pucanja dizajna, ali u jednakoj mjeri za oba dizajna. Pri temperaturi 75°C i radnom pretlaku manje je napregnut dizajn „I“ te tako daje i manji najveći pomak no oba dizajna zadovoljavaju uvjet čvrstoće za kvaziperiodično opterećenje. Iako se u radu materijal uzima kao izotropan, treba napomenuti da je prednost dizajna „I“ i sami oblik dizajna koji ne ometa drastično kontinuiranost staklenih vlakana u materijalu te mu je područje mogućeg loma linijsko te tako i znatno povoljnije s obzirom na tok vlakana.

Dizajn „zvijezda“ izrađen odvajanjem čestica je skuplji i vremenski zahtjevniji dizajn za proizvodnju velikih serija proizvoda no može postići vrlo nizak pretlak pucanja dok je dizajn „I“ tehnološki isplativiji s obzirom da ne mora na dodatnu obradu nakon prešanja, ali daje lošije rezultate u pogledu pretlaka pucanja. Međutim, ako je potrebno mijenjati već postojeći proizvodni ciklus izrade kućišta električne baterije onda je slanje poklopca na dodatnu obradu odvajanjem čestica ipak bolja opcija nego proizvodnja novog kalupa za injekcijsko prešanje poklopca, posebice za manje serije proizvoda. Ovisno o uvjetima rada, prije svega o vrsti opterećenja i temperaturi, treba odabrati rješenje koje će zadovoljiti potrebe na što bolji način.

## 7. ZAKLJUČAK

U radu je konstruirano te potom i numerički analizirano sigurnosno oslabljenje na kućištu baterije električnog vozila. Model kućišta baterije, kao i svojstva materijala PAGF-13 od kojeg je izrađeno kućište, dala je tvrtka „Rimac Automobili d.o.o.“. Jedan od problema koji se javljaju kod električnih baterija je „toplinski bijeg“. Uslijed „toplinskog bijega“ dolazi do oslobađanja velike količine energije iz baterijskih ćelija te tako nastaje veliki pretlak unutar kućišta baterije. Da bi se taj pretlak sigurno ispustio van, potrebno je izraditi sigurnosno oslabljenje na samom kućištu. Oslabljenje je bilo potrebno izraditi na poklopcu jednog od modula kućišta. Nakon analize postojećih proizvoda na tržištu te postojećih patenata izvršena je analiza različitih dizajna oslabljenja. Dizajni su modelirani u programskom paketu *SolidWorks* te potom analizirani primjenom metode konačnih elemenata u programskom paketu *Abaqus*. Materijal PAGF-13 je modeliran kao plastičan stoga su analize bile u nelinearnom području. U radu su prikazani i međusobno uspoređeni samo oni dizajni oslabljenja koji su pokazivali bolje rezultate od ostalih. Radile su se dvije vrste oslabljenja, jedna izrađena odvajanjem čestica, a druga injekcijskim prešanjem, kao i sami poklopac modula kućišta. Naposljetku, odabrana su dva najbolja dizajna, dizajn „zvijezda“ izrađen odvajanjem čestica te dizajn „I“ izrađen injekcijskim prešanjem. Odabrani dizajni su analizirani na rasponu temperatura između 20°C i 75°C te u uvjetima mirnog i kvaziperiodičnog opterećenja. Prvotno se tražio pretlak pucanja oba dizajna za temperaturu 20°C i u uvjetima mirnog opterećenja, a zatim se provela nelinearna numerička analiza čvrstoće pri radnom pretlaku iznosa 0,015 MPa (0,15 bara), temperaturi 75°C i uvjetima kvaziperiodičnog opterećenja (za kvaziperiodično opterećenje uzima se da maksimalno naprezanje koje se smije dostići je 50 % od vrijednosti lomne čvrstoće materijala za zadanu temperaturu).

Dizajn „zvijezda“ pri mirnom opterećenju i temperaturi 20°C puca pri pretlaku od 0,1 MPa (1 bar) što je znatno niži pretlak pucanja pri standardnim uvjetima rada od dizajna „I“ koji u istim uvjetima puca pri pretlaku od 0,18 MPa (1,8 bara). Razlika u pretlaku pucanja je čak 44,4 %, a razlog tomu je znatno veće zarezno djelovanje kod dizajna „zvijezda“ zbog metode izrade dizajna. Pri najnepovoljnijim radnim uvjetima, temperaturi 75°C i uvjetima kvaziperiodičnog opterećenja, te radnom pretlaku od 0,015 MPa dizajn „I“ daje bolje rezultate, nešto je manje napregnut te daje faktor sigurnosti 3,1 dok dizajn „zvijezda“ u istim uvjetima daje faktor sigurnosti 2,36. Međutim oba dizajna zadovoljavaju uvjet čvrstoće. Iako se u ovom

radu materijal gledao kao izotropan, treba reći da dizajn „I“ znatno manje ometa kontinuiranost staklenih vlakana u materijalu što mu daje značajnu prednost u tom pogledu. Također ima i povoljniji položaj mogućeg loma jer će pukotina nakon početnog loma propagirati linijski samo u dva smjera što je prikladnije s obzirom na tok vlakana u materijalu.

Dizajn „zvijezda“ je skuplji i nešto zahtjevniji za izradu velikih serija proizvoda no ima neke prednosti koje dizajn „I“ nikako ne može postići, kao što je jako niski pretlak pucanja. Ovisno o uvjetima rada, prije svega o vrsti opterećenja i temperaturi, treba odabrati rješenje koje će zadovoljiti potrebe na što bolji način. Potrebno je odabrati točnu poziciju i orijentaciju dizajna na poklopcu, prijedlog za navedenu poziciju je dan u radu no to treba detaljnije analizirati. Naposljetku treba uzeti u obzir anizotropnost materijala te provjeriti utjecaj pojedinog dizajna na kontinuiranost staklenih vlakana i ima li dizajn povoljan položaj mogućeg loma s obzirom na pružanje staklenih vlakana u materijalu, a zatim sve zajedno testirati u različitim uvjetima kako bi se rezultati ovog rada iskontrolirali. Tek nakon eksperimentalne analize i uključivanja anizotropnih svojstava materijala u analizu može se konačno odabrati najbolji sigurnosni dizajn oslabljenja za poklopac kućišta.

## LITERATURA

- [1] Enciklopedija - Baterija; <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=6252>
- [2] Battery classification; <http://depts.washington.edu/matseed/batteries/MSE/classification.html>
- [3] Different types of batteries and their uses; <https://components101.com/articles/different-types-of-batteries-and-their-uses>
- [4] Rimac Automobili d.o.o.; <https://www.rimac-automobili.com/en/>
- [5] Thermal Runaway; <https://www.batterypoweronline.com/news/thermal-runaway-understanding-the-fundamentals-to-ensure-safer-batteries/>
- [6] Thermal Runaway picture; <https://en.wikipedia.org/wiki/File:ThermalRunaway.png>
- [7] Rupture Disc introduction; <https://www.rembe.com/products/process-safety/rupture-discs-an-introduction/>
- [8] Dalian Duta Technology Safety System Co., Rupture disc; <https://www.dutashop.com/bursting-disc-safety-device/flat-bursting-disc/flat-slotted-bursting-disc.html>
- [9] IEP Technologies, Explosion vents; <https://www.ieptechnologies.com/whats-the-solution/explosion-vents>
- [10] Dassault Systemes Solidworks 2018 x64 Edition; <https://www.solidworks.com>
- [11] Zytel® 70G13HS1L BK031 | PA66-GF13 | DuPont Engineering Polymers; <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Zytel%C2%AE+70G13HS1L+BK031/DuPont+Engineering+Polymers/52/cbd353da>
- [12] Patent US4576303A; <https://patents.google.com/patent/US4576303A/en>
- [13] Patent US3826412A; <https://patents.google.com/patent/US3826412A/en>
- [14] Patent US8193770B2; <https://patents.google.com/patent/US8193770B2/en>
- [15] Patent CA638422A; <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/035916932/publication/CA638422A?q=CA638422A>
- [16] Sorić, J.; Metoda konačnih elemenata, Tehnička knjiga Zagreb, 2004.
- [17] ABAQUS, Abaqus Software: Version 6.14. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE
- [18] ABAQUS, Abaqus Documentation: Version 6.14. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE
- [19] Caelynx; <https://caelynx.com/whats-the-difference-between-c3d10-and-c3d10hs-elements/>
- [20] Femto Engineering, Nonlinear analysis; <https://www.femto.eu/stories/linear-non-linear-analysis-explained/>
- [21] Skupina autora: Inženjerski priručnik IP1 – Temelji inženjerskih znanja, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [22] Dreanque Milling Cutter; <https://www.dreanque.com/milling-cutter/chamfering-and-deburring-end-mills/chamfering-and-deburring-end-mills-for.html>

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc