

Dizajn i proračun mehaničkog čepa za čepljenje cijevi parogeneratora

Obradović, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:235:015350>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ana Obradović

Zagreb, 2016. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Igor Karšaj
Dr. sc. Ante Bakić

Student:

Ana Obradović

Zagreb, 2016. godina.

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

Rad je izrađen u suradnji sa tvrtkom Inetec.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Igoru Karšaju na velikoj pomoći i brojnim konzultacijama tijekom izrade ovoga rada.

Zahvaljujem se dr. sc. Anti Bakiću na prilici za izradu ovoga rada.

Hvala svim mojim prijateljima na razumijevanju i strpljenju za sva moja učenja i povlačenja tijekom svih ovih godina.

Veliko hvala mojoj prijateljici i kolegici Moreni Mihoković za prave riječi u pravo vrijeme, što si mi dala ruku kad se ne bih imala snage sama podići, bezbroj puta tijekom našeg studiranja.

Hvala jednoj posebnoj osobi na pruženoj pomoći prilikom izrade ovoga rada.

Na kraju, najveće hvala mojoj obitelji, mami Nadi, ocu Ivanu, sestrama Martini i Ivani koji su hrabro, strpljivo i sa vjerom u mene prolazili sa mnom kroz ove godine.

I najzaslužnijem dragom Bogu, hvala na snazi i volji.

Ana Obradović



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	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	01-12-2016 Prilog
Klasa:	602-04/16-613
Ur.broj:	15-1703-16-448

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Ana Obradović

Mat. br.: 0067433202

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dizajn i proračun mehaničkog čepa za čepljenje cijevi parogeneratora**
Naslov rada na engleskom jeziku: **Stress analysis of plugging procedure at PWR nuclear power plant steam generator**
Opis zadatka:

Cijevi parogeneratora primarnog kruga nuklearnih elektrana podložne su periodičkom ispitivanju metodom nerazornog ispitivanja. Jedna od metoda je i metoda vrtložnih struja (eng. *Eddy Current*). Cilj ispitivanja je provjera cjelovitosti cijevne stijenke kako bi se spriječilo curenje radioaktivnog medija iz primarnog kruga u sekundarni krug. U slučaju pronalaska oštećenja procijenjenog kao kritično, potrebno je provesti korektivne aktivnosti čepjenja oštećene cijevi, čime se ista uklanja iz upotrebe. U ovoj vrsti parogeneratora dozvoljeno je začepiti najviše trećinu ukupnog broja cijevi, a da parogenerator još uvijek zadrži svoju punu funkcionalnost.

Trenutno na tržištu postoje tri vrste čepova: mehanički, rolani i zavareni čep. Tehnologija mehaničkog čepa uspješno se primjenjuje na VVER tipovima parogeneratora koji imaju unutrašnji promjer cijevi 13 mm.

Tema ovog rada je dizajn i proračun mehaničkog čepa koji bi se primjenjivao na elektranama PWR tipa odnosno na cijevima unutrašnjeg promjera $16,87 \pm 0,15$ mm i vanjskog promjera 19,05 mm (3/4"). Dizajn čepa se treba temeljiti na postojećim čepovima manjeg promjera. Prilikom numeričkog proračuna potrebno je uzeti u obzir i pojavu plastičnih deformacija. Vanjska opterećenja potrebno je prilagoditi mogućnostima postojećeg uređaja za čepljenje.

Dodatne informacije dostupne su prema potrebi.

U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. rujna 2016.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2016.

Predviđeni datumi obrane:
7., 8. i 9. prosinca 2016.

Predsjednica Povjerenstva:

Zadatak zadao:

Izv.prof.dr.sc. Igor Karšaj dr.sc. Ante Bakić

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

UZ

SADRŽAJ

SADRŽAJ	5
POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
1.1 Povijest nuklearnih elektrana [3]	1
1.2 Fizikalne osnove nuklearne fisije [3].....	2
1.3 Nuklearni gorivni ciklus [3]	3
1.4 Vrste nuklearnih elektrana [3]	4
1.5 Nuklearne elektrane sa tlakovodnim reaktorom (PWR) [3].....	6
2. MEHANIKA ELASTO- PLASTIČNIH TIJELA.....	9
2.1 Linearno- elastično ponašanje materijala [4].....	11
2.2 Elastoplastično ponašanje materijala [4], [5], [7].....	12
3. METODA KONAČNIH ELEMENATA [6]	17
3.1 Općenito [6].....	17
3.2 Varijacijska formulacija metode konačnih elemenata [6]	17
3.3 Izoparametarski konačni elementi [6]	20
3.3.1 Dvodimenzijski elementi [6]	20
3.3.2 Trodimenzijski elementi, [6]	23
3.4 Programski paket <i>Abaqus/ Standard</i> [8].....	25
3.4.1 Definiranje kontakta u programskom paketu <i>Abaqus/ Standard</i> [8], [10]	27
4. NUMERIČKI PRORAČUN	32
4.1 Verifikacija	32
4.1.1 Analitički proračun.....	32
4.1.2 Numerički proračun u programskom paketu <i>Abaqus/ Standard</i> [9].....	33
5. NUMERIČKI PRORAČUN POSTUPKA ČEPLJENJA CIJEVI PROMJERA 13 mm ..	36
5.1 Numerički proračun mehaničkog čepa za čepljenje cijevi parogeneratora unutrašnjeg promjera $\phi = 13$ mm :	36
5.1.1 Modeliranje geometrije i mehaničkih svojstava materijala:.....	36
5.1.2 Rubni uvjeti	38
5.1.3 Definiranje kontaktnih površina	39
5.1.4 Zadavanje opterećenja.....	40
5.1.5 Mreža konačnih elemenata	41
5.2 Obrada rezultata.....	42

6. NUMERIČKI PRORAČUN POSTUPKA ČEPLJENJA CIJEVI PROMJERA 16 mm ..	45
6.1 Zadavanje svojstava proračunskom modelu u programskom paketu <i>Abaqus/Standard</i>	45
6.1.1 Modeliranje geometrije i definiranje mehaničkih svojstava materijala:	45
6.1.2 Zadavanje rubnih uvjeta proračunskom modelu	46
6.1.3 Definiranje kontaktnih površina	46
6.1.4 Zadavanje opterećenja	46
6.1.5 Mreža konačnih elemenata	46
6.2 Obrada rezultata.....	47
7. ZAKLJUČAK	50
8. LITERATURA	51

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Postupak fisije	2
Slika 1.2 Tipovi nuklearnih energetske reaktora	5
Slika 1.3 Udjeli pojedinih tipova reaktora u ukupnom broju	6
Slika 1.4 Nuklearna elektrana sa tlakovodnim reaktorom	7
Slika 1.5 Primarni i sekundarni krug.....	7
Slika 2.1 Konvencionalni dijagram rastezanja	9
Slika 2.2 Von Misesova i Trescina ploha tečenja, [5].....	13
Slika 2.3 Izotropno očvršćenje materijala, [5]	14
Slika 2.4 Kinematičko očvršćenje materijala, [5]	15
Slika 3.1 Osnovni tetraedarski konačni element, [6]	18
Slika 3.2 Preslikavanje izvornog elementa u proizvoljni četverokut, [6]	21
Slika 3.3 Osnovni izoparametarski trodimenzijski elementi, [6]	23
Slika 3.4 Heksaedarski element drugog reda	24
Slika 3.5 C3D20R konačni element	26
Slika 3.6 Domena kontakta kod osnovnog kontaktnog algoritma	28
Slika 3.7 Definiranje kontaktnih parova kod algoritma kontaktnog para	28
Slika 3.8 Diskretizacija node- to- surface	29
Slika 3.9 Prikaz node- to- surface i surface- to- surface diskretizacije kontakta	30
Slika 3.10 Načini praćenja kontaktne interakcije (finite/ small sliding)	31
Slika 4.1 Analitički proračun	32
Slika 4.2 Reakcijske sile na tijelo mase m	32
Slika 4.5 Prikaz površine kojoj je dodijeljen kontakt.....	34
Slika 4.6 Proračunski model diskretiziran sa 232 konačna elementa.....	34
Slika 4.7 Prikaz rezultata za mrežu od 232 konačna elementa	35
Slika 5.1 Prikaz proračunskog modela, redom: a) ekspander, b) mehanički čep, c) cijev	36
Slika 5.2 Elastično- linearno očvršćujući materijal.....	37
Slika 5.3 Sklop proračunskog modela.....	38
Slika 5.4 Rubni uvjeti simetrije i pomaka na ekspanderu, mehaničkom čepu i cijevi.....	39
Slika 5.5 Definirani <i>Surface- to- surface</i> kontakt između ekspandera i mehaničkog čepa.....	40
Slika 5.6 Definirani <i>General contact</i> između mehaničkog čepa i cijevi.....	40

Slika 5.7 Prikaz zadanog opterećenja pomakom, iznosa $U_3 = -7$ mm	41
Slika 5.8 Proračunski model diskretiziran sa 39450 C3D20R konačnih elemenata	42
Slika 5.9 Dijagramski prikaz naprezanja u kontaktu mehaničkog čepa i cijevi po njihovoj duljini	43
Slika 5.10 Pojava prvih plastičnih deformacija na mehaničkom čepu promjera 13 mm	43
Slika 5.11 Dijagram sila – pomak za mehanički čep promjera 13 mm.....	44
Slika 6.1 Proračunski model diskretiziran sa 38166 C3D20R konačnih elemenata	47
Slika 6.2 Dijagramski prikaz naprezanja u kontaktu mehaničkog čepa i cijevi po njihovoj duljini	48
Slika 6.3 Pojava prvih plastičnih deformacija na mehaničkom čepu promjera 16 mm	48
Slika 6.4 Dijagram sila- pomak za mehanički čep promjera 16 mm	49

POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Mehanička svojstva čelika	37
---	----

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	površina
\mathbf{B}	-	matrica međusobne ovisnosti deformacije u elementu i pomaka u čvorovima operator rubnih veličina
\mathbf{D}	-	matrica elastičnosti
D_{ijkl}	-	tenzor elastičnosti
E	N/mm^2	Youngov modul elastičnosti
E_T	N/mm^2	tangentni modul elastičnosti
\mathbf{F}	-	vektor koncentriranih sila u čvorovima konačnog elementa
F_S	-	vektor čvornih sila poradi vanjskog površinskog opterećenja
F_{ε_0}	-	vektor čvornih sila koje su posljedica početnih deformacija u elementu
$I_{\sigma_1}, I_{\sigma_2}, I_{\sigma_3}$	-	invarijante tenzora naprezanja
\mathbf{J}	-	Jacobijeva matrica
k	-	materijalno svojstvo
\mathbf{N}	-	matrica funkcije oblika
p	N/m^2	hidrostatički tlak
\mathbf{r}	-	vektor vanjskih čvornih sila
S_{ij}	N/m^2	devijatorski tenzor naprezanja
\mathbf{q}	-	„back stress“ tenzor
\mathbf{u}	-	vektor pomaka
u, v, w	-	komponente pomaka u Kartezijevom koordinatnom sustavu
\mathbf{v}	-	vektor stupnjeva slobode konačnog elementa izotropno očvršćenje

Y	-	Lameove konstante
λ, G	-	deformacija
ε	-	tenzor elastične deformacije
ε_{kl}^{el}	-	tenzor plastične deformacije
ε_{kl}^{pl}	-	inkrement ukupne deformacije
	-	inkrement elastične deformacije
$d\varepsilon_{ij}$	-	inkrement plastične deformacije
$d\varepsilon_{ij}^e$	-	parametar očvršćenja
$d\varepsilon_{ij}^p$	-	konvencionalno naprezanje
κ		
σ_0	N/m^2	tenzor naprezanja
σ_{ij}	N/m^2	Cauchyjev tenzor naprezanja
τ_{ij}	N/m^2	maksimalno tangencijalno naprezanje
τ_{max}	N/m^2	

SAŽETAK

Cijevi parogeneratorskog primarnog kruga nuklearnih elektrana PWR tipa (*eng. Pressurized Water Reactor*), podložne su periodičkom ispitivanju metodom nerazornih ispitivanja, a cilj tog ispitivanja je provjera cjelovitosti cijevne stijenke kako bi se spriječilo curenje radioaktivnog medija iz primarnog kruga u sekundarni krug. Ako se pronađe oštećenje procijeni kao kritično, potrebno je provesti korektivne aktivnosti čepjenja oštećene cijevi, te se oštećena cijev uklanja iz upotrebe dok se oštećenje ne sanira. U ovoj vrsti parogeneratorskog dopušteno je začepiti najviše trećinu ukupnog broja cijevi, kako bi parogenerator još uvijek zadržao svoju punu funkcionalnost. Trenutno na tržištu postoje tri vrste čepova: mehanički, rolani i zavareni čep. Tehnologija mehaničkog čepa uspješno se primjenjuje na PWR tipovima parogeneratorskog koji imaju unutrašnji promjer cijevi $\phi = 13 \text{ mm}$.

U ovom radu je bilo potrebno najprije dobiti numeričku simulaciju postupka čepjenja cijevi postojećim mehaničkim čepom promjera $\phi = 13 \text{ mm}$, te na temelju spomenutog mehaničkog čepa dizajnirati mehanički čep promjera $\phi = 16 \text{ mm}$. Geometrija mehaničkog čepa $\phi = 16 \text{ mm}$ modelirala se na način da su se dimenzije manjeg čepa razmjerno povećale. Usporedbom iznosa naprezanja na kontaktnim površinama mehaničkih čepova i cijevi, donio se zaključak o dizajnu mehaničkog čepa promjera $\phi = 16 \text{ mm}$. Numerički proračun se proveo u programskom paketu *Abaqus/Standard*.

Provedena je verifikacija odabranog izoparametarskog heksaedarskog konačnog elementa drugog reda sa reduciranom integracijom, oznake C3D20R na jednostavnom primjeru gibanja tijela po podlozi, te su uspoređena analitička i numerička rješenja, a nakon toga se išlo u razradu zadane teme.

Ključne riječi: PWR, metoda nerazornih ispitivanja, mehanički čep, C3D20R, *Abaqus/Standard*

SUMMARY

Tube steam generator primary circuit of nuclear power plants PWR type (Pressurized Water Reactor), are subject to periodic testing method of non-destructive testing, and the objective of this test is to check the integrity of the pipe wall to prevent leakage of radioactive media from the primary circuit into the secondary circuit. If found damage assessed as critical, it is necessary to implement corrective actions vaccination damaged pipes, and damaged pipe will be removed from service until the damage is not rehabilitated. In this type of steam generator is allowed to clog up one third of the total number of tubes to the steam generator still maintained its full functionality. Currently on the market there are three types of caps: mechanically, rolling and welded plug. Technology mechanical plug has been successfully applied to the PWR type of steam generator with an 13 mm inside diameter of the pipe.

In this Thesis, it was first necessary to obtain the numerical simulation of the process of vaccination pipes existing mechanical plug with the diameter 13 mm, and based on that, task was to design mechanical plug with diameter 16 mm. The geometry of the mechanical plug modeled in such a way that the size of the smaller plug proportionally increased. By comparing the amount of stress on the contact surfaces of mechanical plugs and pipes, brought to a conclusion about the design of the mechanical plug diameter 16 mm. The numerical calculation was conducted in the software package *Abaqus / Standard*.

We conducted a verification of the selected isoparametric prismatic final elements of the second row with reduced integration, marking C3D20R the simple example of motion of the body on the substrate, and are compared analytical and numerical solutions, and then they went into the development of the given topic.

Key words: PWR, method of non-destructive testing, mechanical plug, C3D20R, *Abaqus / Standard*

1. UVOD

1.1 Povijest nuklearnih elektrana [3]

Osnova prve nuklearne elektrane u Obninsku (1948.) je reaktor sa termičkim neutronima, sa grafitnim moderatorom i hlađenjem s pomoću vode pod tlakom. Reaktor ima nazivnu toplinsku snagu 30 MW. Gorivo je obogaćeni uran, koji sadrži 5% U-235. Ukupno punjenje urana je iznosilo oko 550 kg. Rashladno sredstvo primarnog kruga je voda koja cirkulira kroz reaktor i nalazi se pod tlakom od 100 bara. Voda prolazeći kroz sustav izmjenjivača topline - generatora pare, predaje svoju toplinu vodi sekundarnog kruga. Čitav primarni krug izveden je od nehrđajućeg čelika i smješten je iza biološke zaštite. Voda primarnog kruga zagrijana u kanalima reaktora do temperature 260 - 280°C odlazi u generatore pare. Osam generatora pare (4 para) smješteni su u zaštitnim komorama. Svaki se generator pare sastoji od predgrijača vode, isparivača i pregrijača pare. Voda primarnog kruga iz generatora pare s temperaturom 190°C dolazi u usisni priključak glavne cirkulacijske pumpe, koja osigurava protok vode kroz reaktor od 300 t/h. Voda sekundarnog kruga (kondenzat) dovodi se pojnim pumpama u predgrijač generatora pare i zatim dolazi u isparivač. Para iz isparivača dolazi u pregrijač pare. Kod pune snage elektrane generatori pare proizvode 42 t/h pare s tlakom 12,5 bara, i temperaturom 250 - 260°C. Para se vodi u turbinu. Iz kondenzatora turbine voda ponovo dolazi u generatore pare. Cijelo upravljanje opremom elektrane se vrši s središnjeg pulta.

Elektrana je bila projektirana proizvoditi 5 MW električne snage. Nedugo potom u pogon ulaze i prve nuklearne elektrane u drugim zemljama.

U Velikoj Britaniji je to bila nuklearna elektrana Calder Hall na lokaciji Sellafield (1957.). Njena četiri reaktora tipa *Magnox* bila su hlađena plinom CO₂.

U SAD prva je komercijalna nuklearna elektrana Shippingport (1957.).

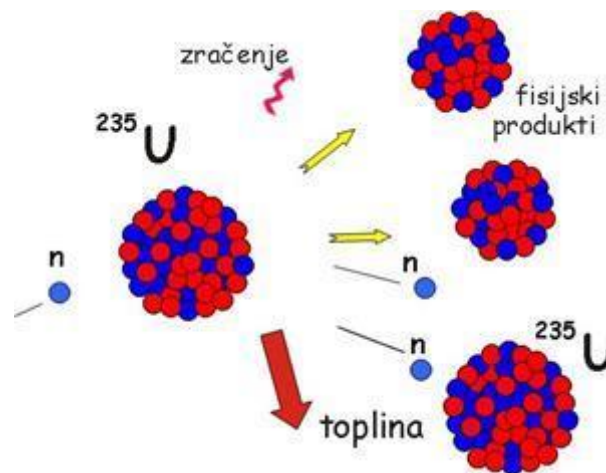
U Francuskoj početkom 1956. ulazi u komercijalni pogon nuklearna elektrana G-1 Marcoule s plinom hlađenim reaktorom. Svi navedeni objekti danas su van pogona, a većina njih razgrađena je.

Kroz razdoblje od trenutka puštanja u pogon prve nuklearne elektrane u svijetu do danas nuklearna energetika se pretvorila u veliku samostalnu granu energetike, stvoreni su različiti tipovi reaktora, a nuklearno gorivo igra sve veću ulogu u energetskej bilanci mnogih zemalja u svijetu. Specifičnost je nuklearne elektrane u odnosu na klasičnu termoelektanu iskorištavanje reaktora kao izvora toplinske energije. Kod nuklearnih elektrana razlikuju se primarno postrojenje, koje se odnosi na reaktor, elemente primarnog kruga i na pomoćne

sustave reaktora, te sekundarno postrojenje, kojemu pripada turbinsko i električno postrojenje elektrane.

1.2 Fizikalne osnove nuklearne fisije [3]

Pod pojmom korištenja nuklearne energije u nuklearnoj energetici podrazumijeva se korištenje energije fisije atoma urana ili plutonija. Atom predstavlja najsitniju česticu kemijskog elementa za koju se do početka prošlog stoljeća smatralo da je nedjeljiva. Kada neutron pogodi tešku atomsku jezgru (najčešće urana, torija ili plutonija) stvara složenu jezgru. Ona je u pobuđenom stanju jer neutron s ulaskom u jezgru oslobađa svoju energiju veze, unosi poremećaj u ravnotežu privlačne nuklearne sile i odbojne elektrostatske, što dovodi do njezinih oscilacija i deformacije. Dolazi do njezina cijepanja i nastaju dva nejednako velika fisijska produkta (novonastale lakše jezgre). Taj proces naziva se fisija.



Slika 1.1 Postupak fisije

Pri svakoj fisiji oslobađa se toplinska energija i emitira ionizirajuće zračenje. U procesu fisije se oko 0,15% mase pretvara u energiju. Jedini fisijski materijal, raspoloživ u prirodi, je prirodni uran. Kod izotopa U-235 oslobođena energija iznosi približno 200 MeV. Pri tome se oslobađaju i dodatna dva do tri brza (fisijska) neutrona prosječne energija oko 2 MeV koji, ukoliko su apsorbirani od drugih fisibilnih jezgara, mogu izazvati nove fisije. Ovaj proces naziva se lančanom reakcijom. Lančana reakcija je samoodržavajuća ako je broj novih fisija nepromjenjiv odnosno samo dio neutrona nastalih fisijama izazivaju nove fisije (dio ih je apsorbiran u drugim materijalima). Fisijski su produkti nestabilni, imaju višak energije, a da bi ostvarili stabilnost dalje se raspadaju pri tom emitirajući dodatne količine toplinske energije (koju se mora odvoditi) i radioaktivnog zračenja (od čijih učinaka se štiti posebnom biološkom zaštitom).

Fisijski fragmenti nastali cijepanjem početne jezgre se, kao pozitivno nabijeni nuklidi,

odbijaju i udaljavaju od mjesta fisije. Kinetička energija tako nastalih fisijskih fragmenata čini značajan dio ukupno oslobodene energije pri fisiji i u konačnici se pretvara u toplinsku energiju u okolnom materijalu. Uvjeti za fisiju nastaju tek kada je oslobodena energija veze uvećana za kinetičku energiju uhvaćenog neutrona veća od točno određenog iznosa energije, nazvanog energija aktivacije. Energija aktivacije je jednaka visini potencijalne jame u kojoj se nalaze pozitivno nabijeni fisijski fragmenti u trenutku razdvajanja. Oslobodena energija veze u slučaju kada izotop U-235 uhvati neutron je veća od odgovarajuće energije aktivacije, dok obratna situacija nastaje kada se neutron apsorbira u izotopu U-238. To praktički znači da je U-235 podložan fisiji s neutronima bez kinetičke energije, dok je za fisiju nuklida U-238 potreban neutron s kinetičkom energijom koja odgovara razlici između energije aktivacije i oslobodene energije veze. Slično kao U-235 ponašaju se i drugi neparni izotopi urana i plutonija - U-233, Pu-239, Pu-241. Ti se izotopi označuju kao fisibilni izotopi. Parni izotopi urana, torija i plutonija - Th-232, U-234, U-236, Pu-240 - pokazuju sličnost s ponašanjem izotopa U-238 (oslobodena energija veze nije dovoljna za izazivanje fisija). Energija se procesom fisije dobiva ako je ukupna masa jezgara nastalih fisijom manja od mase početne jezgre, odnosno, prosječna energija veze u nastalim jezgrama veća je od prosječne energije veze u početnim jezgrama.

U bloku prirodnog urana može se ostvariti samoodržavajuća lančana reakcija uz uvjet da se (brzi) fisijski neutroni uz malo gubitaka uspore do energije termičkih neutrona. Termički neutroni su usporeni neutroni koji se nalaze u termičkoj ravnoteži s okolnim materijalom (imaju energiju reda veličine 0,01 eV).

Drugi značajan nuklearni proces je termonuklearna fuzija lakih jezgara (npr. helija) pri vrlo visokim temperaturama uz oslobađanje velikih količina energije. Nuklearni reaktori koji bi koristili načela fuzije su podmakloj razvojnoj fazi.

1.3 Nuklearni gorivni ciklus [3]

Nuklearni gorivni ciklus skup je aktivnosti kojima se dobiva sirovina za gorivo, izrađuje gorivo, upravlja njegovim korištenjem i brine o iskorištenom gorivu (spremanju, preradi i odlaganju radioaktivnog otpada).

Uran se vadi iz Zemljine kore površinskim i dubinskim iskopom. Uran je u uranskoj rudi pomiješan s drugim mineralima. Stoga se mehaničkim i kemijskim metodama obrađuje, a uranski koncentrat izdvaja se kao oksid U₃O₈, tzv. žuti kolač.

Potom slijedi pretvorba žutog kolača u plin uranov heksafluorid UF₆, što je pripremna faza za obogaćenje. U ovom procesu odstranjuju se nečistoće do potrebnog stupnja nuklearne čistoće

urana. Obogaćenje urana postupak je kojim se povećava sadržaj izotopa U-235 s obzirom na sadržaj prisutan u prirodnom uranu. Prirodni uran sadrži 0,711% izotopa izraženo u masenom sadržaju. Najrašireniji način odvajanja izotopa U-235 temelji se na razlici prosječnih brzina molekula plinovitih UF₆-238 i UF₆-235. Do danas uporabljivi postupci su plinska difuzija, plinska centrifuga, plinska mlaznica, kemijska izmjena, laserska pobuda.

Gorivo ulazi u reaktor u vidu gorivnog elementa sastavljenog od pravilno raspoređenih gorivnih šipki. Osnovni sastavni dijelovi gorivnih šipki su tablete UO₂ i cijevi iz legure cirkonija. Prah oksida urana UO₂ proizvodi se iz UF₆ kemijskim postupcima. Tablete UO₂ dobivaju se sinteriranjem praha pri visokoj temperaturi. Nakon dopreme svježeg goriva u elektranu vizualno se kontroliraju eventualna oštećenja i nakon toga gorivo se smješta u skladište svježeg goriva. Tijekom redovnog remonta vrši se i izmjena goriva - punjenje, vađenje i razmještanje nuklearnog goriva u nuklearnom reaktoru.

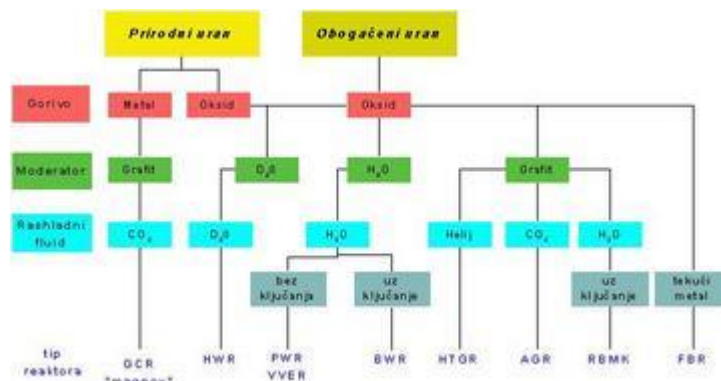
Nakon vađenja iz reaktora istrošeni gorivni elementi smještaju se u bazen za ozračeno gorivo na lokaciji elektrane. Voda u bazenu borirana je radi osiguravanja podkritičnosti, a ujedno omogućuje hlađenje istrošenog goriva (toplina nastaje radioaktivnim raspadom fizijskih produkata i njihovih potomaka) i zaštitu od zračenja. Nakon odležavanja u bazenu istrošeno gorivo može se preraditi u posebnim postrojenjima. Cilj je prerade izdvajanje urana i plutonija sadržanih u nuklearnom gorivu za naknadnu uporabu. Primjerice, u istrošenom gorivu nalazi se 942,5 kg U-238, 8,3 kg U-235 te 8,9 kg izotopa plutonija, po toni svježeg goriva. Istrošeno nuklearno gorivo vrlo je radioaktivno te se procesom upravlja daljinski.

Postupak prerade istrošenog goriva uključuje rezanje gorivnih šipki, odvajanje materijala obloge od gorivnih tableta, otapanje goriva dušičnom kiselinom i odvajanje urana i plutonija ekstrakcijom iz otopine. Preostali dio u otopini su fizijski proizvodi i aktinidi koji se prevode u kruto stanje isušivanjem i postupkom ustakljivanja kako bi se spriječilo njihovo izlučivanje u zemljište i podzemne vode. Staklena masa koja sadrži radioaktivni otpad ulaže se onda u spremnike otporne na koroziju. Ovi spremnici odlažu se u odlagališta visokoradioaktivnog otpada u dubokim i stabilnim geološkim formacijama.

1.4 Vrste nuklearnih elektrana [3]

Pod raznim tipovima nuklearnih elektrana smatraju se različiti tipovi primarnog (reaktorskog) postrojenja. Osnovni materijali prema kojima se nuklearni reaktori razlikuju su nuklearno gorivo, moderator i rashladni fluid. Svrha je nuklearnog goriva proizvodnja toplinske energije procesom fisije. Nuklearno gorivo mogu biti prirodni ili obogaćeni uran u formi metalnog urana ili uran dioksida. Moderator je medij za usporavanje neutrona, a svrha mu je usporiti

neutrone kako bi se povećala vjerojatnost nastanka reakcije fisije u izotopu U-235. Moderatori mogu biti obična voda, teška voda i grafit. Rashladni fluid odvodi toplinsku energiju nastalu raspadom urana i fisijskih produkata. Korišteni rashladni fluidi su: obična voda, teška voda, ugljični dioksid, helij i tekući metal. Sumarni pregled tipova nuklearnih energetskih reaktora s naznakom njihovih materijala nuklearnog goriva, moderatora i rashladnog sredstva prikazan je slikom.

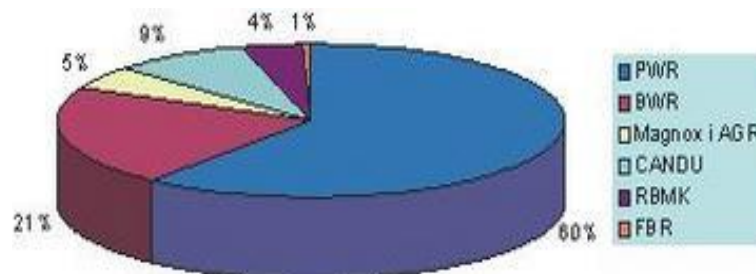


Slika 1.2 Tipovi nuklearnih energetskih reaktora

Slijede tipovi nuklearnih reaktora koji su danas u uporabi:

- **Tlakovodni reaktor** koristi za gorivo oksid obogaćenog urana, a hlađen je i moderiran običnom vodom pod tlakom. U zapadnim zemljama označava se kraticom PWR (eng. *Pressurized Water Reactor*) te u bivšem Sovjetskom Savezu kraticom VVER (rus. *vodo-vodnoj energetičeskij reaktor*). Otprilike 60% svih nuklearnih energetskih reaktora u svijetu su ovog tipa.
- **Kipući reaktor** također koristi isto gorivo, moderator i rashladno sredstvo, ali voda ključa. Danas je udio ove vrste u broju energetskih reaktora oko 20%.
- **Teškovodni reaktor** koristi oksid prirodnog ili obogaćenog urana, hlađen je i moderiran teškom vodom s tlakom vode višim od tlaka zasićenja (nema ključanja). Kratica za reaktor je HWR (engl. *Heavy Water Reactor*).
- **Plinom hlađeni reaktor** poznat je u dvije generacije:
 - Prvi, poznat još pod nazivom *Magnox* (ime prema leguri magnezija koja se rabi kao materijal za oblogu gorivne šipke), moderiran je grafitom, hlađen ugljičnim dioksidom, a gorivo je metalni prirodni uran. Kratica mu je GCR (engl. *Gas Cooled Reactor*).
 - Druga, naprednija generacija, obilježena kraticom AGR (engl. *Advanced Gas Reactor*) bitno se razlikuje od prve po izvedbi, obloge gorivnih šipki su od nehrđajućeg čelika, a gorivo je oksid obogaćenog urana.

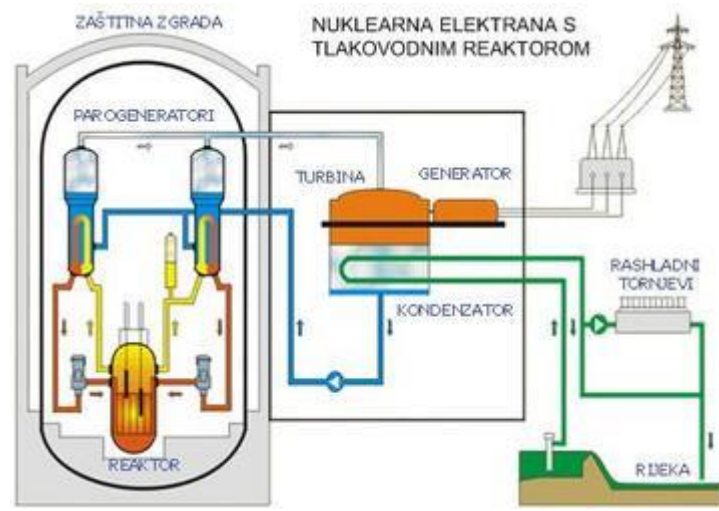
- **Reaktor moderiran grafitom i hlađen kipućom vodom**, oznake RBMK, građen je samo u bivšem SSSR. Gorivo mu je oksid obogaćenog urana.
- **Visokotemperaturni reaktor**, za koji je uvedena kratica HTGR (engl. *High Temperature Gas Reactor*) posljednji je korak u razvoju grafitom moderiranih reaktora. Hlađen je helijem, a koristi oksid obogaćenog urana. Svi spomenuti reaktori pripadaju skupini termalnih reaktora što znači da koriste moderator za termalizaciju neutrona.
- **Brzi oplodni reaktor** nema moderatora, a hlađen je tekućim metalom. Kao gorivo koristi oksid urana višeg obogaćenja ili oksid plutonija, a kao oplodni materijal prirodni uran. Oplodni materijal je U-238 pri čemu nakon reakcije uhvata neutrona te nakon dva uzastopna beta-raspada nastaje izotop Pu-239 koji je fisibilan s termičkim neutronima na sličan način kao i U-235. Ova vrsta reaktora omogućuje daleko ekonomičnije korištenje urana u odnosu na termičke reaktore. Njihova uporaba trenutno je manje isplativa, ali će postajati sve aktualnija i konkurentnija sa smanjenjem raspoloživih količina urana i rastom cijena energenata na svjetskom tržištu. Na slici je prikazan udio pojedinih tipova reaktora u ukupnom broju reaktora u svijetu.



Slika 1.3 Udjeli pojedinih tipova reaktora u ukupnom broju

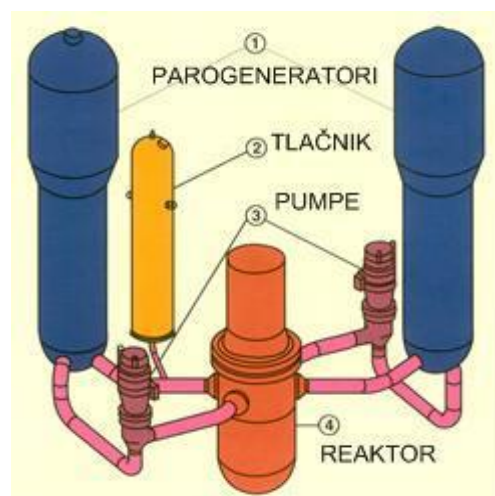
1.5 Nuklearne elektrane sa tlakovodnim reaktorom (PWR) [3]

Zbog njihovih pozitivnih osobina (mali volumen, velika gustoća snage, nije potreban kisik za izgaranje, relativno tihi pogon) prvobitna primjena tlakovodnog tipa reaktora bila je za propulziju plovnih objekata (podmornica, brodova, nosača aviona). Dobra svojstva vode za usporavanje neutrona su njena dostupnost, niska cijena i učinkovito usporavanje neutrona. Nedostaci vode očituju se u relativno velikoj vrijednosti udarnog presjeka za apsorpciju termičkih neutrona u vodik, a s termodinamičkog stajališta i u niskoj temperaturi vrelišta, što zahtijeva primjenu visokog tlaka kako bi se spriječilo ključanje vode pri temperaturama koje još osiguravaju prihvatljiv toplinski stupanj djelovanja kružnog procesa. Primjerice, pri tlaku od 155 bara voda na temperaturi od 320°C ne ključa.



Slika 1.4 Nuklearna elektrana sa tlakovodnim reaktorom

Dobro usporavanje neutrona u vodi dopušta gradnju reaktora s malim volumenom moderatora u jezgri, odnosno s gusto pakiranim gorivnim šipkama čime se postiže velika gustoća proizvedene termičke snage (reda veličine 100 MW/m³). Mali omjer moderacije obične vode ne dopušta pak primjenu prirodnog urana kao nuklearnog goriva, jer se u takvom reaktoru ne bi mogla postići kritičnost. Reaktori s vodom kao moderatorom moraju imati slabo obogaćeno gorivo (3-5%). Nepovoljna strana uporabe obogaćenog urana je u višoj cijeni goriva. Međutim, uporaba obogaćenog urana kao nuklearnog goriva ima i značajnih prednosti. To se prije svega ogleda u mogućnosti ugradnje većeg viška radioaktivnosti u reaktor, što dopušta da se gorivo može izmjenjivati u dužim vremenskim intervalima (od jedne do dvije godine). Time se znatno pojednostavljuje pogon energetskeg objekta i povećava raspoloživost. Nasuprot tome, u reaktorima koji imaju prirodni uran kao gorivo mora se, zbog male reaktivnosti jezgre, kontinuirano mijenjati gorivo tijekom pogona.



Slika 1.5 Primarni i sekundarni krug

Izvedba nuklearne elektrane s tlakovodnim reaktorom zasniva se na principu dvaju odvojenih rashladnih krugova: rashladnog kruga reaktora (primarni krug) i rashladnog kruga parogeneratora (sekundarni krug). Jezgra reaktora izvor je toplinske energije u primarnom krugu elektrane, a čine je gorivni elementi, regulacijske i zaustavne šipke, moderator, rashladni fluid i konstrukcijski elementi. Dakle, svi materijali i sklopovi potrebni za ostvarenje samoodržavajuće lančane reakcije, njenu kontrolu i odvod generirane topline. Veličina jezgre reaktora i broj gorivnih elemenata u njoj ovise o snazi reaktora.

2. MEHANIKA ELASTO- PLASTIČNIH TIJELA

Statičkim vlačnim pokusom utvrđuju se osnovna mehanička svojstva, kao što su: granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, modul elastičnosti, istezljivost, suženje, itd. Vlačni pokus se provodi uređajima, tzv. kidalice na kojima se ispitni uzorak kontinuirano vlačno opterećuje do loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje ispitnog uzorka te se pisačem grafički registrira dijagram sila (F) – produljenje (Δl). Veličine iz dijagrama sila-produljenje preračunavaju se u konvencionalno naprezanje (σ_0)

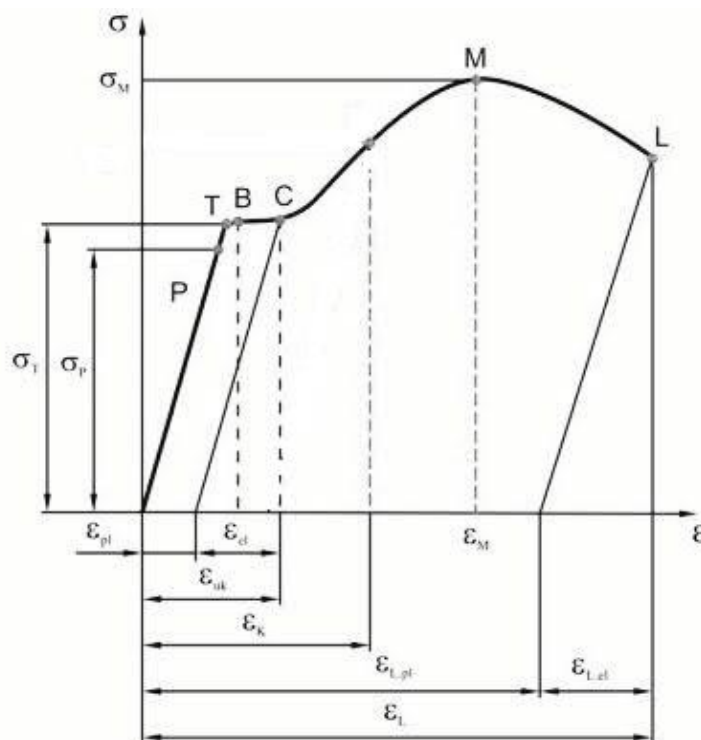
$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0}, \quad 2.1$$

i deformaciju (ε)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad 2.2$$

gdje je A_0 početna površina epruvete, a l_0 početna duljina epruvete. [2]

Dijagram koji slijedi iz spomenutih veličina se naziva konvencionalni dijagram rastezanja i prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1 Konvencionalni dijagram rastezanja

Dijagram počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hookeovim pravcem i za koji vrijedi Hookeov zakon

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad 2.3$$

Što je modul elastičnosti E veći, za isto istežanje ε bit će potrebno veće naprežanje σ , odnosno nagib Hookeovog pravca bit će strmiji. Svako naprežanje u području u kojem vrijedi Hookeov zakon izaziva samo elastičnu deformaciju (istežanje) pa nakon rasterećenja deformacija iščezava.

- točka P predstavlja granicu proporcionalnosti σ_p do koje vrijedi linearni odnos naprežanja i deformacija. Ako je $\sigma \leq \sigma_p$, vrijedi Hookeov zakon.
- točka T označuje granicu tečenja σ_T koja predstavlja ono naprežanje kod kojeg se epruveta počinje produljivati bez povećanja naprežanja. Granicu tečenja karakteriziraju dvije vrijednosti, gornja i donja granica tečenja, pa se često taj dio prikazuje kao ploha tečenja (B-C), rasterećenjem iz toga područja zaostaju u materijalu i trajne plastične deformacije ε_{pl} , pa izraz za deformaciju ima sljedeći oblik

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}, \quad 2.4$$

i predstavlja tzv. aditivnu dekompoziciju, koja vrijedi uz pretpostavku malih deformacija. Kod materijala koji imaju kontinuirani prijelaz iz područja elastičnih u područje plastičnih deformacija utvrđuje se konvencionalna granica razvlačenja. To je ono naprežanje koje će nakon rasterećenja ostaviti u materijalu određenu plastičnu deformaciju. Kod konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,01}$ ostaje u materijalu nakon rasterećenja plastična deformacija od 0,01%, dok je kod konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ plastična deformacija 0,2%.

- C – M je područje očvršćenja materijala, povećanjem sile opterećenja, raste i naprežanje σ i deformacija ε .
- točka M predstavlja naprežanje kod maksimalne sile koje se naziva vlačna ili rastezna čvrstoća σ_M do koje se materijal ponaša stabilno. σ_M nije maksimalno naprežanje, jer ploština presjeka epruvete od trenutka postizanja maksimalne sile počinje se naglo smanjivati pa stvarno naprežanje, unatoč smanjenju sile, raste. Vlačna čvrstoća je osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema svojoj mehaničkoj otpornosti.
- točka L označuje naprežanje kod kojeg dolazi do loma epruvete i naziva se konačno ili lomno naprežanje

Dijagrami deformiranja su različiti kada se ispitivanje vlačne čvrstoće provodi za različite temperature. Pri višim temperaturama, materijal se ponaša duktilnije uz smanjenje granice tečenja, dok pri nižim temperaturama materijal postaje krući uz povećanje granice tečenja. [1]

2.1 Linearno- elastično ponašanje materijala [4]

Linearno ponašanje materijala je opisano Hookeovim dijagramom. Linearna veza između tenzora naprežanja σ i tenzora deformacije ε se zapisuje na sljedeći način:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{el}, \quad 2.5$$

gdje je D_{ijkl} tenzor elastičnosti četvrtog reda. Za izotropni materijal, tenzor elastičnosti je simetričan i tada vrijedi:

$$D_{ijkl} = D_{jikl} = D_{ijlk}. \quad 2.6$$

Ovisnost tenzora elastičnosti o linearnim konstantama materijala može se prikazati jednadžbom

$$D_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + G (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}), \quad 2.7$$

gdje su λ i G Laméove konstante, a δ_{ij} Kroneckerov simbol čija je vrijednost jednaka jedan kada je $i = j$, a u ostalim slučajevima je nula. Laméove konstante se mogu zapisati u ovisnosti o modulu elastičnosti i Poissonovom faktoru.

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad 2.8$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Tenzor naprežanja se sastoji od normalnih i tangencijalnih naprežanja koji se može podijeliti na sferni i devijatorski tenzor naprežanja. Kod izotropnih materijala, sferno naprežanje utječe samo na promjenu veličine promatranog elementa, a ne utječe na promjenu oblika. Naziva se još hidrostatički pritisak i zapisuje se kao

$$\sigma_{ij}^0 = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{3} \sigma_{kk} = p. \quad 2.9$$

Devijatorsko naprežanje utječe na promjenu oblika i definirano je izrazom

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - p \delta_{ij}. \quad 2.10$$

Kod plastičnih deformacija se razmatra samo devijatorski dio naprežanja, jer ne dolazi do

promjene volumena, nego samo do promjene oblika.

2.2 Elastoplastično ponašanje materijala [4], [5], [7]

Kada na materijal djeluju sile koje uzrokuju naprezanja veća od granice tečenja, materijal ulazi u plastično područje. Iz konvencionalnog dijagrama rastezanja sa slike 2.1, vidimo da se ukupna deformacija može rastaviti na elastičnu i plastičnu deformaciju, tj. vrijedi izraz

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{el} + \varepsilon_{ij}^{pl}. \quad 2.11$$

Uvrštavanjem jednadžbe (2.11) u jednadžbu (2.5), slijedi

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^{pl}), \quad 2.12$$

gdje je σ_{ij} Cauchyjev tenzor naprezanja, a ε_{ij} Lagrangeov tenzor deformacije koji je jednak sljedećem izrazu

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right), \quad 2.13$$

gdje je u_i vektor pomaka.

Pri jednoosnom stanju naprezanja, materijal ulazi u plastično područje kada se u njemu pojave naprezanja veća od granice tečenja. Pri višeosnom stanju naprezanja, pojavu plastičnih deformacija opisuje funkcija tečenja

$$f = f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^{pl}, \kappa) = 0, \quad 2.14$$

gdje je κ parametar očvršćenja koji ovisi o promjeni plastične deformacije. U šestodimenzionalnom faznom prostoru, u kojem su koordinate osi šest komponenata naprezanja, jednadžba

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^{pl}, \kappa) = 0 \quad 2.15$$

jest implicitna jednadžba zatvorene hiperplohe koja se naziva ploha tečenja. Svako stanje naprezanja u nekoj čestici tijela određeno je jednom točkom u prostoru naprezanja. Ako se ta točka nalazi unutar prostora kojeg omeđuje ploha tečenja, materijal se nalazi u elastičnom području, odnosno ako vrijedi $f < 0$. Materijal se nalazi u plastičnom području ako se točka nalazi na plohi tečenja, tj. ako vrijedi $f = 0$. Točka se ne može nalaziti izvan plohe tečenja, $f > 0$.

Kod izotropnih elastično- idealno plastičnih materijala, odnosno kod materijala kod kojih tijekom plastičnog deformiranja ne dolazi do očvršćenja materijala, funkcija tečenja ovisi

samo o naprezanju

$$f(\sigma_{ij}) = 0. \quad 2.16$$

Kod izotropnih materijala funkcija tečenja ne ovisi o pravcima glavnih naprezanja, nego samo o glavnim naprezanjima

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0. \quad 2.17$$

odnosno

$$f(I_{\sigma_1}, I_{\sigma_2}, I_{\sigma_3}) = 0, \quad 2.18$$

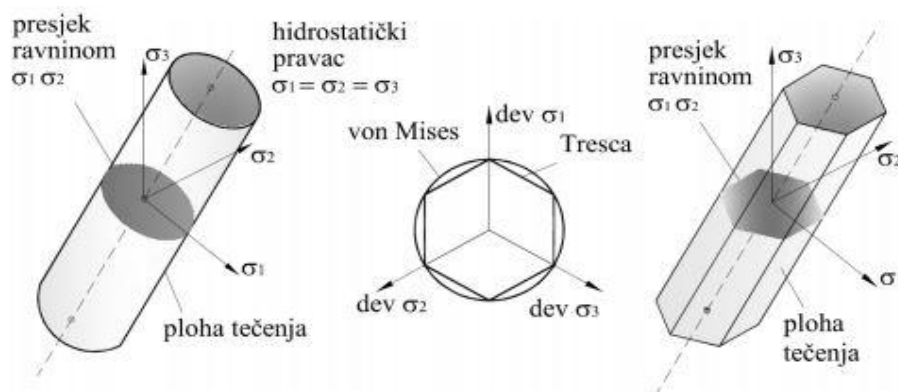
gdje su $I_{\sigma_1}, I_{\sigma_2}, I_{\sigma_3}$ invarijante tenzora naprezanja. Funkcija tečenja izvodi se preko invarijanti tenzora naprezanja koje su jednake

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_{ii}, \\ I_2 &= \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}, \\ I_3 &= \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ik} \sigma_{kl}. \end{aligned} \quad 2.19$$

Mnogi eksperimenti pokazuju da tečenje materijala ne ovisi o hidrostatskom pritisku, zapravo da je potpuno neovisno o prvoj invarijanti tenzora naprezanja. Stoga jednačba (2.18) prelazi u

$$f(I_{\sigma_2}, I_{\sigma_3}) = 0. \quad 2.20$$

Iz jednačbe (2.20) slijedi da posmična naprezanja utječu na pojavu tečenja materijala. Najčešće korišteni kriteriji tečenja materijala su Von Misesov i Trescin kriterij tečenja koji se temelje na posmičnom naprezanju. Na slici 2.2 prikazane su Von Misesova i Trescina ploha tečenja.



Slika 2.2 Von Misesova i Trescina ploha tečenja, [5]

Iz slike 2.2 se može vidjeti da Von Misesova ploha tečenja ima oblik kružnog cilindra i pretpostavlja se da tečenje materijala ovisi samo o drugoj invarijanti tenzora naprezanja, tj. do tečenja materijala će doći ako druga invarijanta dosegne kritičnu vrijednost. Stoga, jednačba (2.20) za Von Misesov kriterij ima sljedeći oblik

$$f(I_{\sigma_2}) = I_{\sigma_2} - k^2 = 0, \quad 2.21$$

gdje je k materijalno svojstvo.

Trescina ploha tečenja ima oblik šesterostrane prizme. Do tečenja materijala dolazi kada naprezanja dosegnu kritičnu vrijednost. Trescin kriterij tečenja se može zapisati u obliku

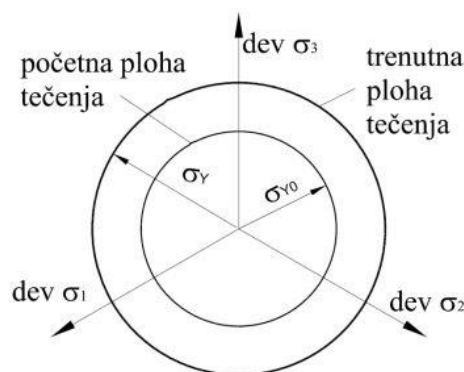
$$f(\tau_{\max}) = \tau_{\max} - k^2 = 0. \quad 2.22$$

Von Misesov i Trescin kriterij tečenja koji su prikazani jednačbama (2.21) i (2.22) odnose se na izotropne materijale.

Kao što je već napisano, stanje naprezanja se ne može nalaziti izvan plohe tečenja materijala $f > 0$, nego kod pojave očvršćenja dolazi do promjene oblika plohe tečenja. Ona se giba i mijenja oblik ovisno o načinu očvršćenja materijala. Za opisivanje mijenjanja položaja plohe tečenja tijekom deformiranja najčešće se koriste dva modela:

- izotropno očvršćenje
- kinematičko očvršćenje

Kod izotropnog očvršćenja, prilikom plastičnog deformiranja ne dolazi do translacije plohe tečenja, nego dolazi do njezinog jednolikog širenja kako prikazuje slika 2.3.

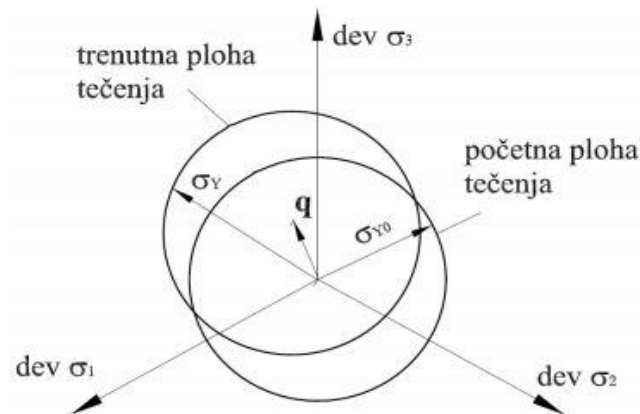


Slika 2.3 Izotropno očvršćenje materijala, [5]

Za slučaj Von Misesovog uvjeta tečenja, izotropno očvršćenje materijala se opisuje izrazom

$$f(I_{\sigma_2}) = I_{\sigma_2} - (k + Y)^2 = 0, \quad 2.23$$

gdje je Y izotropno očvršćenje. Bauschingerov efekt se ne može opisati izotropnim očvršćenjem, nego je potrebno koristiti kinematičko očvršćenje. Ploha tečenja kod kinematičkog očvršćenja giba se kao kruto tijelo bez rotacija i promjene veličine, kao što prikazuje slika 2.4.



Slika 2.4 Kinematičko očvršćenje materijala, [5]

Može se vidjeti sa slike 2.4 da veličina, oblik i orijentacija početne plohe se ne mijenja. Za slučaj Von Misesovog uvjeta tečenja, kinematičko očvršćenje se može opisati izrazom

$$f(\mathbf{S} - \mathbf{q}) - k^2 = 0, \quad 2.24$$

gdje je \mathbf{S} tenzor naprezanja, \mathbf{q} predstavlja tenzor drugog reda koji se naziva tenzor povratnog naprezanja (*back stress*) i on daje koordinate centra trenutne plohe tečenja. Inkrement ukupne deformacije može se zapisati kao zbroj inkrementa elastične i plastične deformacije prema jednadžbi

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p. \quad 2.25$$

Inkrement plastične deformacije može se prikazati pomoću stacionarnog zakona tečenja jednadžbom

$$d\varepsilon_{ij}^{pl} = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad 2.26$$

gdje je $d\sigma$ skalarni faktor proporcionalnosti, odnosno plastični multiplikator, f funkcija tečenja, σ_{ij} tenzor naprezanja. Za slučaj opterećenja u plastičnom području može se napisati konstitutivna jednadžba oblika

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^{ep} d\varepsilon_{kl}^p, \quad 2.27$$

gdje je D_{ijkl}^{ep} elastoplastična konstitutivna matrica materijala koja je jednaka zbroju elastične

konstitutivne matrice D_{ijkl}^e i plastične konstitutivne matrice D_{ijkl}^p .

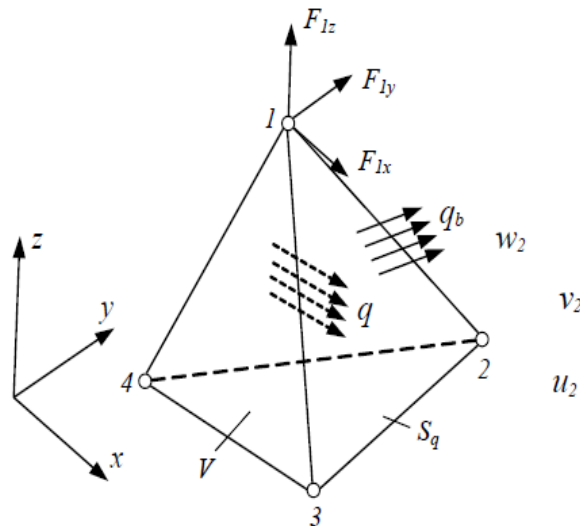
3. METODA KONAČNIH ELEMENATA [6]

3.1 Općenito [6]

Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum sa beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se sa diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Dakle, područje kontinuuma dijeli se na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi, odnosno razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Konačni elementi međusobno su povezani u točkama na konturi koje se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu, kao što je npr. polje pomaka, deformacije, naprezanja, temperature te ostalih veličina u problemu polja, opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, približavanje točnome rješenju raste sa povećanjem broja elemenata. Prilikom izvođenja algebarskih jednadžbi polazi se od definicije jednadžbi koje opisuju stanje u elementu ili se rabi varijacijska formulacija. Nakon izvođenja jednadžbi za konačni element, gdje su nepoznanice neovisne varijable u čvorovima, odgovarajućim postupcima izvode se globalne jednadžbe za diskretizirani model. Pomoću izračunatih čvornih veličina moguće je, primjenom poznatih teorijskih relacija, odrediti sve veličine potrebne za analizu opisanoga kontinuiranog sustava. Ova je metoda nezaobilazna u inženjerskim proračunima. Postoji velik broj računalnih programa temeljenih na ovoj metodi, koji omogućuju analizu konstrukcija bez razmatranja složene teorije koja opisuje fizikalno ponašanje konstrukcije. Budući da je metoda konačnih elemenata numerička metoda sva dobivena rješenja su približna, odnosno realnim vrijednostima može se samo približiti uz pravilan odabir proračunskog modela i uz pravilno odabrane tipove konačnih elemenata. Zbog toga je naročito važno poznavati fizikalno ponašanje konstrukcije koja se analizira te poznavati teorijske osnove konačnih elemenata.

3.2 Varijacijska formulacija metode konačnih elemenata [6]

Jednadžba konačnog elementa za rješavanje problema mehanike deformabilnih tijela najčešće se izvodi pomoću varijacijskih principa.



Slika 3.1 Osnovni tetraedarski konačni element, [6]

Element je po volumenu V opterećen silama koje su opisane vektorom \mathbf{q} . Na površini S_q djeluje opterećenje \mathbf{q}_b , a u čvorovima djeluju koncentrirane sile prikazane vektorom \mathbf{F} . Pretpostavlja se da u elementu vlada početno stanje deformacije $\boldsymbol{\varepsilon}_0$. Ukupna potencijalna energija za prikazani element dana je relacijom:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} dV - \int_V \mathbf{u}^T \mathbf{q} dV - \int_{S_q} \mathbf{u}_s^T \mathbf{q}_b dS - \mathbf{v}^T \mathbf{F}, \quad 2.28$$

gdje prvi član izraza opisuje potencijalnu energiju elastičnog deformiranja u slučaju linearno-elastičnog materijala, drugi član opisuje potencijalnu energiju vanjskih volumenskih sila, a treći član potencijalnu energiju zadanih površinskih sila. Potencijalnu energiju koncentriranih sila koje djeluju u čvorovima elemenata opisuje posljednji član $\mathbf{v}^T \mathbf{F}$.

Element je u ravnoteži kad je varijacija ukupne potencijalne energije jednaka nuli

$$\delta \Pi = \frac{1}{2} \int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} dV - \int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q} dV - \int_{S_q} \delta \mathbf{u}_s^T \mathbf{q}_b dS - \delta \mathbf{v}^T \mathbf{F} = 0, \quad 2.29$$

pri čemu pomaci u elementu moraju biti jednoznačne i kontinuirane funkcije koje zadovoljavaju kinematičke relacije

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}_k \mathbf{u}, \quad 2.30$$

te rubni uvjet pomaka za opterećenu površinu S_q

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{R}_u \mathbf{u}, \quad 2.31$$

gdje je \mathbf{D} matrica elastičnosti, \mathbf{D}_k kinematički diferencijalni operator, \mathbf{R} globalni vektor ukupnih čvornih sila, a \mathbf{u} vektor pomaka.

Raspodjela pomaka u elementu opisana je pomoću funkcija oblika

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{v}. \quad 2.32$$

Uvrštavanjem funkcije oblika u rubne uvjete \mathbf{u}_s , dobivaju se pomaci na rubu u ovisnosti o pomacima u čvorovima

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{R}_u \mathbf{N}\mathbf{v} = \mathbf{N}_s \mathbf{v}, \quad 2.33$$

gdje je

$$\mathbf{N}_s = \mathbf{R}_u \mathbf{N} \quad 2.34$$

matrica funkcija oblika za pomake na površini elementa. Raspodjela deformacije u elementu izračunava se prema formuli

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}_k \mathbf{N}\mathbf{v} = \mathbf{B}\mathbf{v}. \quad 2.35$$

Jednadžbu konačnog elementa

$$\mathbf{k}\mathbf{v} = \mathbf{r}, \quad 2.36$$

možemo napisati u obliku

$$\mathbf{k}\mathbf{v} = \mathbf{F}_{\varepsilon_0} + \mathbf{F}_V + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}, \quad 2.37$$

gdje je matrica krutosti

$$\mathbf{k} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV. \quad 2.38$$

$\mathbf{F}_{\varepsilon_0}$ je vektor sila koje su posljedica početnih deformacija u elementu

$$\mathbf{F}_{\varepsilon_0} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dV, \quad 2.39$$

\mathbf{F}_V i \mathbf{F}_S su vanjske sile poradi vanjskog volumena i površinskog opterećenja

$$\mathbf{F}_V = \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{q} dV, \quad 2.40$$

$$\mathbf{F}_S = \int_{S_q} \mathbf{N}_s^T \mathbf{q}_b dS. \quad 2.41$$

Iz toga se lako zaključuje da je

$$\mathbf{r} = \mathbf{F}_{\varepsilon_0} + \mathbf{F}_V + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}. \quad 2.42$$

3.3 Izoparametarski konačni elementi [6]

Budući da su u ovom diplomskom radu korišteni izoparametarski trodimenzijski konačni elementi, u nastavku teksta bit će ukratko prikazani neki zajednički principi na kojima se temelje svi izoparametarski elementi.

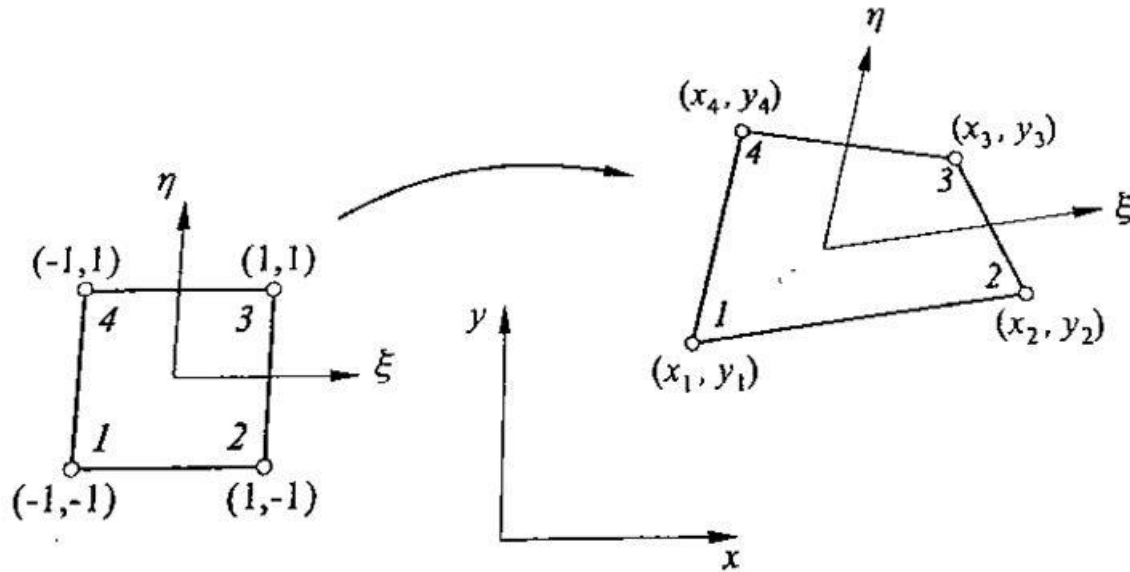
Kako se u praksi često javljaju slučajevi da su površine zakrivljenog i nepravilnog oblika, pokazala se potreba za uvođenjem elemenata nepravilnog oblika koji omogućuju znatno bolje modeliranje složenih geometrija u odnosu na elemente pravilnih geometrijskih oblika. Elementi izrazito pravilnog oblika (trokut, pravokutnik, prizma, tetraedar), nisu pogodni za točno opisivanje zakrivljenih geometrija, tj. potreban je veliki broj ovakvih elemenata da bi se nepravilna geometrija opisala sa dovoljnom točnošću. Povećanjem broja elemenata povećava se i broj jednažbi, što produljuje vrijeme proračuna.

Elemente osnovnih geometrijskih oblika moguće je preslikati, iz lokalnog koordinatnog sustava u različite nepravilne geometrijske oblike s ravnim ili zakrivljenim stranicama u globalnom Kartezijevu koordinatnom sustavu. Osnovni elementi najčešće su opisani u lokalnim prirodnim koordinatama koje se nakon preslikavanja u općem slučaju iskrivljuju, tj. više nisu međusobno okomite ili prelaze u krivocrtne koordinate. Pritom je geometrija elementa u globalnom Kartezijevu koordinatnom sustavu opisana pomoću interpolacijskih funkcija u prirodnim koordinatama. Ako je polje pomaka u elementu opisano pomoću istih interpolacijskih funkcija kao i geometrija elementa, elemente nazivamo *izoparametarskim konačnim elementima*.

3.3.1 Dvodimenzijski elementi [6]

Formulaciju izoparametarskih konačnih elemenata najjednostavnije je objasniti na primjeru osnovnog četverokutnog dvodimenzijskog elementa.

Preslikavanjem izvornog ili referentnog elementa (kvadratni element čiji su vrhovi opisani jediničnim koordinatama) u Kartezijev globalni koordinatni sustav moguće je dobiti proizvoljan četverokutni element, slika 3.2. Ako izvorni element ima više čvorova duž stranica, moguće je ravne prirodne koordinate ξ, η preslikati u krivocrtne koordinate u globalnom koordinatnom sustavu koje opisuju element sa zakrivljenim stranicama.



Slika 3.2 Preslikavanje izvornog elementa u proizvoljni četverokut, [6]

Relacije koje povezuju prirodne i globalne Kartezijeve koordinate dane su izrazima:

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) x_i, \\ y &= \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) y_i, \end{aligned} \quad 2.43$$

gdje su x_i i y_i Kartezijeve koordinate i -tog čvora, ξ i η prirodne koordinate, a $N_i(\xi, \eta)$ interpolacijska funkcija oblika za čvor i dana izrazom $N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)$. Za nju vrijedi da je $N_i(\xi_i, \eta_i) = 1$ i $N_i(\xi_j, \eta_j) = 0$ za $j \neq i$.

Polje pomaka opisuje se pomoću istih interpolacijskih funkcija na sljedeći način:

$$\begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) u_i, \\ v &= \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) v_i, \end{aligned} \quad 2.44$$

gdje su u i v komponente pomaka u pravcu globalnih kartezijevih koordinatnih osi, a u_i i v_i pomaci su u i -tom čvoru konačnog elementa.

Matrica deformacija- pomak:

Računanje matrice krutosti na osnovi teorije elastičnosti provodi se na sljedeći način:

Najprije se definira matrica deformacija – pomak \mathbf{B} pomoću izraza

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{v}, \quad 2.45$$

gdje je $\boldsymbol{\varepsilon}$ tenzor deformacije, a \mathbf{v} vektor stupnjeva slobode konačnog elementa

Nakon toga potrebno je provesti integraciju po volumenu elementa da bi se izračunala matrica krutosti elementa

$$\mathbf{K} = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV. \quad 2.46$$

Relaciju za $\boldsymbol{\varepsilon}$ možemo zapisati i na sljedeći način

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \sum_i \mathbf{B}_i \mathbf{v}_i, \quad 2.47$$

gdje je $\mathbf{v}_i^T = [u_i \quad v_i]$ vektor pomaka u i -tom čvoru, a \mathbf{B}_i pripadna matrica međusobne ovisnosti deformacija u elementu i pomaka u čvorovima.

Pomoću tako zapisanog izraza za $\boldsymbol{\varepsilon}$ dobiva se relacija za ij -ti dio matrice krutosti elementa

$$\mathbf{K}_{ij} = \int_{V_e} \mathbf{B}_i^T \mathbf{D} \mathbf{B}_j dV, \quad 2.48$$

gdje je \mathbf{D} matrica elastičnosti.

Komponente tenzora deformacije za linearne dvodimenzijske probleme definirane su kao

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} \quad 2.49$$

Kako se kod izoparametarskih elemenata polje pomaka opisuje pomoću parametarskih

koordinata ξ, η uz izraz za pomak $u = \sum_i N_{i,x} u_i$, dobiva se za komponentu ε_x sljedeći izraz:

$$\varepsilon_x = \sum_i N_{i,x} u_i = \sum_i \left(N_{i,\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + N_{i,\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) u_i. \quad 2.50$$

Nakon transformacije ostalih komponenata deformacije na sličan način dobiva se

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \sum_i \begin{bmatrix} N_{i,x} & 0 \\ 0 & N_{i,y} \\ N_{i,y} & N_{i,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \sum_i \mathbf{B}_i \mathbf{v}_i, \quad 2.51$$

gdje su derivacije funkcija oblika dane izrazima:

$$\begin{aligned}
 N_{i,x} &= N_{i,\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + N_{i,\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x}, \\
 N_{i,y} &= N_{i,\xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} + N_{i,\eta} \frac{\partial \eta}{\partial y}.
 \end{aligned}
 \tag{2.52}$$

Da bi se dobile potrebne derivacije prirodnih koordinata $\frac{\partial \xi}{\partial x}$, $\frac{\partial \xi}{\partial y}$, $\frac{\partial \eta}{\partial x}$, $\frac{\partial \eta}{\partial y}$, potrebno je prvo definirati tzv. Jacobijevu matricu koja za dvodimenzijске elemente glasi

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix}.
 \tag{2.53}$$

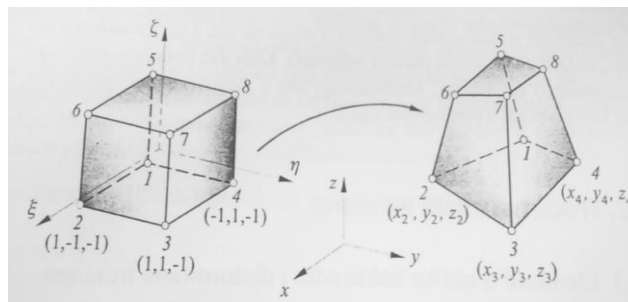
Inverz matrice \mathbf{J} sadrži potrebne derivacije

$$\mathbf{J}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{bmatrix}.
 \tag{2.54}$$

3.3.2 Trodimenzijски elementi, [6]

Izoparametarska formulacija trodimenzijских elemenata analogna je prethodno opisanoj dvodimenzijскоj formulaciji. Za opisivanje geometrije, dvije Kartezijeve koordinate x i y proširuju se trećom koordinatom z . Komponente pomaka u , v i w u pravcu globalnih Kartezijevih koordinatnih osi opisuju polje pomaka. Na taj način, uvođenjem treće dimenzije četverokut prelazi u heksaedar, a trokut u tetraedarski element.

Geometriju heksaedra u globalnom Kartezijevu koordinatnom sustavu moguće je dobiti preslikavanjem izvornog elementa u obliku kocke sa jediničnim koordinatama čvorova iz lokalnog prirodnog koordinatnog sustava ξ, η, ζ kao što prikazuje slika 3.3.



Slika 3.3 Osnovni izoparametarski trodimenzijски elementi, [6]

Relacije koje opisuju geometriju proizvoljnog heksaedarskog elementa sa 8 čvorova sa slike 3.3, jednake su:

$$\begin{aligned}x &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) x_i, \\y &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) y_i, \\z &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) z_i,\end{aligned}\tag{2.55}$$

gdje su funkcije preslikavanja jednake funkcijama oblika osnovnoga prizmatičnog elementa

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i)\tag{2.56}$$

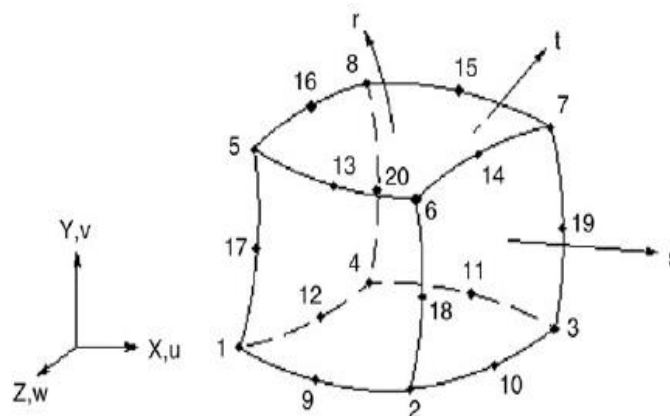
sa koordinatama čvorova ξ_i, η_i, ζ_i .

U skladu s izoparametarskom formulacijom, komponente pomaka u pravcu globalnih Kartezijevih koordinata imaju oblik:

$$\begin{aligned}u &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) u_i, \\v &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) v_i, \\w &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) w_i,\end{aligned}\tag{2.57}$$

gdje su u_i, v_i i w_i pomaci u i - tom čvoru konačnog elementa.

Analogno se izvode heksaedarski elementi višeg reda kojima su plohe u općem slučaju zakrivljene. U ovom diplomskom radu su korišteni heksaedarski elementi drugog reda prema slici 3.4.



Slika 3.4 Heksaedarski element drugog reda

3.4 Programski paket *Abaqus/ Standard* [8]

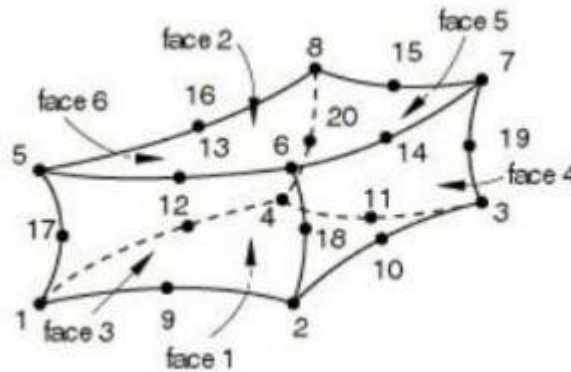
Programski paket *Abaqus* bazira se na metodi konačnih elemenata, a primjenjuje se pri numeričkom rješavanju inženjerskih problema poput toplinskih naprezanja, analize pomaka i deformacija te aerodinamičkih problema kod konstrukcija izrađenih od različitih materijala. *Abaqus* se sastoji od dva osnovna proizvoda: *Abaqus/Standard* i *Abaqus/Explicit*. *Abaqus/Standard* služi za analizu opće namjene linearnih i nelinearnih problema te je korišten za izradu ovog rada. *Abaqus/Explicit* služi za rješavanje problema dinamike sa posebnom formulacijom konačnih elemenata, npr. za analizu kratkih tranzijentnih pojava. *Abaqus/CAE* je interaktivno grafičko sučelje koje služi za kreiranje modela. Modeliranje započinje kreiranjem geometrije (ili importiranjem iste iz nekog drugog programskog paketa). Potom slijedi definiranje i pridruživanje materijalnih svojstava analizirane geometrije. Sljedeći je korak kreiranje geometrijskih rubnih uvjeta (ograničavanje slobode pomicanja modela i neželjenih pomaka), te zadavanje opterećenja pod kojima se konstrukcija nalazi. Nakon definiranih materijalnih svojstava, definiranja rubnih uvjeta i opterećenja, slijedi izrada mreže konačnih elemenata. Odabire se optimalni broj konačnih elemenata te tip elemenata te se potom vrši analiza iz koje se dobivaju potrebni podaci. U programskom paketu *Abaqus* nalaze se razni tipovi elemenata čija svojstva je potrebno poznavati kako bi se pravilno odabrala mreža konačnih elemenata koja će u što kraćem vremenu dati što točnija rješenja. Konačni elementi mogu se podijeliti prema:

- tipu elementa – štapni, gredni, pravokutni, ljuskasti, itd.,
- broju čvorova - prema obliku elementa, prema redu interpolacijske funkcije elementa (prvog i drugog reda),
- stupnjevima slobode – pomak, rotacija,
- vrsti integracije – potpuna ili reducirana.

Za numeričku analizu heksaedarskim elementima odabrani su C3D20R konačni elementi. To su trodimenzijski heksaedarski elementi drugog reda sa reduciranom integracijom. Prednost heksaedarskih konačnih elemenata drugog reda u odnosu na elemente prvog reda je ta što se tijekom numeričke simulacije sa elementima prvog reda mogu pojaviti problemi kao što su „shear locking“, „volumetric locking“ i „hourglassing“. Također, jedan od glavnih kriterija po kojemu su odabrani elementi drugog reda je taj što bolje opisuju područja sa velikom koncentracijom naprezanja i još su pogodniji za opisivanje nepravilnih geometrijskih oblika, odnosno manje elemenata je potrebno za opisivanje zakrivljenih površina.

Za opisivanje krutosti elemenata pomoću reducirane integracije, moguće je integraciju

provesti u manje koraka, dakle koristeći niži red integracije. Reducirana integracija smanjuje vrijeme računanja, što je osobito važno kod trodimenzijskih konačnih elemenata. Primjerice, heksaedarski konačni elementi, oznake C3D20, ima 27 točaka integracije, dok konačni element, korišten u ovom diplomskom radu, C3D20R, ima samo 8 točaka integracije. Na slici 3.5 je prikazan konačni element C3D20R koji je korišten u ovom diplomskom radu.



Slika 3.5 C3D20R konačni element

Element oznake C3D20R je serendipity element drugog reda i ima 20 čvorova od kojih svaki ima po tri stupnja slobode. Funkcije pomaka opisane su nepotpunim polinomom četvrtog stupnja i jedna od tih funkcija ima sljedeći oblik

$$\begin{aligned}
 u = & a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz + a_7xz + a_8xyz + \\
 & + a_9x^2 + a_{10}y^2 + a_{11}z^2 + a_{12}x^2y + a_{13}x^2z + a_{14}y^2x + \\
 & + a_{15}y^2z + a_{16}z^2x + a_{17}z^2y + a_{18}x^2yz + a_{19}xy^2z + a_{20}xyz^2.
 \end{aligned} \tag{2.58}$$

Pomaci v i w izvedeni su na isti način kao raspisana funkcija pomaka (2.58).

Vektor stupnjeva slobode ima oblik:

$$\mathbf{v}^T = [u_i \quad v_i \quad w_i], \quad i = 1, 2, 3, \dots, 20. \tag{2.59}$$

Funkcije oblika kod serendipity tipa elemenata se opisuju različito u čvorovima u vrhu heksaedra u odnosu na čvorove na sredini bridova elementa. Slijedi izraz za funkcije oblika koje se odnose na čvorove u vrhovima heksaedra izvedene u prirodnom koordinatnom sustavu

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i)(\xi\xi_i + \eta\eta_i + \zeta\zeta_i - 2). \tag{2.60}$$

Ako se traži funkcija oblika za rub uvodi se jedna od prirodnih koordinata koja definira taj rub. Izraz ima oblik

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi^2)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i); \xi_i = 0, \eta_i = \pm 1, \zeta_i = \pm 1. \quad 2.61$$

Za ostale rubove se analogno izvode funkcije oblika.

3.4.1 Definiranje kontakta u programskom paketu Abaqus/ Standard [8], [10]

Mehanika kontakta je disciplina koja se bavi promatranjem deformabilnih tijela uslijed statičkog ili dinamičkog dodira s drugim deformabilnim ili krutim tijelom. Trodimenzionalna tijela mogu se dodirivati u jednoj ili više točaka, preko dijela površine, ili pak preko cijele površine tijela. Mehanika kontakta, teorija temeljena na mehanici kontinuuma i materijala, opisuje tlačno naprezanje koje se javlja između dvaju deformabilnih tijela u dodiru, te njihova normalna i tangencijalna naprezanja.

Početak mehanike kontakta obično se veže uz rad Heinricha Hertza u kojem je dano analitičko rješenje kontakta dvaju elastičnih tijela bez pojave trenja. Iako je to dosta pojednostavljen model, on se i danas redovito koristi u inženjerskoj praksi. S obzirom na geometriju i mehanička svojstva materijala deformabilnih tijela u kontaktu, vrlo često kontakti mogu predstavljati izrazito nelinearne probleme i javljaju se trajne plastične deformacije, stoga se kontaktni problemi uglavnom rješavaju numerički.

Fenomen kontakta, kao posljedica geometrije i svojstava materijala svakog deformabilnog tijela, može biti izrazito nelinearan: područja u kontaktu su izrazito kruta (tlak), dok su područja koja nisu u kontaktu izrazito mekana (vlak). Sile međudjelovanja koje se javljaju kada dva tijela dođu u kontakt prenose uneseno opterećenje. Ove sile kontakta su okomite na smjer međudjelovanja, a sile trenja se javljaju duž tangencijalnog smjera međudjelovanja. Nepoznata je međutim, raspodjela naprezanja zbog međudjelovanja, kao i uvjeti kontakta (lijepljenja ili klizanja). Stoga, ispravno računalno modeliranje kontakta je zahtjevna disciplina koja zahtjeva širok spektar znanja i iskustva u navedenom području.

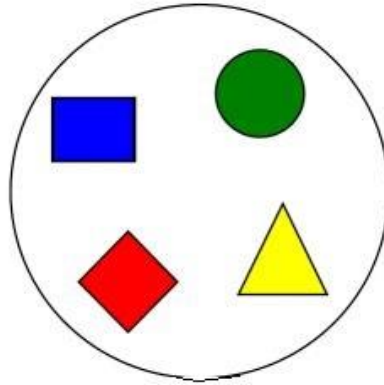
Programski paket *Abaqus* sadrži napredne računске algoritme za rješavanje kontaktnih problema. U nastavku je obrađen kratak osvrt na modeliranje kontakta korištenjem programskog paketa *Abaqus*.

Abaqus/Standard pruža više načina modeliranja kontakta koji omogućuju primjenu kontakta na deformabilna i kruta tijela u statičkim, kvazistatičkim i dinamičkim analizama.

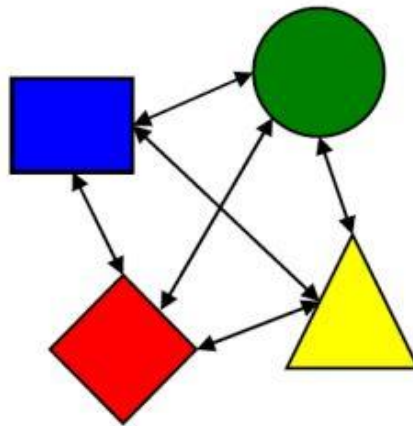
Za modeliranje kontakta u *Abaqus* programskom paketu moguće je definirati sljedeće:

- osnovni kontaktni algoritam (*eng. general contact*), slika 3.6,
- kontaktne parove kod algoritma kontaktnog para (*eng. contact pairs*), slika 3.7

- algoritam kontaktnih elemenata (*eng. contact elements*)



Slika 3.6 Domena kontakta kod osnovnog kontaktnog algoritma



Slika 3.7 Definiranje kontaktnih parova kod algoritma kontaktnog para

Svaki od navedenih pristupa u modeliranju ima svojih prednosti i ograničenja. Osnovni kontaktni algoritam univerzalna je metoda za rješavanje kontaktnih problema gdje je definiranjem jedne opcije (*eng. Interaction*) moguće opisati kontakt dvaju tijela koja zapravo nisu u dodiru. Algoritam kontaktnih parova zahtjeva pažljivije definiranje površina u kontaktu, i nosi mnoge restrikcije za pojedine tipove površina u međudjelovanju.

Formulacija kontakta se temelji na odabiru vrste kontakta, načinu ostvarivanja kontakta i dodjeljivanja *master* i *slave* uloga kontaktnih kontura. Kontaktne konture su granice struktura koje sudjeluju u kontaktu, a to su površine kod trodimenzijskih tijela i ljuski, te rubovi kod kontakata linijskih struktura ili ravninskih dvodimenzionalnih struktura.

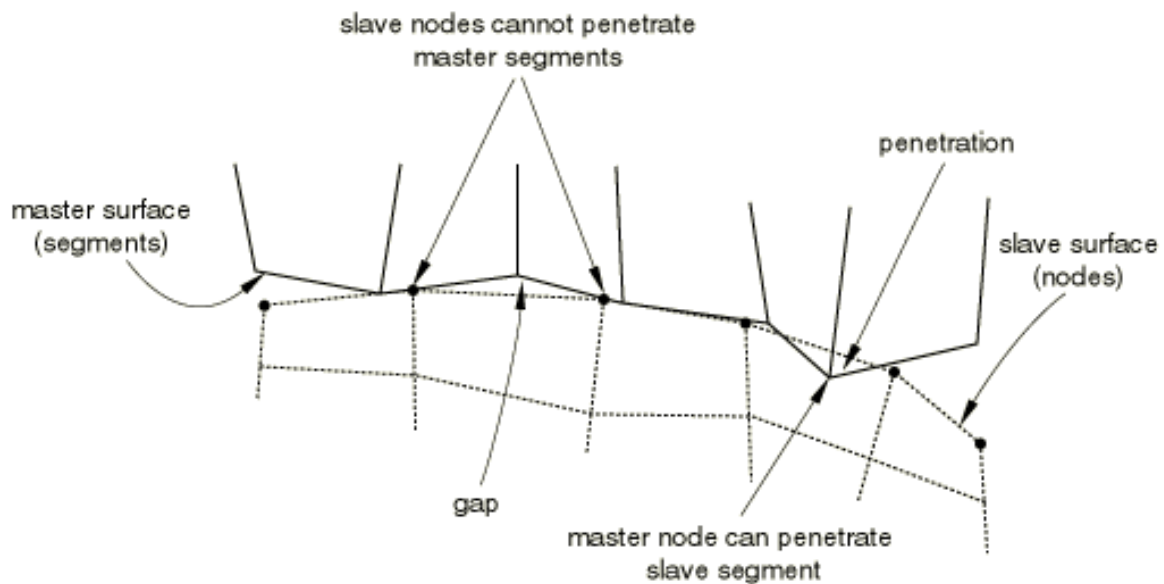
U interakciji dva tijela dodir se ostvaruje preko kontura tih tijela (*eng. contact surface*). U definiciji kontaktne interakcije potrebno je konturama dodijeliti *master* i *slave* uloge. Odabir uloga kontaktnih kontura u kontaktu definira različito ponašanje tijela u kontaktu, što se prvenstveno odnosi na penetraciju čvorova i kontura jednog tijela u drugo.

Abaqus/Standard postavlja uvjetna ograničenja na različitim položajima na kontaktnim

površinama kako bi simuliralo uvjete kontakta. Položaj i uvjeti navedenih ograničenja ovise o diskretizaciji kontakta korištenoj u formulaciji kontakta. Dva načina diskretizacije kontakta su dostupna u programskom paketu *Abaqus*:

- *node-to-surface* diskretizacija,
- *surface-to-surface* diskretizacija

Kod *node-to-surface* diskretizacije kontakta, uvjeti kontakta su uspostavljeni na način da je svaki *slave* čvor s jedne strane dodirne granice u efektivnoj interakciji sa svojom točkom projekcije na *master* konturu na suprotnoj strani dodirne granice. Svaki kontaktni uvjet uključuje jedan *slave* čvor te površinu *master* u svojoj okolini iz kojih su vrijednosti interpolirane na projiciranu točku.

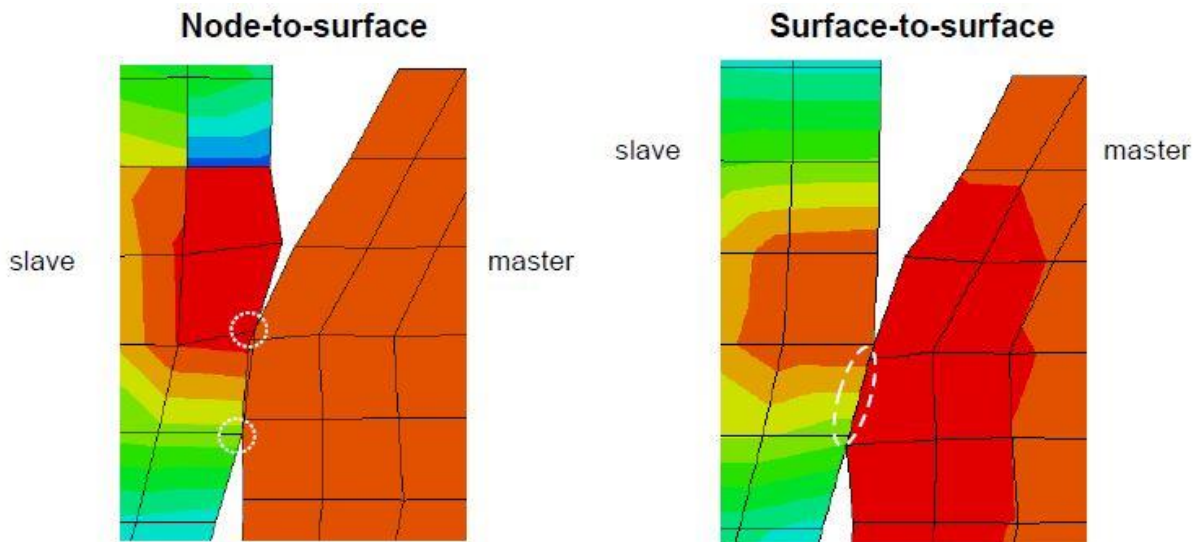


Slika 3.8 Diskretizacija *node-to-surface*

Node-to-surface diskretizacija je određena sljedećim karakteristikama:

- *Slave* čvorovi ne mogu penetrirati u *master* konturu, dok čvorovi *master* konture, u načelu, prodiru kroz *slave* konturu
- Smjer kontakta je određen normalom *master* konture
- Jedina informacija koja je potrebna *slave* konturi je lokacija i površina konture asocirana sa svakim čvorom. Smjer i zakrivljenost *slave* konture nisu bitni. *Slave* kontura može biti definirana kao grupa čvorova (*node-based surface*)
- *Node-to-surface* diskretizacija kontakta može biti korištena i u slučaju da se ne koriste *slave* konture bazirane na čvorovima

Za razliku od *node-to-surface* diskretizacije kontakta, prilikom diskretizacije kontakta *surface-to-surface* opcijom uzima se u obzir oblik i *master*, i *slave* kontura.



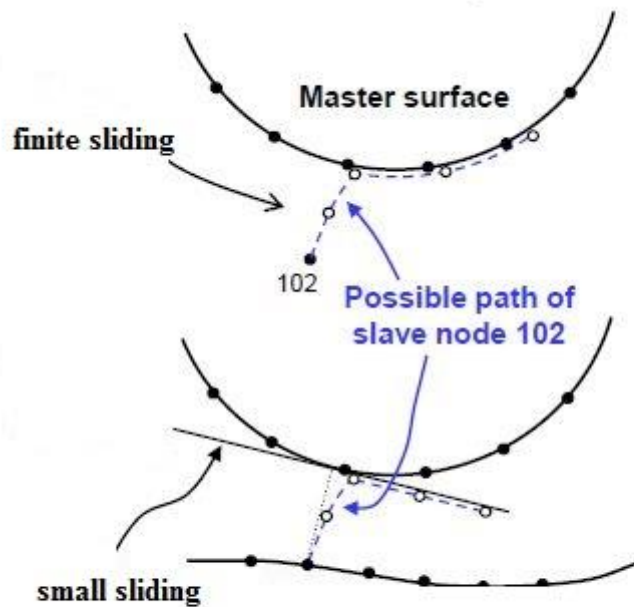
Slika 3.9 Prikaz node- to- surface i surface- to- surface diskretizacije kontakta

Karakteristike *surface-to-surface* diskretizacije kontakta su:

- Uspostavljanje uvjeta kontakta, kod *surface-to-surface* diskretizacije, vrši se na području, odnosno u okolini *slave* čvorova, a ne samo u *slave* čvorovima. Kontakt se uspostavlja podešavanjem područja usmjerenog na *slave* čvorove na način da će ograničenja kontakta biti dominantno pod utjecajem jednog čvora, ali i pod slabijim utjecajem susjednih čvorova. Prilikom ove diskretizacije, u principu, ne dolazi do prodiranja *master* čvorova kroz *slave* konturu iako su minimalni prodori ipak mogući
- Smjer kontaktnih sila je određen smjerom normale *slave* konture u okolini *slave* čvora.
- Prilikom definicije kontaktnog para s konturom definiranom grupom čvorova nije moguće koristiti *surface-to-surface* diskretizaciju kontakta.

Interakcija dviju kontaktnih ploha ili rubova te njihovo relativno gibanje jako ovisi o izboru načina praćenja kontakta. Programski paket *Abaqus* nudi dva načina praćenja kontaktne interakcije, koji su prikazani na slici 3.10:

- konačno klizanje (*eng. finite sliding*)
- kratko klizanje (*eng. small sliding*)



Slika 3.10 Načini praćenja kontaktne interakcije (finite/ small sliding)

Konačno klizanje dozvoljava proizvoljno gibanje kontaktnih površina dok je za mala međusobna klizanja dva tijela u kontaktu, bez obzira na eventualne velike pomake tih tijela, namijenjeno kratko klizanje. Iako ograničeno s obzirom na područje primjene, kratko klizanje pruža brži proračun i veću robusnost simulacije u odnosu na konačno klizanje. Izbor vrste praćenja kontakta nema nikakvih zahtjeva na vrstu diskretizacije kontakta. U programskom paketu *Abaqus*, dodirne interakcije mogu imati definirana razna svojstva koja definiraju utjecaj jednog tijela u kontaktu na drugo. Prema fizikalnim interaktivnim pojavama koje je moguće modelirati, svojstva dodirnih interakcija se može grupirati:

- svojstva mehaničkih kontakata
- svojstva termodinamičkih kontakata
- svojstva električnih kontakata
- svojstva poroznih fluidnih kontakata

Svaka dodirna interakcija, ovisno o fizikalnom modelu, može imati više svojstava kontakata.

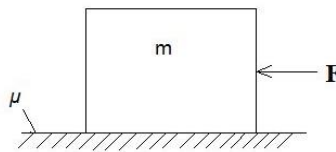
4. NUMERIČKI PRORAČUN

4.1 Verifikacija

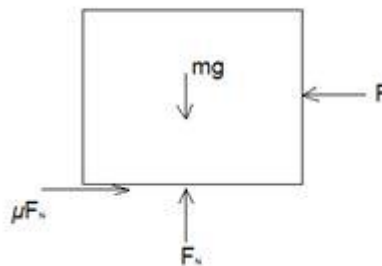
Budući da se u ovome diplomskom radu rješavaju problemi kontakata između dvaju površina, verifikacija se provodi za elemente koji su pogodni za opisivanje kontaktnih problema.

4.1.1 Analitički proračun

Potrebno je odrediti silu kojom se tijelo mase m giba po podlozi čiji faktor trenja iznosi $\mu = 0,4$, a masa tijela je jednaka $m = 1,56$ kg. Zadatak je prikazan na slici 4.1.



Slika 4.1 Analitički proračun



Slika 4.2 Reakcijske sile na tijelo mase m

Uvjet ravnoteže tijela mase m u smjeru osi x :

$$\sum F_x = 0 ; \mu F_N = F$$

Uvjet ravnoteže tijela mase m u smjeru osi y :

$$\sum F_y = 0 ; F_N = G$$

Slijedi iznos sile podloge F_N :

$$F_N = m \cdot g = 15,3036 \text{ N}$$

Iznos sile kojom se tijelo giba po podlozi:

$$F = \mu \cdot F_N$$

$$F = 6,12144 \text{ N}$$

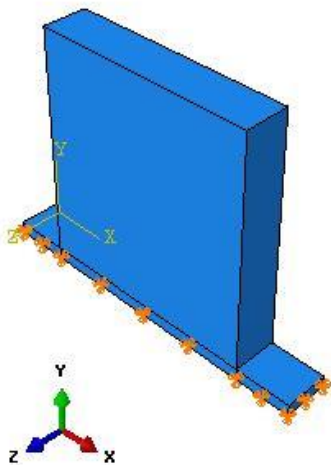
4.1.2 Numerički proračun u programskom paketu Abaqus/ Standard [9]

Spomenuti slučaj će se riješiti i numerički primjenom programskog paketa *Abaqus/ Standard* kako bi se provjerili odabrani izoparametarski heksaedarski konačni element drugog reda sa reduciranom integracijom, oznake C3D20R.

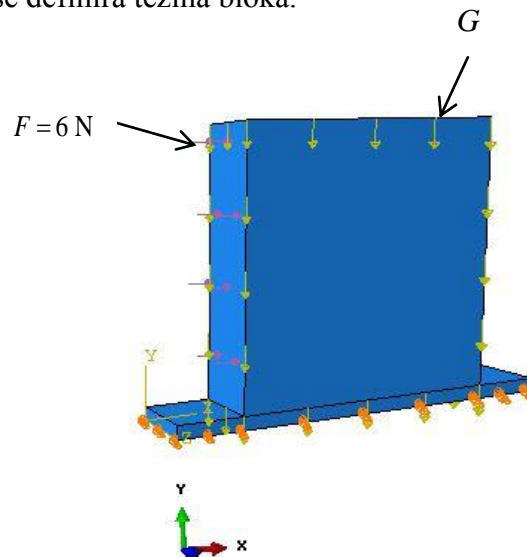
Analitičko rješenje reakcijske sile podloge će se usporediti sa numeričkim rješenjem dobivene reakcije u kontaktu.

Najprije se modelirala geometrija jednog bloka i tanke pravokutne ploče, koja zamjenjuje podlogu iz analitičkog primjera. Bloku su dodijeljena svojstva materijala i to modul elastičnosti, Poissonov koeficijent i gustoća, iznosa $E = 210000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,3$, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$. Dimenzije bloka su odabrane tako da zauzimaju volumen koji će uz zadanu gustoću dati masu koja odgovara masi tijela iz analitičkog proračuna.

Rubni uvjet uklještenja je dodijeljen donjem rubu tanke pravokutne ploče ($U_1 = U_2 = U_3 = 0$) kao što je prikazano na slici 4.3. Slika 4.4 prikazuje opterećenje modelirano pomoću tlaka tako što se zadala ukupna sila (*Total Force*) koja se rapodijelila po prikazanoj površini. Iznos te zadane sile odgovara sili koja je izračunata u analitičkom proračunu, $F = 6 \text{ N}$. Bloku je također zadana gravitacija (*Gravity*), kojom se definira težina bloka.



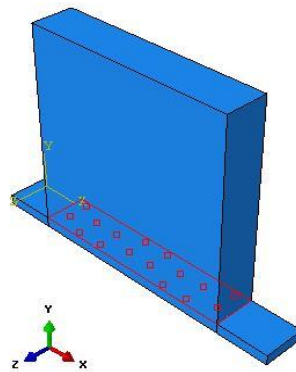
Slika 4.3 Rubni uvjeti



Slika 4.4 Prikaz dodjeljenog opterećenja

U modulu *Interaction* definiran je jedan *Surface-to-surface* kontakt sa konačnim klizanjem (*Finite sliding*). Kontaktu su dodana tangencijalna i normalna mehanička svojstva. Tangencijalna (*Friction*), zadavanjem koeficijenta trenja, $\mu = 0,4$ i normalna mehanička svojstva definiranjem čvrstog kontakta (*Hard Contact*) sa penalty metodom. *Master* površina je dodijeljena donjoj plohi bloka, a *slave* tankoj pravokutnoj ploči, kao što je prikazano na

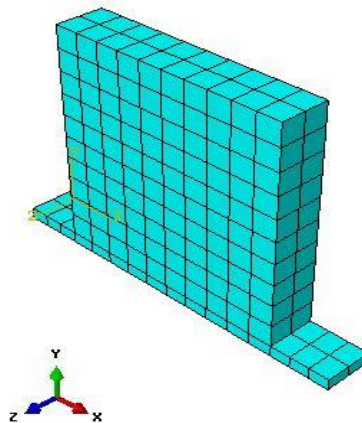
slici 4.5.



Slika 4.5 Prikaz površine kojoj je dodijeljen kontakt

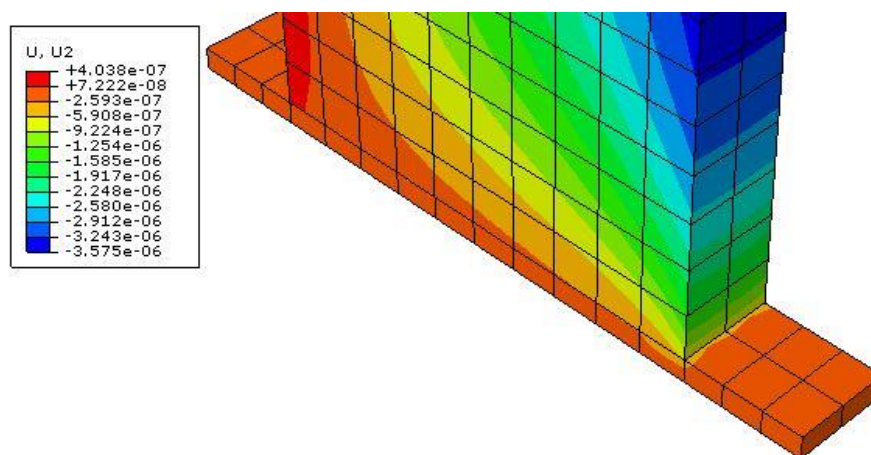
Kao što je spomenuto, proračunski model je diskretiziran sa izoparametarskim heksaedarskim konačnim elementima drugog reda sa reduciranom integracijom, oznake C3D20R, gdje svaki element ima 20 čvorova od kojih svaki ima po 3 stupnja slobode. Ukupan broj konačnih elemenata na oba dijela je 232.

Mreža sa 232 konačnih elemenata prikazana je na slici 4.6.



Slika 4.6 Proračunski model diskretiziran sa 232 konačna elementa

Uspoređivala se reakcijska sila podloge izračunata analitički i numerički. U oba slučaja iznos reakcijske sile podloge je $F_N = 15,3036$ N. Na slici 4.7 su prikazani rezultati simulacije, koji osim točnog rezultata pokazuju kako su odabrani C3D20R elementi pogodni za definiranje kontakta, jer ne dolazi do prodiranja jednog tijela u drugo, tj. pomaci u smjeru osi y su jednaki nuli.



Slika 4.7 Prikaz rezultata za mrežu od 232 konačna elementa

5. NUMERIČKI PRORAČUN POSTUPKA ČEPLJENJA CIJEVI PROMJERA 13 mm

5.1 Numerički proračun mehaničkog čepa za čepljenje cijevi parogeneratorskog unutrašnjeg promjera $\phi = 13$ mm :

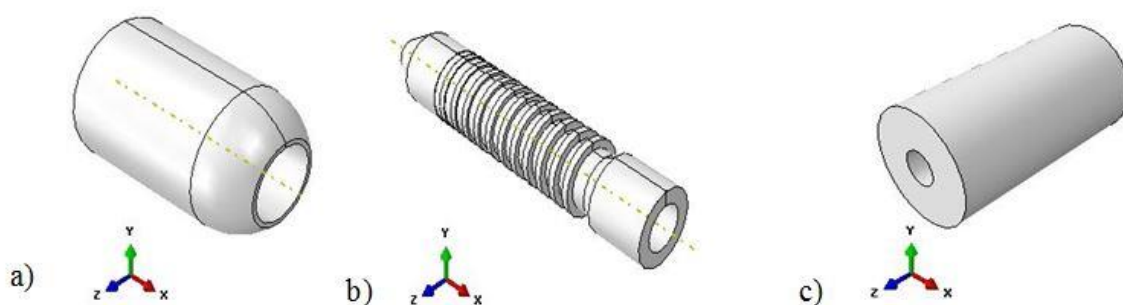
Cijevi parogeneratorskog primarnog kruga nuklearnih elektrana podložne su periodičkom ispitivanju, metodom neraznog ispitivanja. Jedna od metoda je i metoda vrtložnih struja (eng. *Eddy Current*). Cilj ispitivanja je provjera cjelovitosti cijevne stijenke kako bi se spriječilo curenje radioaktivnog medija iz primarnog kruga u sekundarni krug. U slučaju pronalaska oštećenja procijenjenog kao kritično, potrebno je provesti korektivne aktivnosti čepjenja oštećene cijevi, čime se ista uklanja iz upotrebe. Da bi parogenerator zadržao svoju punu funkcionalnost, dozvoljeno je začepiti najviše trećinu ukupnog broja cijevi.

Na tržištu postoje tri vrste čepova: mehanički, rolani i zavareni čep. Tehnologija mehaničkog čepa uspješno se primjenjuje na PWR tipovima parogeneratorskog koji imaju unutrašnji promjer cijevi $\phi = 13$ mm.

U ovom diplomskom radu, najprije je bio zadatak dobiti numeričku simulaciju postupka čepjenja cijevi unutrašnjeg promjera $\phi = 13$ mm, te će se u nastavku opisati postupak kojim se došlo do konačne simulacije.

5.1.1 Modeliranje geometrije i mehaničkih svojstava materijala:

Proračunski model se sastoji od tri dijela: ekspandera, mehaničkog čepa i cijevi. Na slici 5.1 su prikazani svi dijelovi potrebni za numeričku simulaciju postupka čepjenja cijevi unutrašnjeg promjera $\phi = 13$ mm.



Slika 5.1 Prikaz proračunskog modela, redom: a) ekspander, b) mehanički čep, c) cijev

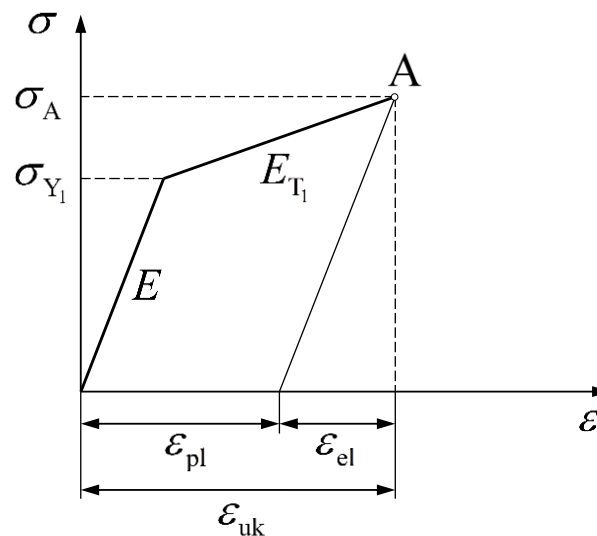
Mehanički čep i cijev izrađeni su od nehrđajućeg čelika, naziva *Inconel 690*, a materijal ekspandera je *Stainless Steel 450* koji je zakaljen do površinske tvrdoće HRC 55. Prilikom numeričkog proračuna bilo je potrebno uzeti u obzir i pojavu plastičnih deformacija, dakle

promatralo se elasto- plastično ponašanje materijala. Zbog nemogućnosti pronalaska svih potrebnih mehaničkih svojstava spomenutih materijala, materijal koji je korišten za ovaj numerički proračun jest čelik sa mehaničkim svojstvima navedenim u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Mehanička svojstva čelika

Modul elastičnosti	E [N/mm ²]	210000
Poissonov broj	ν []	0,3
Tangentni modul elastičnosti	E_T [N/mm ²]	3000
Granica tečenja	σ_{Y1} [N/mm ²]	250

Jedini podatak koji je bio dostupan jest da se nehrđajući čelik, *Inconel 690*, ponaša kao elastično- linearno očvršćujući materijal, te se taj podatak uzeo u obzir prilikom definiranja plastičnih deformacija. Model elastično- linearno očvršćujućeg materijala, prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2 Elastično- linearno očvršćujući materijal

Za definiranje elastično-linearno očvršćujućeg materijala u programskom paketu *Abaqus/Standard*, potrebno je izračunati plastičnu deformaciju nakon koje se materijal ponaša plastično.

Za vrijednost naprezanja u proizvoljnoj točki A, iznad granice tečenja, $\sigma_A = 300$ MPa ukupna deformacija iznosi:

$$\varepsilon_{uk} = \frac{\sigma_{Y1}}{E} + \frac{\sigma_{YA} - \sigma_{Y1}}{E_T} = 0,017886 \quad 2.62$$

gdje je elastična deformacija jednaka

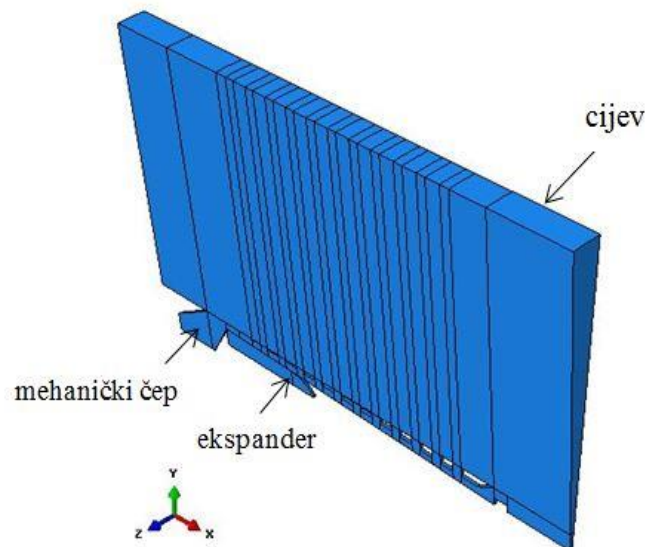
$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma_{Y_A}}{E} = 0,00146 \quad . \quad 2.63$$

Ukupna deformacija jednaka je zbroju elastične i plastične, pa slijedi iznos plastične deformacije:

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{uk} - \varepsilon_{el} = 0,016426 \quad 2.64$$

Budući da su ekspander, mehanički čep i cijev osnosimetrični, radi uštede vremena računanja, numerički proračun se provodio na malom segmentu ukupnog proračunskog modela. Točnije, uzeta je 1/72 ukupnog proračunskog modela, tj. $\frac{5^\circ}{360^\circ} = \frac{1}{72}$. Dakle, nakon što je u modulu

Part u programskom paketu *Abaqus/ Standard* modeliran nacrt ekspandera, mehaničkog čepa i cijevi, sva tri dijela su zarotirana (*eng. revolve*) oko x osi za 5° . Potom je bilo potrebno definirati novi cilindrični koordinatni sustav (r, θ, z) s obzirom na koji su kasnije definirani svi potrebni rubni uvjeti. Uzdužna os cilindričnog koordinatnog sustava označena je sa z i podudara se s uzdužnom osi simetrije cijevi. Oznaka za radialnu os je r , a θ je cirkularna os. Sklop proračunskog modela je prikazan na slici 5.3.

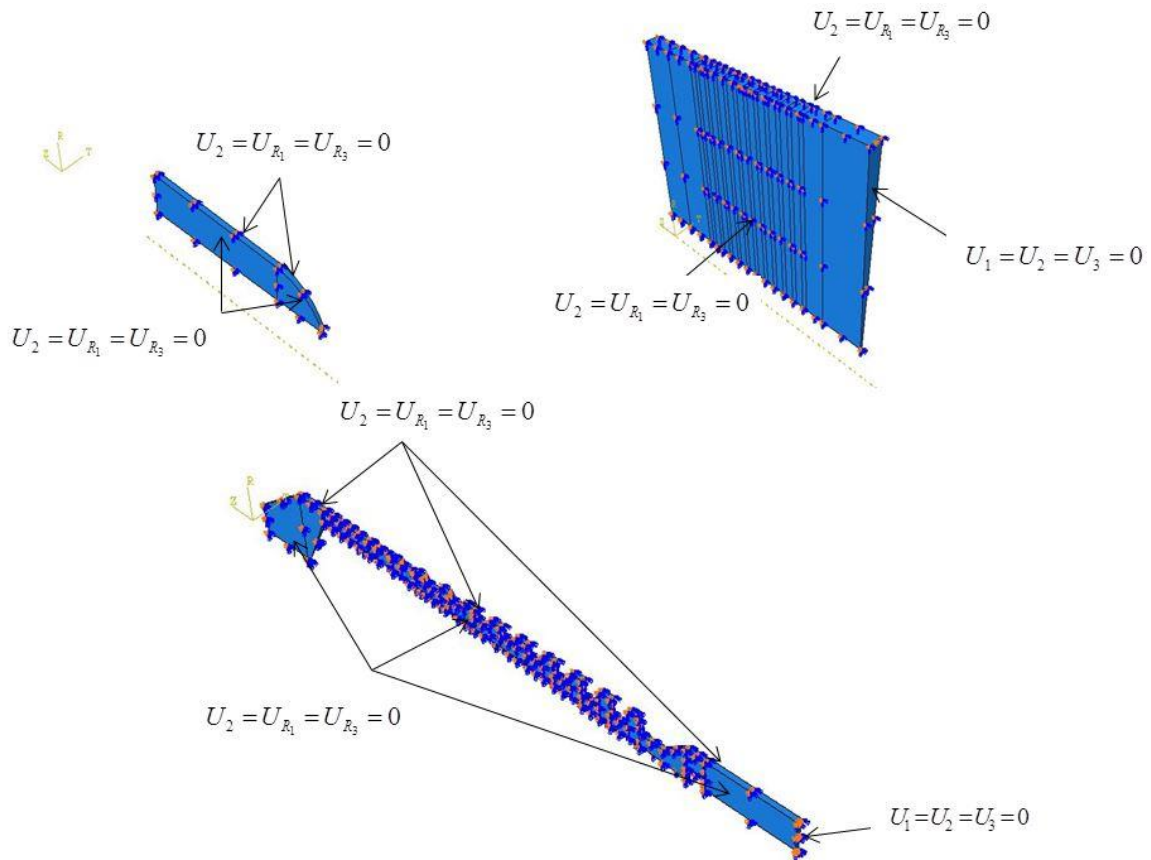


Slika 5.3 Sklop proračunskog modela

5.1.2 Rubni uvjeti

Rubni uvjeti koji su zadani za ovaj proračunski model su rubni uvjeti simetrije na ekspanderu, mehaničkom čepu i cijevi, ($U_2 = U_{R_1} = U_{R_3} = 0$). Spriječen je pomak u θ smjeru, te rotacije u R i Z smjeru, u odnosu na novi cilindrični koordinatni sustav. Još su spriječeni pomaci u

smjeru svih triju osi, R , θ i Z na desnom rubu cijevi i mehaničkog čepa. Plohe na kojima su nametnuti spomenuti rubni uvjeti simetrije su prikazani na slici 5.4.



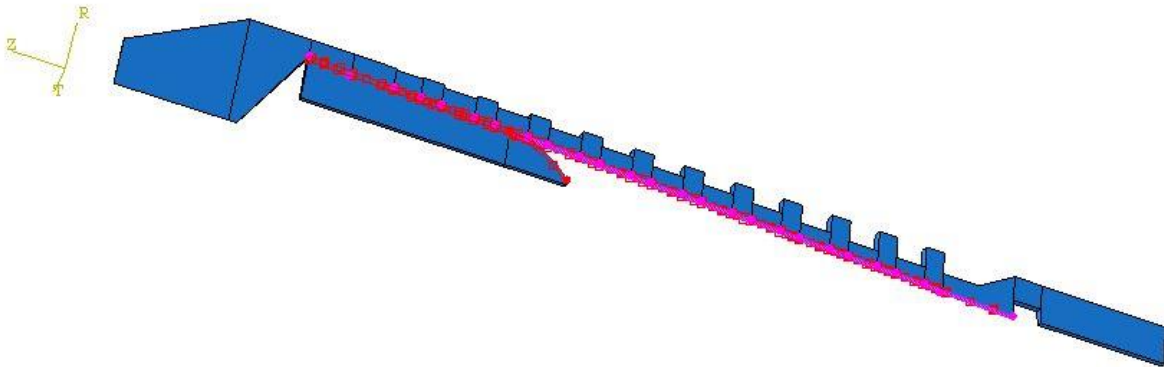
Slika 5.4 Rubni uvjeti simetrije i pomaka na ekspanderu, mehaničkom čepu i cijevi

5.1.3 Definiranje kontaktnih površina

Nakon što su definirani rubni uvjeti simetrije i rubni uvjeti pomaka potrebno je definirati kontaktne površine između ekspandera i mehaničkog čepa, te mehaničkog čepa i cijevi.

- kontakt između ekspandera i mehaničkog čepa:

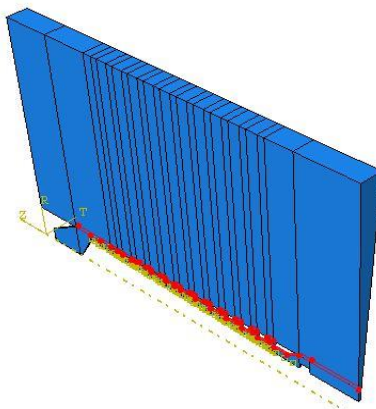
Odabran je *Surface- to- surface* kontakt sa konačnim klizanjem (*eng. Finite sliding*), koje dopušta proizvoljno gibanje kontaktnih površina. Prilikom ove diskretizacije ne dolazi do prodiranja *master* čvorova kroz *slave* konturu. *Master* površina je odabrana površina ekspandera (crvena boja), dok je *slave* površina (ružičasta boja), površina mehaničkog čepa, kao što prikazuje slika 5.5. Kontaktu *Surface- to surface* su dodana tangencijalna i normalna mehanička svojstva. Tangencijalna (*Friction*), zadavanjem kinematičkog koeficijenta trenja μ i normalna mehanička svojstva definiranjem čvrstog kontakta (*Hard Contact*) sa penalty metodom.



Slika 5.5 Definirani *Surface- to- surface* kontakt između ekspandera i mehaničkog čepa

- kontakt između mehaničkog čepa i cijevi:

Odabran je osnovni kontaktni model, *General contact*, koji je najpogodniji za ovaj slučaj, jer mehanički čep i cijev, zapravo, nisu u fizičkom kontaktu prije djelovanja zadanog opterećenja. Između njih postoji zračnost od 0,05 mm. Kod osnovnog kontaktnog modela, *General contact*, nije potrebno definirati zračnost. Najvažnije je ispravno definirati *master* i *slave* površinu, tako da ne bi došlo do prodiranja jednog materijala u drugi. Na slici 5.6 je prikazan opisani kontakt. *Master* površina je površina cijevi, a *slave* površina je površina mehaničkog čepa. Jedna od karakteristika *master* površine je ta da odabrana površina mora biti kontinuirana, što u ovom slučaju mehanički čep ne zadovoljava, pa je izbor za *master* površinu bio očit.



Slika 5.6 Definirani *General contact* između mehaničkog čepa i cijevi

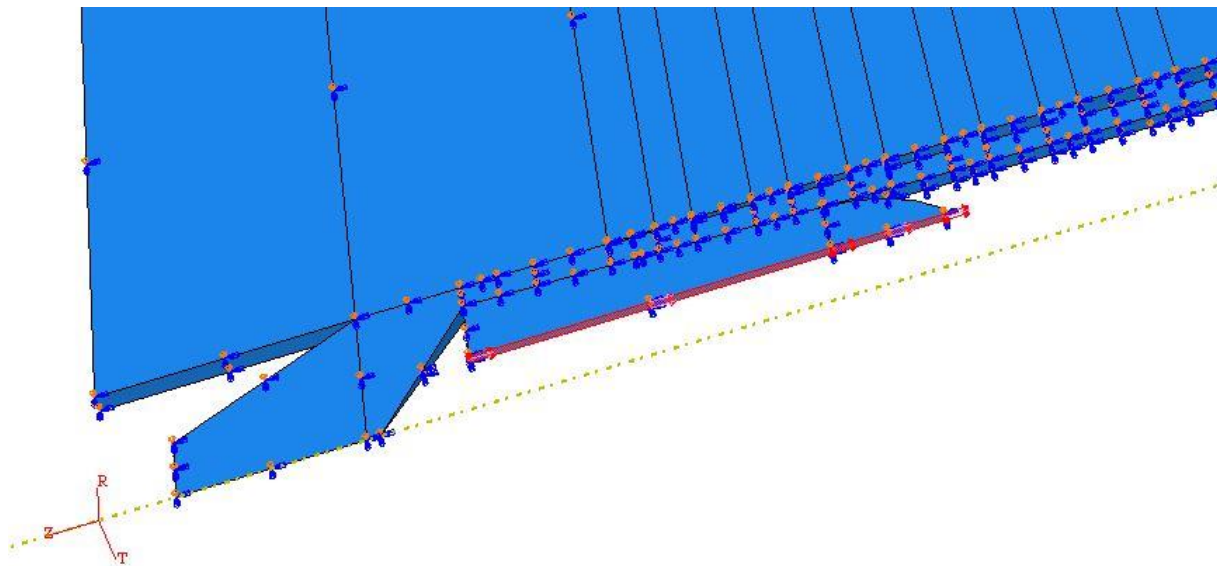
5.1.4 Zadavanje opterećenja

Da bi se zadalo realno opterećenje, potrebno je opisati postupak čepljenja cijevi, kao što slijedi.

Unutar mehaničkog čepa nalazi se ekspander, što se može vidjeti sa slike 5.3, gdje je prikazan sklop proračunskog modela. Ekspander se unutar mehaničkog čepa ubacuje posebnom

tehnikom, čiji detalji nisu poznati. U ekspanderu se nalazi navoj u koji se ušarafljuje potezna šipka od uređaja za čepljenje, koja ovdje nije prikazana. Povlačenjem ekspandera, zbog kosine na čepu, čep se širi, plastično deformira i tako se učvršćuje za cijev. Nakon toga se šipka za povlačenje odšarafljuje, a čep ostaje trajno u cijevi.

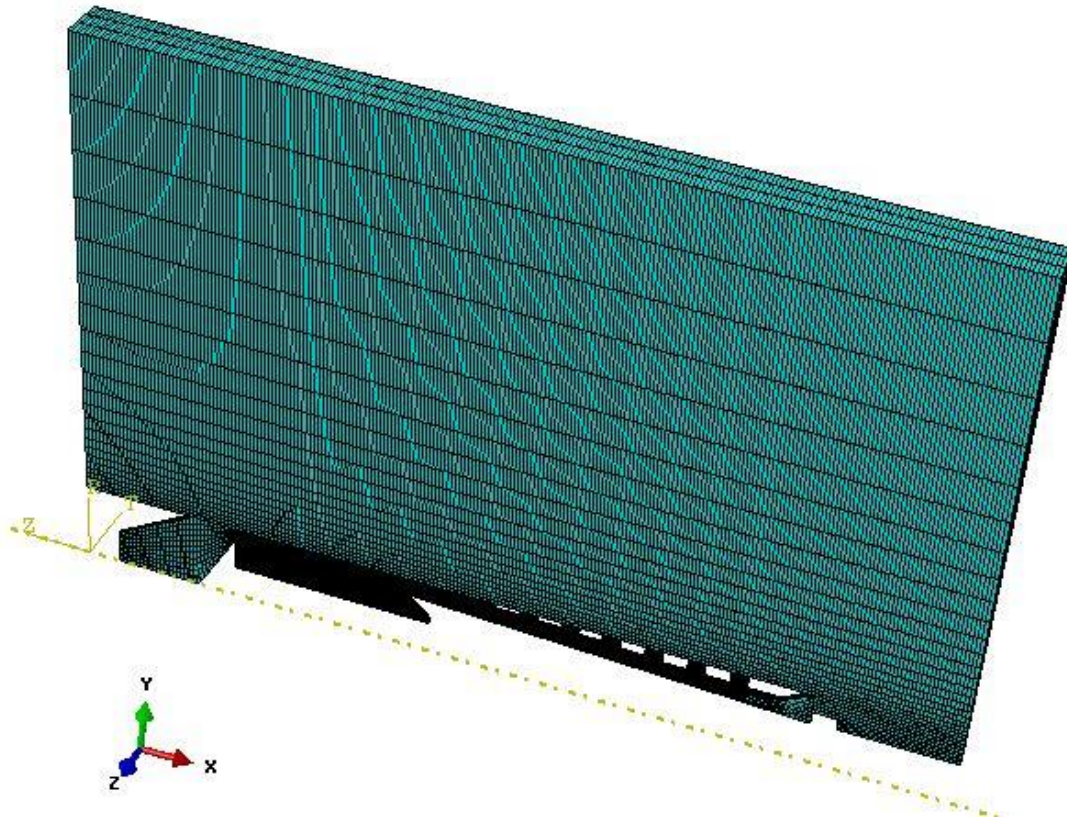
Dakle, opterećenje kojim se opisuje postupak čepljenja cijevi, zadano je preko pomaka. Pomak je zadan na donjoj plohi ekspandera u suprotnom smjeru osi Z s obzirom na cilindrični koordinatni sustav kao što prikazuje slika 5.7. Pomak iznosi $U_3 = -7$ mm, onoliko koliko se u stvarnosti ekspander giba unutar mehaničkog čepa.



Slika 5.7 Prikaz zadanog opterećenja pomakom, iznosa $U_3 = -7$ mm

5.1.5 Mreža konačnih elemenata

Kao što je ranije spomenuto, proračunski model je diskretiziran s izoparametarskim heksaedarskim konačnim elementima drugog reda sa reduciranom integracijom, oznake C3D20R, gdje svaki element ima 20 čvorova od kojih svaki ima po 3 stupnja slobode. Reducirana integracija smanjuje vrijeme računanja, što je osobito važno kod trodimenzijskih konačnih elemenata. Ukupan broj konačnih elemenata na ekspanderu, mehaničkom čepu i cijevi je 39450. Na područjima koja dolaze u kontakt, mreža konačnih elemenata je jako gusta. Razlog tome je što se elementi većih dimenzija lakše distordiraju. Vrlo distordirani element može dalje uzrokovati gubitak točnosti. Progušćivanje mreže na području kontakta dovodi do povećanja računalnog vremena.

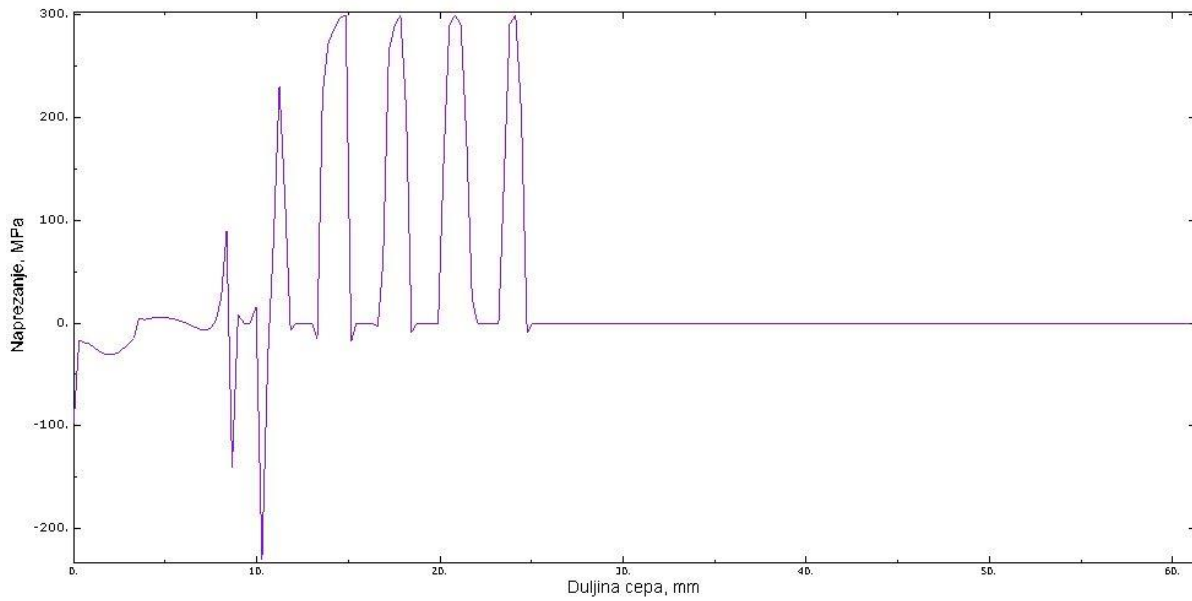


Slika 5.8 Proračunski model diskretiziran sa 39450 C3D20R konačnih elemenata

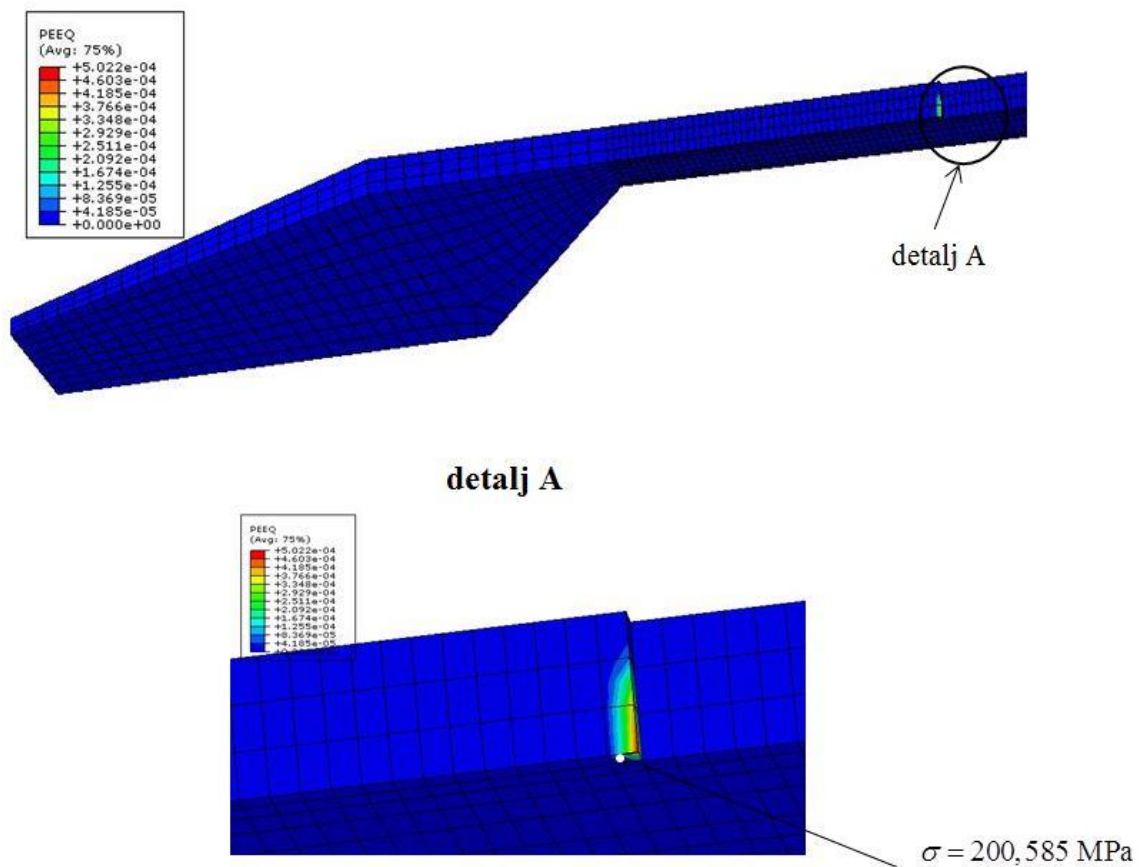
5.2 Obrada rezultata

Jedan od važnijih podataka koji je trebalo očitati jest iznos naprezanja na dodirnim ploham između mehaničkog čepa i cijevi. Bitno je da naprezanja na dodirnim ploham budu dovoljno velika kako ne bi došlo do curenja medija preko mehaničkog čepa kroz oštećenu cijev.

Na dijagramu na slici 5.9, prikazana su naprezanja između mehaničkog čepa i cijevi. Dijagram prikazuje naprezanja u kontaktu po duljini čepa. Krivulja ovisnosti je prikazana za trenutak kada je simulacija završena, tj. kad ekspander postigne zadani pomak u iznosu od $U_3 = -7$ mm, u smjeru osi z u odnosu na cilindrični koordinatni sustav.



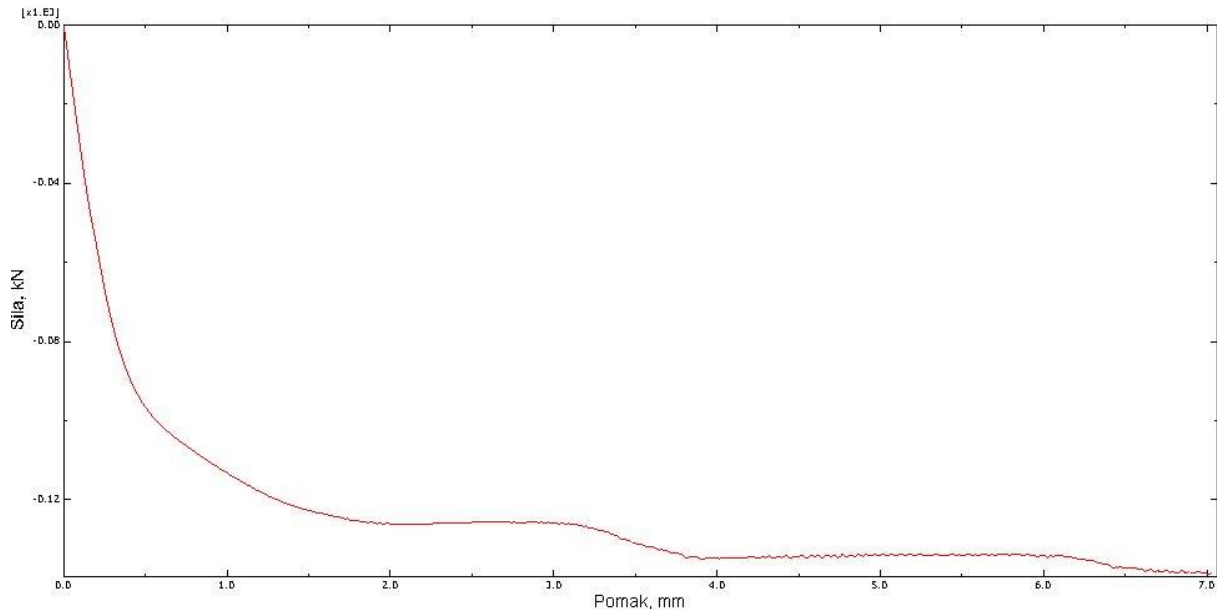
Slika 5.9 Dijagramski prikaz naprezanja u kontaktu mehaničkog čepa i cijevi po njihovoj duljini. Sljedeći podatak koji je važno izdvojiti jest pojava prvih plastičnih deformacija na mehaničkom čepu, te vrijednost naprezanja za koje se javljaju prve plastične deformacije. Slika 5.10 prikazuje pojavu prvih plastičnih deformacija na mehaničkom čepu.



Slika 5.10 Pojava prvih plastičnih deformacija na mehaničkom čepu promjera 13 mm

Zbog oštrog bridova koji se mogu vidjeti na slici 5.10 na detalju A postoji mogućnost pojave velikih lokalnih naprezanja, te iznos naprezanja ne bi bio realan, stoga je naprezanje očitano za jedan čvor dalje od oštrog ruba i iznosi $\sigma = 200,585 \text{ MPa}$.

Na slici 5.11 je prikazan dijagram ovisnosti reakcijske sile F u smjeru osi z i pomaka u smjeru osi z , u odnosu na cilindrični koordinatni sustav.



Slika 5.11 Dijagram sila – pomak za mehanički čep promjera 13 mm

Iz dijagrama se može očitati da je sila kojom se ekspander povlači jednaka 138,382 N. Mora se uzeti u obzir da je to iznos sile za 1/72 dio ukupnog proračunskog modela, te konačni iznos sile kojom se povlači ekspander iznosi $F = 9963,5 \text{ N}$.

Iznos sile kojom se ekspander u stvarnosti povlači jest $F = 37506 \text{ N}$ što je 3,7 puta veći iznos nego dobiveni numeričkim proračunom. Mora se imati u vidu da je slučaj kontakta vrlo kompliciran i da sve anomalije zasigurno leže u definiciji kontakta, te je potrebno uistinu mnogo vremena i iščitane literature da bi se došlo do konkretnijeg zaključka. Također, proračunski model u potpunosti ne odgovara realnom modelu, najprije materijal nije isti, stoga dosta je faktora koji se razlikuju što bi moglo opravdati veliku razliku u sili.

6. NUMERIČKI PRORAČUN POSTUPKA ČEPLJENJA CIJEVI PROMJERA 16 mm

Osim numeričke simulacije postupka čepljenja cijevi unutrašnjeg promjera $\phi = 13$ mm, tema ovoga rada je i dizajn i proračun mehaničkog čepa vanjskog promjera $\phi = 16$ mm, koji bi se primjenjivao na elektranama PWR tipa, odnosno na cijevima unutrašnjeg promjera $\phi = 16$ mm. Dizajn mehaničkog čepa vanjskog promjera $\phi = 16$ mm se temelji na postojećem mehaničkom čepu $\phi = 13$ mm.

6.1 Zadavanje svojstava proračunskom modelu u programskom paketu *Abaqus/Standard*

6.1.1 Modeliranje geometrije i definiranje mehaničkih svojstava materijala:

Geometrija mehaničkog čepa $\phi = 16$ mm modelirala se na način da su se dimenzije mehaničkog čepa promjera $\phi = 13$ mm razmjerno povećale. Mehanički čep i cijev izrađeni su od nehrđajućeg čelika, naziva *Inconel 690*, a materijal ekspandera je *Stainless Steel 450* koji je zakaljen do površinske tvrdoće HRC 55, kao i čep promjera $\phi = 13$ mm. Prilikom numeričkog proračuna bilo je potrebno uzeti u obzir i pojavu plastičnih deformacija, dakle promatralo se elasto- plastično ponašanje materijala. Mehanička svojstva materijala su ista kao i za čep promjera $\phi = 13$ mm i prikazana su u tablici 5.1. Elastična, plastična i ukupna deformacija su izračunate u odjeljku 5.1.1 u jednadžbama broj (2.63), (2.64) i (2.62). Proračunski model se sastoji od ekspandera, mehaničkog čepa i cijevi, kao što je prikazano na slici 5.1.

Budući da su ekspander, mehanički čep i cijev osnosimetrični, radi uštede vremena računanja, numerički proračun se provodio na malom segmentu ukupnog proračunskog modela. Točnije, uzeta je $1/72$ ukupnog proračunskog modela, tj. $\frac{5^\circ}{360^\circ} = \frac{1}{72}$. Dakle, nakon što je u modulu

Part u programskom paketu *Abaqus/Standard* modeliran nacrt ekspandera, mehaničkog čepa i cijevi, sva tri dijela su zarotirana (*eng. revolve*) oko x osi za 5° . Potom je bilo potrebno definirati novi cilindrični koordinatni sustav (r, θ, z) s obzirom na koji su kasnije definirani svi potrebni rubni uvjeti. Uzdužna os cilindričnog koordinatnog sustava označena je sa z i podudara se s uzdužnom osi simetrije cijevi. Oznaka za radijalnu os je r , a θ je cirkularna os. Dakle, modeliranje se provelo na potpuno isti način kao i za mehanički čep promjera $\phi = 13$ mm.

6.1.2 Zadavanje rubnih uvjeta proračunskom modelu

Rubni uvjeti su također jednaki kao za prethodno proračunati mehanički čep. Dakle, spriječen je pomak u θ smjeru, te rotacije u R i Z smjeru, u odnosu na novi cilindrični koordinatni sustav ($U_2 = U_{R_1} = U_{R_3} = 0$). Još su spriječeni pomaci u smjeru svih triju osi, R , θ i Z na desnom rubu cijevi i mehaničkog čepa. Plohe na kojima su nametnuti spomenuti rubni uvjeti simetrije su prikazani na slici 5.4.

6.1.3 Definiranje kontaktnih površina

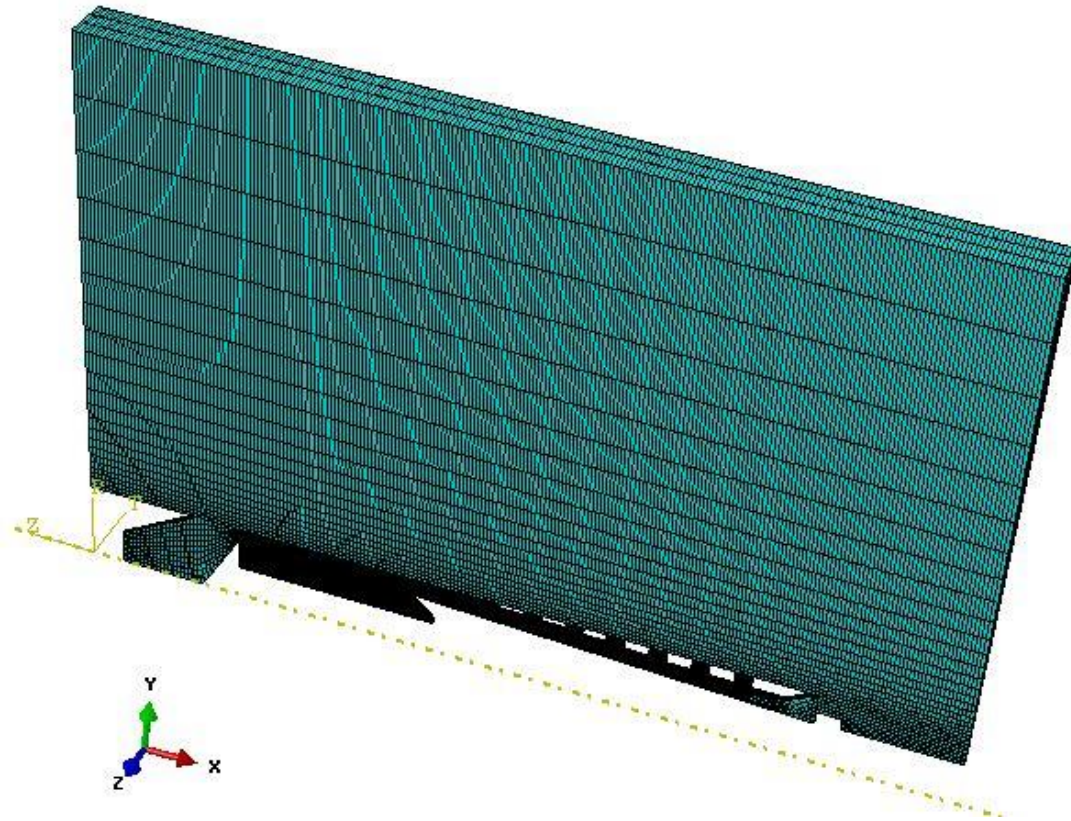
Definiranje kontaktnih površina između ekspandera i mehaničkog čepa, te mehaničkog čepa i cijevi, provelo se na identičan način kao ranije i opisano je u odjeljku 5.1.3 i prikazano na slikama 5.5 i 5.6. Dakle za kontaktnu površinu između ekspandera i čepa odabran je *Surface-to-surface* kontakt sa konačnim klizanjem (*eng. Finite sliding*), koje dopušta proizvoljno gibanje kontaktnih površina. *Master* površina je odabrana površina ekspandera (crvena boja), dok je *slave* površina (ružičasta boja), površina mehaničkog čepa, kao što prikazuje slika 5.5. Kontaktu *Surface-to-surface* su dodana tangencijalna i normalna mehanička svojstva. Tangencijalna (*Friction*), zadavanjem kinematičkog koeficijenta trenja μ i normalna mehanička svojstva definiranjem čvrstog kontakta (*Hard Contact*) sa penalty metodom. Kontaktna površina između mehaničkog čepa i cijevi definirana je osnovnim kontaktnim modelom, *General contact* što prikazuje slika 5.6.

6.1.4 Zadavanje opterećenja

Opterećenje je zadano u skladu sa opisanim postupkom čepljenja u odjeljku 5.1.4, kao i pomak koji je zadan na donjoj plohi ekspandera u suprotnom smjeru osi Z s obzirom na cilindrični koordinatni sustav kao što prikazuje slika 5.7. Pomak iznosi $U_3 = -7$ mm, onoliko koliko se u stvarnosti ekspander giba unutar mehaničkog čepa. Narinuto opterećenje je prikazano na slici 5.7.

6.1.5 Mreža konačnih elemenata

Kao i za proračunski model manjeg promjera, i ovaj je diskretiziran s izoparametarskim heksaedarskim konačnim elementima drugog reda sa reduciranom integracijom, oznake C3D20R, gdje svaki element ima 20 čvorova od kojih svaki ima po 3 stupnja slobode. Reducirana integracija smanjuje vrijeme računanja, što je osobito važno kod trodimenzijskih konačnih elemenata. Ukupan broj konačnih elemenata na ekspanderu, mehaničkom čepu i cijevi je 38166 i mreža je prikazana na slici 6.1.

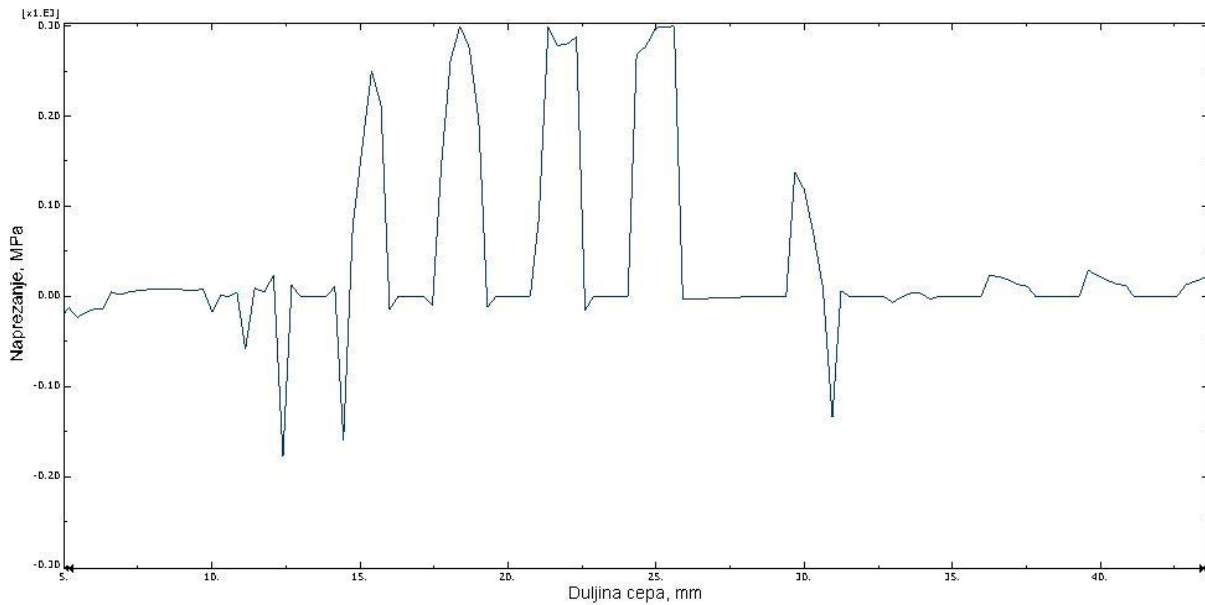


Slika 6.1 Proračunski model diskretiziran sa 38166 C3D20R konačnih elemenata

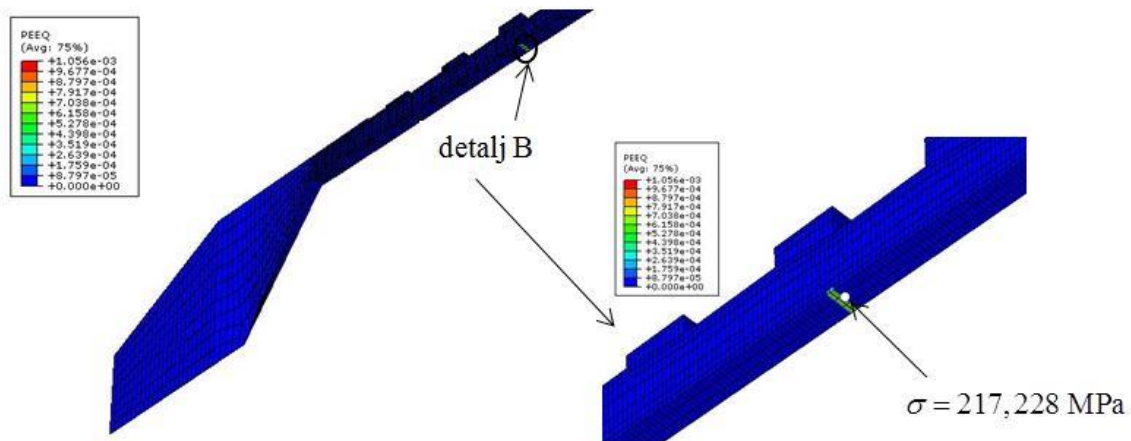
6.2 Obrada rezultata

U prethodnom numeričkom proračunu za mehanički čep promjera $\phi = 13$ mm prikazan je iznos naprezanja na dodirnim plohama između mehaničkog čepa i cijevi. Taj podatak je provjeren i za mehanički čep promjera $\phi = 16$ mm. Usporedbom iznosa naprezanja na kontaktnim površinama mehaničkih čepova i cijevi, donijet će se zaključak o dizajnu mehaničkog čepa promjera $\phi = 16$ mm. Glavni uvjet i dalje mora biti zadovoljen, a to je da naprezanja na dodirnim plohama budu dovoljno velika kako ne bi došlo do curenja medija preko mehaničkog čepa kroz oštećenu cijev.

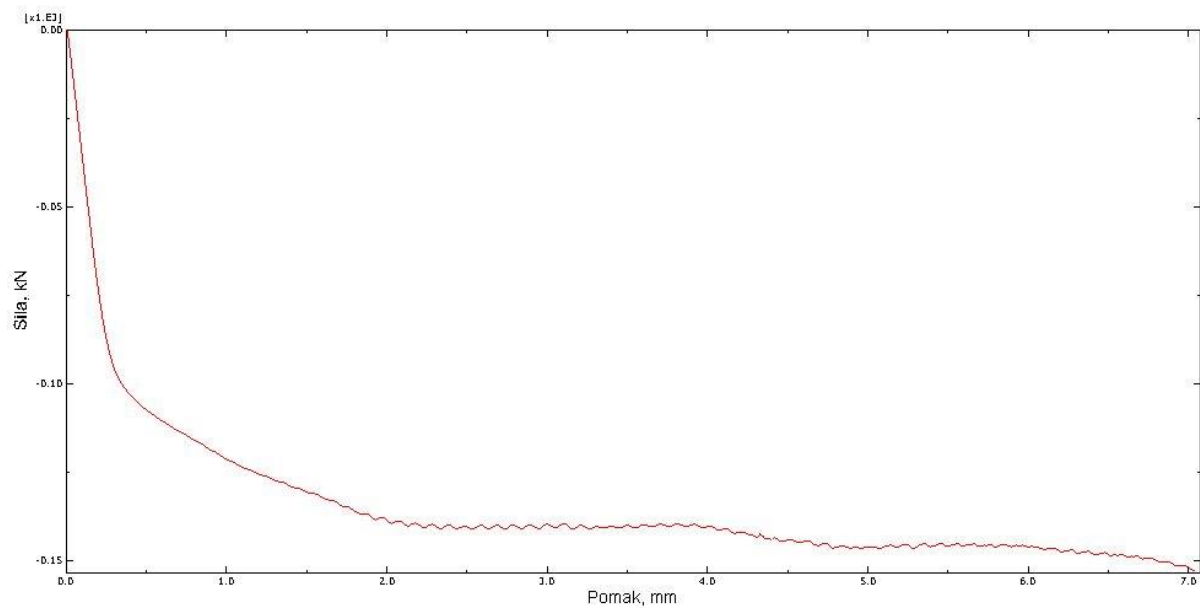
Na dijagramu, na slici 6.2, prikazana su naprezanja između mehaničkog čepa i cijevi. Dijagram prikazuje naprezanja u kontaktu po duljini čepa. Krivulja ovisnosti je prikazana za trenutak kada je simulacija završena, tj. kad ekspander postigne zadani pomak u iznosu od $U_3 = -7$ mm, u smjeru osi z u odnosu na cilindrični koordinatni sustav.



Slika 6.2 Dijagramski prikaz naprezanja u kontaktu mehaničkog čepa i cijevi po njihovoj duljini. Također, važno je izdvojiti podatak o pojavi prvih plastičnih deformacija na mehaničkom čepu, te vrijednost naprezanja za koje se javljaju prve plastične deformacije i ono iznosi $\sigma = 217,228$ MPa. Slika 6.3 prikazuje pojavu prvih plastičnih deformacija na mehaničkom čepu i iznos naprezanja pri kojem se javljaju prve plastične deformacije.



Slika 6.3 Pojava prvih plastičnih deformacija na mehaničkom čepu promjera 16 mm. Dijagram ovisnosti reakcijske sile F u smjeru osi z i pomaka u smjeru osi z , u odnosu na cilindrični koordinatni sustav prikazan je na slici 6.4.



Slika 6.4 Dijagram sila- pomak za mehanički čep promjera 16 mm

Iz dijagrama se može očitati da je sila kojom se ekspander povlači jednaka 150 N. Taj iznos odgovara 1/ 72 dijelu ukupnog proračunskog modela, te konačni iznos sile kojom se povlači ekspander iznosi $F = 10800$ N.

Za opisani proračunski model nije poznata sila kojom bi se ekspander trebao vući. Treba uzeti u obzir složenost kontakata, kao i ne podudaranje materijala proračunskog modela sa materijalom realnog modela, stoga dobiveni iznos sile treba dodatno provjeriti.

7. ZAKLJUČAK

Ako najprije razmotrimo rezultate verifikacije odabranog izoparametarskog konačnog elementa C3D20R, vidimo da su numerička i analitička rješenja potpuno jednaka. Provjerom iznosa pomaka U_2 u smjeru osi y , na području dodirne površine bloka i pravokutne ploče, zaključuje se kako ne dolazi do prodiranja bloka u podlogu, te se izoparametarski heksaedarski element drugog reda sa reduciranom integracijom, oznake C3D20R u programskom paketu *Abaqus/ Standard* uzima kao zadovoljavajući za opisivanje problema postupka čepljenja cijevi.

Konstrukcija mehaničkog čepa promjera 13 mm se već uspješno koristi, tj. postiže se zadovoljavajuće brtvljenje između čepa i cijevi čime se sprječava curenje medija preko čepa kroz oštećenu cijev.

Numerički proračun obaju mehaničkih čepova se provodio na način da su se zadale karakteristike materijala, potrebni rubni uvjeti, te su definirani zadovoljavajući kontakti između ekspandera i mehaničkog čepa i između čepa i cijevi. Opterećenje je zadano pomakom na plovu ekspandera. Povlačenjem ekspandera, zbog kosine na čepu, čep se širi, plastično deformira i tako se učvršćuje za cijev. Budući da dobivena naprezanja na dodirnoj površini između mehaničkog čepa i cijevi ne prelaze naprezanje iznad granice tečenja, tj. naprezanja su u granicama plastičnosti, za odabrani materijal, proračunati model se smatra zadovoljavajućim.

Modeliranjem mehaničkog čepa promjera $\phi = 16$ mm sa istim svojstvima materijala, tako da su se dimenzije postojećeg manjeg čepa razmjerno povećavale, dobiju se približno jednaki iznosi naprezanja između čepa i cijevi obaju promjera, te se može zaključiti da mehanički čep promjera 16 mm bi mogao zadržati jednake karakteristike u konstrukcijskom smislu. Dakle, numeričkim proračunom čepa $\phi = 13$ mm i čepa $\phi = 16$ mm potvrđeno je da se razmjernim povećanjem dimenzija dobije zadovoljavajuća konstrukcija.

Za veći stupanj sigurnosti, svakako bi se preporučilo ponavljanje obaju numeričkih proračuna sa realnim svojstvima materijala.

8. LITERATURA

- [1] Pustaić, D., Cukor, I. Teorija plastičnosti i viskoelastičnosti, Zagreb, 2009.
- [2] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Vlacni%20pokus.pdf>
- [3] <http://www.mojaenergija.hr/index.php/me/Knjiznica/Teme/Nuklearna-energija>
- [4] Alfirević, I. Uvod u tenzore i mehaniku kontinuuma, Zagreb, 2003.
- [5] Karšaj, I. Numeričko modeliranje procesa deformiranja uz pretpostavku velikih deformacija, Doktorski rad, Zagreb, 2006.
- [6] Sorić, J. Metoda konačnih elemenata, Zagreb, 2004.
- [7] Sorić, J. Nelinearna numerička analiza konstrukcija, PDF predavanja
- [8] ABAQUS, *Abaqus Documentation: Version 6.14*. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE.
- [9] ABAQUS, *Abaqus Software: Version 6.14*. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE
- [10] King, S., Richards, T., Solving Contact Problems with Abaqus, DS UK Ltd. Coventry- March, 2013.